ATIKSU MÜHENDİSLİĞİ

ATIKSU HİDROLİĞİ
ARITMA TESİSLERİ TASARIMI
ÇAMUR YÖNETİMİ
ENDÜSTRİYEL KİRLENME KONTROLÜ
KONTROL-OTOMASYON VE MALİYET ANALİZİ

Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (Başyazar)

İSKİ

Teknik Kitaplar Serisi

İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ

ATIKSU MÜHENDİSLİĞİ

ATIKSU HİDROLİĞİ
ARITMA TESİSLERİ TASARIMI
ÇAMUR YÖNETİMİ
ENDÜSTRİYEL KİRLENME KONTROLÜ
KONTROL-OTOMASYON VE MALİYET ANALİZİ

Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (Başyazar)

Teknik Kitaplar Serisi
İstanbul, 2017

İSKİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Güzeltepe Mahallesi Alibey Caddesi No:7 34060
Eyüp/İSTANBUL
Tel: 0212 321 00 00 - 0212 301 20 00
Faks: 0212 321 77 19
www.iski.istanbul

ISBN: 0000511-3

YAZARLAR:
Prof. Dr. İzzet Öztürk (Başyazar)
Prof. Dr. İsmail Koyuncu
Doç. Dr. Çiğdem Yangın Gömeç
Yrd. Doç.Dr. M. Ekrem Karpuzcu
Yrd. Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin
Dr. Hacer Timur
Dr. Hale Özgün
Dr. Recep Kaan Dereli
Dr. Ufuk Koşkan
Yük.Çev. Müh. Hazal Gülhan
Çev. Müh. Malhun Fakıoğlu
Elekt-Elektronik Müh. Mehmet Öztürk

KAPAK TASARIMI:
İSKİ Basın Yayın ve Halkla İlişkiler Şube Müdürlüğü
Hatice MAZLUM

BASKI:
Stilnet Basım Hiz. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Cumhuriyet Mah. Hüdavendigar Sok. No:23/A Kartal/İstanbul
Tel : (0216) 387 30 44
Fax : (0216) 306 20 64
E-mail : info@stilnet.com.tr
Web : http://www.stilnet.com.tr

©2016 İSKİ
Bu kitabın bütün yayın hakları İSKİ'ye aittir. İSKİ'nin yazılı izni olmaksızın kısmen veya tamamen alıntı yapılamaz, kopya çekilemez, çoğaltılamaz ve yayınlanamaz.

ÖNSÖZ

Bu kitap üniversitelerin çevre mühendisliği bölümlerinde okutulan Atıksu Arıtma Tesislerinin Tasarımı, Atıksu (arıtma tesisleri) Hidroliği ve Endüstriyel Kirlenme Kontrolü dersleri öğrencileri ile kamu ve özel sektörlerde çalışan meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını çok büyük ölçüde karşılayacak bir yardımcı Türkçe kaynak eser olması gayesiyle yazılmıştır. Toplam 13 bölümden oluşan "Atıksu Mühendisliği" isimli bu eserde konu ile ilgili çok sayıda kaynak kitap, teknik rapor, tasarım rehberi, şartname ve proje incelenerek, doğrudan uygulamaya yönelik temel bilimsel ve teknik esaslar verilmiştir. Kitapta, mühendislik tasarımı alanında çalışan meslektaşlarımızın ihtiyaç duyduğu Türkiye'ye özgü ve uluslararası veriler ile güncel atıksu arıtma prosesleri ve hidrolik tasarım konularına geniş ölçüde yer verilmiştir. Konuların daha iyi anlaşılabilmesi için bazı bölümlere çözümlü problemler ve proje örnekleri ilave edilmiştir. Kitabın çevre ve inşaat mühendisliği bölümü lisans öğrencileri ile tasarım camiasına faydalı olması temenni edilmektedir.

Kitapta özellikle Metcalf ve Eddy (1981, 2003 ve 2013), Hager (1999), Eroğlu (2002), Eckenfelder (1989), Muslu (1996), Öztürk (2007), Topacık ve Koyuncu (2006), Tchobanoglous ve Crites (1998), Qasım (1999) ve Henze vd. (1997)'den geniş ölçüde istifade edilmiştir. Bu yüzden ilgili kitapların yazarları ve yayınevlerine şükranlarımı sunarım. Kitaptaki bazı hususların daha kapsamlı olarak incelenmesi için öncelikle bu kaynaklara başvurulması gerekecektir. Bütün çabamıza rağmen yine de bulunması kaçınılmaz olan yazım/dizgi hataları dolayısıyla anlayışınızı rica ederim.

Kitabın derlenmesi, bilgisayarda itina ile yazımı ve belirli bölümlerdeki destekleri dolayısıyla Y. Müh. Zehra Aynur, Çev. Müh. Hazal Gülhan ve Çev. Müh. Malhun Fakıoğlu'na teşekkür ederim. İlgili bölümlerin yazımındaki katkıları dolayısıyla Prof. Dr. İsmail Koyuncu, Doç. Dr. Çiğdem Yangın Gömeç, Yrd. Doç. Dr. M. Ekrem Karpuzcu, Yrd. Doç. Dr. M. Evren Erşahin, Dr. Hacer Timur, Dr. Ufuk Koşkan, Dr. R. Kaan Dereli ve Dr. Hale Özgün'e şükranlarımı sunarım. Kitapta kullanılan pek çok veride emeği olan lisans ve yüksek lisans öğrencilerim ile diğer meslektaşlarıma, ayrıca kitabın yazım sürecindeki büyük sabır ve anlayışları dolayısıyla aileme en kalbi sevgilerimi sunarım. Onların destekleri olmaksızın bu eserin tamamlanması mümkün olamazdı.

Kitabın üniversite dışında basımına izin veren İTÜ Rektörü Prof. R. Mehmet Karaca ve İnşaat Fakültesi Dekanı Prof. Dr. İsmail Toröz'e teşekkür ederim.

Bu eserin basımını sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSKİ Genel Müdürü Sayın Fatih Turan'a, Çevre Mühendisliği eğitim ve uygulamalarına katkıları dolayısıyla şükranlarımı sunarım.

Prof. Dr. İzzet Öztürk

Sarıyer, 2017

İÇİNDEKİLER

1. ATIKSU MİKTAR VE ÖZELLİKLERİ 1

Prof. Dr. İzzet Öztürk ve Dr. Hacer Timur 1
1.1. Atıksu Akımının Karakteristikleri 1
1.1.1. Birim Su Sarfiyatları 1
1.1.2. Atıksu Akımının Zamanla Değişimi 3
1.1.3. Yüzeysel Akış ve Sızma 5
1.1.4. Atıksu Miktar ve Debilerinin Hesabı 5
1.1.5. Arıtma Tesislerinin Kademelendirilmesi 7
1.2. Atıksu Özellikleri 10
1.2.1. Atıksu Karakterizasyonunda Başlıca Parametreler 10
1.2.2. Evsel Atıksuların Tipik Özellikleri 16
1.2.3. Endüstriyel Atıksular 18
1.2.4. Eşdeğer Nüfus 19
1.2.5. Debi ve kirlilik yüklerinin geleceğe dönük tahmini 19
1.3. Atıksu Debilerinin Ölçümü 23
1.3.1. Debi Ölçümleri 23

2. ATIKSU HİDROLİĞİ 49

Prof. Dr. İzzet Öztürk 49
2.1. Boru ve Açık Kanal Akımlarıyla İlgili Tanımlar ve Temel Denklemler 49
2.1.1. Süreklilik Denklemi 52
2.1.2. Enerji Denklemi 53
2.1.3. Momentum Denklemi 55
2.2. Boru ve Açık Kanallarındaki (Sürekli) Yük Kayıpları 57
2.2.1. Dolu Akan Borularda Sürekli Yük Kayıpları 57
2.2.2. Açık Kanallarda Akım 66
2.2.3. Dairesel Kesitli Boru Hatlarında Yersel Yük Kayıplarının Hesaplanması 67
2.2.4. Açık Kanallarda Yersel Yük Kayıpları 75
2.3. Kısmi Dolu Akışlı Borularda Akım 76
2.3.1. İSKİ'nin Kanalizasyon Şebekeleri Hidrolik Tasarım Şartnamesi 80
2.4. Borulama ve Hidrolik Profil 81
2.4.1. Hidrolik Profil 81

3. FİZİKSEL ARITMA 89

Prof. Dr. İzzet Öztürk 89
3.1. İlk (Mekanik) Arıtma 89
3.1.1. Izgara ve Elekler 89
3.1.2. Kum Tutucu 92
3.1.3. Dengeleme 96
3.2. Birinci Kademe Arıtma 98
3.2.1. Ön Çökeltim 99
3.2.2. Kimyasal Destekli Ön Çökeltim 101
3.3. Atıksu Pompaları ve Pompa (Terfi) İstasyonları 103
3.4. Karıştırma 107
3.4.1. Karıştırmada Enerji Dağılımı 107
3.4.2. Karıştırmada Enerji İhtiyacı 108
3.5. Yüzdürme 110
3.6. Havalandırma 111

3.6.1. Difüzörler ve Hava Üfleyiciler ... 111
3.6.2. Mekanik Havalandırıcılar ... 118

4. BİYOLOJİK ARITMA ... 123

Prof. Dr. İzzet Öztürk, Yrd. Doç.Dr. M. Ekrem Karpuzcu ve Dr. Hale Özgün ... 123
4.1. Biyolojik Arıtmanın Amacı ... 123
4.2. Atıksu Arıtımında Mikroorganizmaların Rolü ... 123
4.2.1. Mikroorganizmaların Sınıflandırılması ... 123
4.2.2. Mikrobiyal Metabolizmanın Tanımı ... 124
4.3. Mikrobiyal Proseslerin Kinetiği ... 125
4.3.1. Reaksiyon Kinetiği ... 126
4.3.2. Prosesler ... 126
4.4. Çevre Koşullarının Biyolojik Reaksiyona Etkisi ... 129
4.4.1. Sıcaklık ... 129
4.4.2. pH ... 130
4.4.3. Çözünmüş Oksijen ... 130
4.4.4. Çözünmüş Karbondioksit ... 130
4.4.5. İyon Konsantrasyonu ... 130
4.5. Biyolojik Arıtma Sistemlerinde Mikrobiyal Proses Kinetiklerinin Uygulanması130
4.5.1. Mikroorganizma ve Substrat Kütle Dengesi ... 131
4.5.2. Arıtılmış Atıksuda Biyokütle ve Substrat Konsantrasyonları ... 132
4.6. Biyolojik Arıtma Prosesleri ... 132
4.6.1. Atıksu Arıtımında Kullanılan Biyolojik Proses Türleri ... 132
4.6.2. Biyolojik Arıtma Proseslerinin Uygulama Alanları ... 135
4.7. Aerobik Prosesler ... 135
4.7.1. Askıda Büyüyen Aerobik Arıtma Sistemleri ... 135
4.7.2. Yüzeyde Büyüyen (Biyofilm) Aerobik Sistemler ... 153
4.7.3. Askıda ve Yüzeyde Büyüyen Ardışık Sistemler ... 160
4.8. Anoksik Prosesler ... 160
4.8.1. Askıda Büyüyen Sistemlerde Denitrifikasyon ... 160
4.8.2. Yüzeyde Büyüyen Sistemlerde Denitrifikasyon ... 161
4.9. Anaerobik Prosesler ... 161
4.10. Basit (Doğal) Arıtma Sistemleri ... 161
4.10.1. Havalandırmalı Lagünler ... 161
4.10.2. Stabilizasyon Havuzları ... 165
4.10.3. Olgunlaşma Havuzları ... 168
4.10.4. Yapay Sulak Alanlar ... 169

5. KÜÇÜK ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ ... 197

Prof. Dr. İzzet Öztürk ... 197
5.1. Genel ... 197
5.1.1. Küçük (Kırsal) Yerleşimlerde Atıksu Yönetim Sorunları ... 197
5.1.2. Küçük Yerleşimler için Atıksu Toplama, Arıtma ve Uzaklaştırma Sistemi Seçim Stratejileri ... 197
5.1.3. Atıksu Miktar ve Özellikleri ... 198
5.1.4. Arazi İncelenmesi ve Yer Seçimi ... 198
5.1.5. Yerinde Atıksu Arıtma Sistemleri ... 204
5.1.6. Türkiye'de Kırsal Alanda Atıksu Yönetimi Sorununun Boyutları ve Çözüm Önerileri 214

6. BESİ MADDELERİNİN KONTROLÜ 221

Dr. Recep Kaan Dereli, Yrd. Doç. Mustafa Evren Erşahin ve Prof. Dr. İzzet Öztürk.. 221
6.1. Besi Maddeleri Kontrol Stratejisi 221
6.1.1. Azot Giderimi ve Kontrolü 221
6.1.2. Fosfor Giderimi 222
6.2. Nitrifikasyon ile Amonyak Giderimi 223
6.2.1. Nitrifikasyon Prosesi: Stokiyometri ve Kinetik 223
6.2.2. Nitrifikasyon Proseslerinin Sınıflandırılması 224
6.3. Azotun Nitrifikasyon-Denitrifikasyon Prosesleri ile Giderimi 230
6.3.1. Denitrifikasyon Prosesi: Stokiyometri ve Kinetik 230
6.3.2. Denitrifikasyon Proseslerinin Sınıflandırılması 232
6.4. Yenilikçi Biyolojik Azot Giderimi Prosesleri 236
6.4.1. Nitritasyon – Denitritasyon Prosesi 236
6.4.2. Kısmi Nitritasyon – Anaerobik Amonyum Oksidasyonu (Deamonifikasyon) Prosesi 239
6.5. Biyolojik Fosfor Giderimi 243
6.5.1. A/O prosesi 244
6.5.2. PhoStrip Prosesi 245
6.5.3. Ardışık Kesikli Reaktör (AKR) 246
6.6. Azot ve Fosforun Birlikte Biyolojik Olarak Giderimi 246
6.6.1. A2/O Prosesi 247
6.6.2. Bardenpho Prosesi (Beş basamaklı) 247
6.6.3. UCT Prosesi 248
6.6.4. VIP Prosesi 248
6.7. Proses Seçimi 249

7. İLERİ ATIKSU ARITIMI 261

Prof. Dr. İzzet Öztürk, Prof. Dr. İsmail Koyuncu ve Çev. Müh. Malhun Fakıoğlu..... 261
7.1. İleri Atıksu Arıtım İhtiyacı 261
7.1.1. Arıtılmış Atıksudaki Kalıntı (Bakiye) Maddeler 261
7.1.2. Kalıntı Maddelerin Etkileri 261
7.2. İleri Atıksu Arıtımında Kullanılan Arıtma Teknolojileri 262
7.2.1. İleri Arıtma Teknolojilerinin Sınıflandırılması 263
7.2.2. Proseslerin Arıtma Seviyeleri 263
7.3. Granüler Filtrasyon ile AKM Giderimi 266
7.3.1. Granüler Filtrasyonun Uygulanabilirliği 266
7.4. Mikroelek ile Kalıntı AKM Giderimi 268
7.5. Diğer İleri Arıtma Yöntemleri 269
7.5.1. Kimyasal Yöntemlerle Fosfor Giderimi 269
7.5.2. Membran Sistemler 274
7.5.3. Kimyasal Oksidasyon 286
7.5.4. Adsorpsiyon 288
7.5.5. İyon Değiştirme 299
7.5.6. Elektrokoagülasyon 303

8. ATIKSULARIN HAVASIZ ARITIMI 311

Dr. Hale Özgün, Dr. Recep Kaan Dereli, Yrd. Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin ve Prof. Dr. İzzet Öztürk 311
8.1. Havasız Arıtmaya Genel Bakış 311
8.1.1. Havasız Arıtma Sistemlerinin Üstünlükleri 311

8.1.2. Havasız Arıtma Sistemlerinin Kısıtları ... 312
8.2. Havasız Arıtmanın Esasları ... 313
8.2.1. Mikrobiyolojik Prosesler ... 313
8.2.2. Mikrobiyolojik Yapı ... 315
8.2.3. Biyoreaksiyonlar ... 315
8.2.4. Mikroorganizmalar Arasındaki Karşılıklı İlişkiler ... 316
8.2.5. Metanojen Popülasyonun pH İle Değişimi ... 317
8.2.6. Temel Proses Kinetiği ... 317
8.2.7. Biyogaz Üretimi ... 320
8.2.8. Havasız Arıtımda Alkalinite İhtiyacı ... 321
8.2.9. Sülfatın Havasız Arıtmaya Etkisi ... 322
8.3. Havasız Arıtma Teknolojileri ... 322
8.3.1. Havasız Reaktör Tipleri ... 323
8.3.2. Havasız Reaktörlerin Karşılaştırılması ... 326
8.4. İşletmeye Alma ve Proses Kontrolü ... 326
8.4.1. İşletmeye Alma ... 327
8.4.2. Havasız Süreçlerin İzlenmesi ve Kontrolü ... 331
8.5. Evsel Atıksuların Havasız Arıtımı ... 332

9. ÇAMURLARIN İŞLENMESİ, ARITILMASI VE UZAKLAŞTIRILMASI ... 341

Doç. Dr. Çiğdem Yangın Gömeç ve Prof. Dr. İzzet Öztürk ... 341
9.1. Çamur Kaynakları, Özellikleri ve Miktarları ... 341
9.1.1. Çamur Kaynakları ... 341
9.1.2. Çamur Özellikleri ... 344
9.1.3. Çamurların Genel Bileşimi ... 344
9.1.4. Çamurlarda Hacim-Kütle İlişkisi ... 347
9.1.5. Çamur Miktarı ... 348
9.2. Çamur İletimi ... 350
9.2.1. Çamurun Reolojik Özellikleri ve Yük Kaybıyla İlişkisi ... 351
9.2.2. Çamurun Borularla İletimi ... 353
9.3. Çamur Arıtma Sistemleri ... 355
9.3.1. Ön İşlemler ... 356
9.3.2. Yoğunlaştırma ... 359
9.4. Stabilizasyon ... 365
9.5. Çamurların Şartlandırılması ... 378
9.6. Çamurların Hijyenizasyonu ... 380
9.6.1. Pastörizasyon ... 380
9.6.2. Uzun Süreli Depolama ... 380
9.7. Çamurların Susuzlaştırılması ... 380
9.7.1. Mekanik Susuzlaştırma Yöntemleri ... 382
9.7.2. Doğal Susuzlaştırma Yöntemleri ... 384
9.8. Çamurların Kurutulması ... 386
9.8.1. Termal Kurutma ... 386
9.8.2. Solar Kurutma ... 387
9.9. Çamurların Yakılması ... 388
9.9.1. Çok Hücreli Yakma Fırını ... 390
9.9.2. Döner Fırın ... 391
9.9.3. Akışkan Yataklı Fırınlar ... 392
9.10. Çamurların Arazi Uygulamaları ... 392
9.11. AB Ülkeleri ve Türkiye'de Kentsel AAT Çamurlarının Yönetimine Bakış ... 395

9.11.1. AB'de Çamur Yönetim Stratejileri 395
9.11.2. Türkiye'de Çamur Yönetim Stratejileri 398
9.11.3. Türkiye'de Büyükşehir AAT Çamurlarının Yönetimiyle ilgili Öneriler 399

10. ARITMA TESİSLERİNDE VERİM, ENERJİ KULLANIMI VE MALİYET 417

Prof. Dr. İzzet Öztürk 417
10.1. Proses Verimi, Güvenilirlik ve Enerji Tasarrufu İle İlgili Genel Esaslar 417
10.2. Atıksu Arıtma Tesislerinde Maliyet Analizi 419
10.2.1. Konvansiyonel Arıtma Sistemleriyle Arıtma Maliyeti 419
10.2.2. İleri Biyolojik Arıtma Sistemleriyle Arıtma Maliyeti 420
10.2.3. Türkiye'den Örnekler 425

11. ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİNDE ÖLÇÜ VE KONTROL 435

Elekt-Elektronik Müh. Mehmet Öztürk ve Prof. Dr. İzzet Öztürk 435
11.1. Kontrol Değişkenleri 435
11.1.1. Birleşik Kontrol 435
11.1.2. Ölçme Bölümü veya Algılayıcı Cihazlar 435
11.1.3. Sinyal İletim Cihazları (Transmiter) 436
11.1.4. Mekanik Sinyal İletimi 436
11.1.5. Pünomatik Sinyal İletimi 436
11.1.6. Elektrik Akımı ile Sinyal İletimi 436
11.2. Arıtma Sisteminde Otomatik Kontrolle İlgili Değişik Uygulamalar 437
11.3. Atıksu Arıtımında Kontrol Stratejilerinin Önemi 441
11.4. Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama (SCADA) Sistemleri 442
11.4.1. SCADA Sisteminin Temel Yapısı 445
11.4.2. SCADA Sisteminin Katmanları 446
11.4.3. SCADA Sisteminin Temel Elemanları 450
11.4.4. SCADA Sisteminin İşlevleri 451
11.4.5. SCADA Sisteminin Sunduğu Hizmetler 452
11.4.6. İleri Seviye Kontrol Sistemleri 452
11.5. Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramlarında (P&ID) Kullanılan Sembol ve Tanımlamalar 453
11.5.1. Enstrüman TAG numaraları 453
11.5.2. Enstrüman Çizgi Sembolleri 456

12. ENDÜSTRİYEL KİRLENME KONTROLÜ 461

Prof. Dr. İzzet Öztürk Dr. Ufuk Koşkan ve Dr. Hacer Timur 461
12.1. Endüstriyel Atıksu Kaynak ve Özellikleri 461
12.1.1. İstenmeyen Atık Özellikleri 461
12.1.2. Atıksu Kaynak ve Özellikleri 463
12.1.3. Su Geri Kullanımı ve Kaynakta Atık Kontrolu 466
12.2. Atıksu Arıtma Prosesleri 467
12.3. Endüstriyel Atıksu Arıtımı 473
12.3.1. Ön (İlk) ve Birinci Kademe Arıtım 473
12.3.2. Kimyasal Çöktürme 479
12.3.3. Endüstriyel Atıkların Biyolojik Arıtılabilirliği 490
12.3.4. Türkiye'de Endüstriyel Atıksu Yönetimi 506

13. MÜHENDİSLİK EKONOMİSİNE GİRİŞ VE PROJE SEÇENEKLERİNİN ANALİZİ 515
Prof. Dr. İzzet Öztürk, Dr. Hale Özgün ve Çev. Müh. Hazal Gülhan..... 515
13.1. Temel Kavramlar..... 515
13.2. Nakit Akış Diyagramları 516
13.3. Tekil Ödeme Faktörleri ve Eşdeğerlilik 518
13.3.1. Bugünkü Değer Üzerinden Gelecek Değerin (BDGD) Belirlenmesi 518
13.3.2. Gelecek Değer Üzerinden Bugünkü Değerin (Tekil Ödemeli Bugünkü Değer (TÖBD)) Belirlenmesi..... 519
13.4. Üniform Serilerin Formülleri 519
13.4.1. Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Gelecek Değerin Belirlenmesi (ÜYÖGD)..... 519
13.4.2. Gelecek Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemelerin Belirlenmesi (GDÜYÖ), (Batık Fon Faktörü (BFF))..... 520
13.4.3. Bugünkü Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemelerin Belirlenmesi (BDÜYÖ), (Üniform Serilerde Sermaye Geri Ödeme (Kurtarma) Faktörü)..... 520
13.4.4. Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Bugünkü Değerin (ÜYÖBD) Belirlenmesi: 521
13.5. Proje Seçeneklerinin Karşılaştırılması 523
13.5.1. Bugünkü Değer Analizi ile Karşılaştırma 523
13.5.2. Kapitalize Maliyet (Değer) Metodu ile Karşılaştırma..... 524
13.5.3. Yıllık Eşdeğer Maliyetleri (YEM) Kullanarak Karşılaştırma 525
13.5.4. Başabaş Noktası Analizleri (BBN) 529
EK.1. AAT HİDROLİK TASARIMI PROJE ÖRNEĞİ 535
EK.2. FAİZ TABLOLARI..... 574

KISALTMALAR

AAT : Atiksu arıtma tesisi
ABD : Aika Birleşik Devletleri
AKM : Askıda Katı Madde
AKR : Ardışık Kesikli Reaktör
ASME : American Society of Mechanical Engineers
ATV : German Association for the Water Environment (DWG)
ATY : Atıktan Üretilmiş Yakıt
BBN : Başabaş Noktası
BD : Bugünkü Değer
BDGD : Bugünkü Değer Üzerinden Gelecek Değer
BDÜYÖ : Bugünkü Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemeler
BFF : Batık Fon Faktörü
BOİ : Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
ÇO : Çözünmüş Oksijen
ÇOB : T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı
ÇŞB : T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DAF : Çözünmüş-hava ile yüzdürme
DCS : Dağıtılmış Kontrol Sistemleri
DYAA : Dikey Yüzeyaltı Akışlı
EAAT : Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisi
EN : Eşdeğer Nüfus
EPA : US Environmental Protection Agency
ERP : İşletme Kaynakları Planlaması (Enterprise Resource Planning)
EVAP : Evaporasyon
GDÜYÖ : Gelecek Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemeler
GTHB : TC. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı
HAYR : Havasız Akışkan Yataklı Reaktörler
HÇYR : Havasız Çamur Yataklı Reaktörler
HDA : Hızlı Değişken Akım
HF : Havasız Filtreler
ISO : International Organization for Standardization
İSKİ : İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
KDÇ : Kimyasal Destekli Ön Çökeltim
KKAOK : Kentsel Katı Atıkların Organik Kısmı
KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR : Membran Biyoreaktör
MF : Mikrofiltrasyon
MHR : Membranlı Havasız Reaktör
MTU : Ana Terminal Birimi
NBD : Net Bugünkü Değer
OSİB : TC. Orman ve Su İşleri Bakanlığı
P&ID : Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramları
PB : Palmer-Bowlus
PHR : Perdeli Havasız Reaktör
PLC : Endüstriyel ve Bina Otomasyonunda Kullanılan Programlanabilir Kontrolörler
RTU : Uzak Terminal Birimleri
SKKY : Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
SMP : Çözünmüş mikrobiyal ürünler
SYA : Serbest Yüzey Akışlı
TDA : Tedrici Değişken Akım
TeOİ : Teorik Oksijen İhtiyacı
TKN : Toplam Kjeldahl Azotu
TN : Toplam Azot
TOİ : Toplam Oksijen İhtiyacı

TOK : Toplam Organik Karbon
TÖBD : Tekil Ödemeli Bugünkü Değer
TP : Toplam Fosfat
TPAD : Kademeli Sıcaklıkta İşletilen Anaerobik Çürütme
TUA : Toplam Uçucu Asit Alkalinitesi
UAKM : Uçucu Askıda Katı Madde
UF : Ultrafiltrasyon
UOK : Uçucu Organik Karbon
USBR : US Department of the Interior, Bureau of Reclamation
UYA : Uçucu Yağ Asidi
ÜYÖBD : Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Bugünkü Değer
ÜYÖGD : Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Gelecek Değer
VFD : Değişken Hızlı Sürücüler
YAM : Yüzey Aktif Madde
YEF : Yıllık Eşdeğer Fayda
YEM : Yıllık Eşdeğer Maliyet
YND : Yıllık Net Değer
YYAA : Yatay Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulak Alan

1. ATIKSU MİKTAR VE ÖZELLİKLERİ

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk ve* [2]*Dr. Hacer Timur*

1.1. Atıksu Akımının Karakteristikleri

Atıksu karakteristikleri, debi ve atıksu özellikleri ile ilgilidir. Bu karakteristikler, meskûn bölgede kullanılan su miktarı ile sınaî ve ticari faaliyetlere sıkı sıkıya bağlıdır. Yağışlı havalarda önemli miktarda drenaj (yağış) ve sızıntı suları kanallara girer. Bu durum atık suyun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Drenaj ve sızıntı suları, kanal ağının durumuna, çatlak ve arızalı boru kısımları, tamiri gereken boru bağlantıları, yıkık baca duvarları, kaçak yağmur suyu bağlantıları vb. bulunmasına ve yeraltı su yüzeyinin seviyesine bağlıdır.

Kurulu bir arıtma tesisi varsa, karakteristik değerler, akım ölçümleri ve laboratuvar deneyleri ile belirlenir. Aksi halde su sarfiyatı, nüfus ve endüstri ile ilgili istatistikî bilgilere dayanarak hesap yapılır [1].

1.1.1. Birim Su Sarfiyatları

Su sarfiyatları (tüketimleri) ile kanallarda akan debiler arasında doğrudan ilişki vardır. Zira netice olarak kullanılan su atıksu haline dönüşmektedir. Birim su sarfiyatları genel olarak hayat standardının bir fonksiyonudur. Bu sebeple gelişmiş ülkelerde göreceli olarak daha fazla su tüketilir (Örneğin ABD'de kişi başına günlük su tüketimi >400 L düzeyindedir). Ülkemiz bu bakımdan Avrupa ülkelerine daha yakındır. Tablo 1.1'de, çeşitli su sarfiyatlarının maksimum ve ortalama değerleri verilmiştir. Bu değerler, geçerli oldukları bölgedeki insan sayısı ile çarpılarak kullanılacağı için (örneğin, bir kasap dükkanı için, Q_{ort} = (250~375)x100 L/gün, Q_{maks}= (250~375)x400 L/gün), Tablo 1.2'de meskûn bölgelerdeki nüfus yoğunluklarının ortalama değerleri de ayrıca verilmiştir.

Ticari alanlardan (havaalanı, otomobil servis istasyonu, konferans salonu, otel, motel, ofis, alışveriş merkezi, lokanta, tiyatro vb.) açığa çıkacak atıksu miktarları müşteri, çalışan, kullanıcı, koltuk, yatak vb. birimlere bağlı olarak ifade edilen birim atıksu miktarları üzerinden hesaplanabilir (Metcalf, 2003). Hastane, hapishane, okul, huzurevi vb. kamu tesislerinde oluşacak atıksu miktarları da misafir, yatak, çalışan, öğrenci vb. başına birim değerler üzerinden bulunabilir. Turizm ve dinlence alanlarında oluşacak atıksu miktarları da kalan kişi, müşteri, çalışan vb. başına birim değerlerden hareketle hesaplanabilmektedir [2].

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.
[2] Dr., Kimya Mühendisi

Tablo 1.1. Birim su sarfiyatları [2], [3]

	Maks. q_g (Ağustos ayı su sarfiyatı, L/ N/ gün)	***Ort. q_g (Senelik ortalama su sarfiyatı, L/ N/ gün)***
I. EVSEL SU SARFİYATLARI		
a) Mutschmann-Stimmelmayr, 1967 (Almanya)		
Tuvaletlerinde su olmayan fakir kırsal alanlarda	*70*	*40*
Normal kırsal alanlarda	*100*	*50*
Daha iyi durumda olan kırsal bölgeler ve küçük şehirlerde	*150*	*60*
Yüzde 30'unda banyo tesisatı bulunan şehir bölgelerinde	*150*	*65*
Yüzde 50'sinde banyo tesisatı bulunan şehir bölgelerinde	*180*	*80*
Yeşil sahaları, villa tipi evleri bulunan şehirlerde	*250*	*100*
b) Code of practice, No. 2005 (İngiltere)		
Şehirlerde	*230*	*-*
Kırsal alanda	*150*	*-*
c) İller Bankası Yönetmelikleri	*Nüfus sayısına bağlıdır*	
II. DİĞER SU SARFİYATLARI		
1. Bahçe sulanması için		
(Köy ve kasabalarda, ekseriya her evin 50 ila 100 m^2'lik bir bahçesi vardır. Kapalı iskân sahalarında küçük bahçeler kenar semtlerde bulunur)		
m^2 bahçe alanı başına düşen su sarfiyatı (L/ m^2.gün)	*3,0*	*0,15*
2. Ticaret bölgelerinde sarf edilen su		
(Esnaf ve sanatkârlar)		
(Rakamlar misal olarak verilmiştir. Her özel durum için yerinde tespit yapmak gerekir)		
a) 150-200 nüfusa bir fırıncı düşer,	*450*	*150*
b) 250-375 nüfusa bir kasap düşer,	*400*	*100*
c) 1000-1500 nüfusa bir tatlıcı-pastacı düşer,	*250*	*200*
d) 250-300 nüfus başına bir berber düşer,	*300*	*100*
e) Lokantalar (müşteri başına, L/ N/ gün olarak) su sarfiyatı	*20*	*15*
(Mevcut yerlerin iş ve ticaret bölgelerinde günde 4,5 defa, oturma bölgelerinde günde 1,5 defa, küçük yerlerde günde 0,1-0,3 defa kullanıldığı kabul edilir)		
f) Oteller		
Banyosuz, L/ N/ gün	*100*	*50*
Banyolu, L/ N/ gün	*150*	*100*
(Burada N müşteri manasındadır)		
g) Diğer sanat erbabı		
Normal (mesela dükkanlar gibi) L/ N/ gün olarak	*30*	*25*
Çok kirli işler, L/ N/ gün	*100*	*50*
3. Kırsal bölgelerde sarf edilen su		
Sebze ve meyve bahçelerinde yağmurlama sulaması, L/ m^2/gün	*3*	*0,5*
Büyükbaş hayvan başına günde litre	*80*	*50*
Küçükbaş hayvan başına günde litre	*20*	*10*
4. Genel servis		
a) İdare binaları, L/ N/ gün	*25*	*20*
b) Okullar, öğrenci başına günde litre	*15*	*10*
c) Hastaneler, yatak başına günde litre	*600*	*400*
d) Cadde yıkanması, yıkanan caddelerin m^2'si başına	*1,5*	*0,1*
e) Yangın suyu ihtiyacı, senelik ortalama iletilen toplam su hacminin %0,2-0,5'i kadar		
5. Su kayıpları		
a) Yeni tesislerde: İletilen toplam debinin isale hatlarında %5'inden ve şebekelerde %7'sinden daha az olmalıdır.		
b) Mevcut Tesislerde: Eski tesislerde su kayıplarının, isale hattı ve şebekelerde toplam olarak %10+10=%20'nin altında kalması istenir (Bazı Büyükşehirler hariç bu oran Türkiye'de ~%40 civarındadır).		
6. Özel sarfiyatlar		
a) İstasyon (yolcu başına)	*1*	*0,5*
b) Endüstri, çalışan işçi başına günde litre olarak	*30*	*25*
(Endüstrinin kendi proseslerinde harcanan su ayrıca göz önüne alınmalıdır)		

Tablo 1.2. Meskûn bölgelerde nüfus yoğunlukları [3]

Sınıf	*İskân Şekli*	*Yoğunluk (N/ ha)*
1	*Çok yoğun iskân (yerleşim)*	*500–700*
2	*Yoğun iskân*	*400–600*
3	*Büyük avlu ve bahçeleri bulunan orta yoğunlukta ve kapalı iskân*	*300–400*
4	*Çok dağınık evleri bulunan bölgeler ve kapalı alanlar*	*150–200*
5	*Bahçeli dış mahalleler*	*60–150*
6	*Şehrin kenarı ve kooperatif evleri*	
	Küçük parseller	*30-80*
	Büyük parseller	*10-40*
	Endüstri bölgeleri	*10-40*

Su sarfiyatlarında, saatlik, günlük ve mevsimsel değişimler meydana gelebilir. Maksimum sarfiyatın gerçekleştiği günler genellikle Temmuz ve Ağustos ayları içinde yer alır. Bu aylarda en büyük günlük sarfiyatlar gözlenir. Çalışma günlerinde de tatil günlerine nazaran daha fazla su sarf edilir. Bununla beraber, gün içinde de saatlik sarfiyat değişimleri meydana gelebilir. Bir gün içinde iki pik debi vardır. Birincisi günlük hayatın başladığı sabah saatlerinde, ikincisi, eve dönüş (akşam) saatlerinde olur. Gün içinde minimum sarfiyatlar ise genellikle gece 4 civarlarında oluşur. Mevsimlik üretim yapan endüstriler de mevsimsel sarfiyat değişiklikleri meydana getirebilirler.

Atıksu sarfiyatı genelde içme ve kullanma suyu sarfiyatının %60 ile % 130'u arasında değişmekle birlikte, projelerde genellikle, ikisi birbirine eşit alınır. Ticari ve sınaî faaliyet sırasında kullanılan su miktarı genellikle sabit olduğundan, bunlar, akımın pik değerlerini azaltma eğilimi gösterirler.

Bütün bu faktörlerden başka, birim su sarfiyatının, proje süresi içinde de nüfus artışına paralel olarak değişiklik göstereceği açıktır. Endüstri sarfiyatları dışında kalan birim su sarfiyatlarının, nüfus artış yüzdesinin yaklaşık onda biri kadar arttığı kabul edilebilir.

1.1.2. Atıksu Akımının Zamanla Değişimi

Bir günün çeşitli saatlerinde atıksu debisinin o günün ortalama debisine oranı zamanla değişir. Akım ölçümlerinin mevcut olmaması halinde Bölüm 1.2'de verilen atıksu özellikleri ile birlikte kullanılacak büyüklükler aşağıda verilmiştir.

(1) İller Bankası Kanalizasyon Projeleri Yönetmeliği'ne göre, günün en fazla su sarf edilen bir saatinde debi, o günün ortalama debisinin 2 katıdır. Senenin en çok su sarf edilen gününün ortalama debisi Q_{24} ile gösterilirse, maks Q_{st} = 2 Q_{24} ve gündüz saatlerine mahsus ortalama debi 1,5 Q_{24} olarak hesaplanabilir.

(2) Alman literatüründe sabah 8'den akşam 20'ye kadarki gündüz saatleri ortalaması Q_{18} ile 24 saatin maksimum debisi maks Q_{24}= Q_{14} ile gösterildiğine göre,

$$Q_{18} = \frac{24}{18}\, Q_{24} = 1{,}33\, Q_{24} \tag{1.1}$$

$$Q_{14} = \frac{24}{14}\, Q_{24} = 1{,}72\, Q_{24} \tag{1.2}$$

şeklinde hesaplanır. Gece saatlerine mahsus ortalama ve minimum debiler ise;

$$Q_{37} = \frac{24}{37}\, Q_{24} = 0{,}65\, Q_{24} \tag{1.3}$$

$$Q_{min} \cong \frac{24}{48}\, Q_{24} = 0{,}5\, Q_{24} \tag{1.4}$$

kabul edilir (Şekil 1.1).

Şekil 1.1. 50.000 nüfuslu bir şehirde atıksu akımı ve çökelebilen madde miktarlarının değişimi [4]

(3) Minimum debi, pompa istasyonlarının hesabında ve kanallarda hız kontrolü için gerekmektedir. ABD' de minimum debi, küçük yerlerde ortalamanın % 33'ü orta büyüklükteki yerlerde ise ortalamanın % 50'si kabul edilir.

Minimum debi ve pik debi, kısa bir süre (2 saatten az) devam eden akımı gösterir. Daha uzun süren ekstrem akımlara ise sürekli ve kararlı akımlar adı verilmektedir. Mesela aşırı kurak ve sıcak günlerde kararlı minimum akımlar görülebilir. Yine bir şehirde fuar gibi özel programların düzenlendiği zamanlarda pik debiler oluşabilir.

ABD'de bir gün devam eden pik değerin ortalamaya oranı 2,9 kabul edilmektedir. Bir gün devam eden minimum için bu değer 0,4'e eşittir. Diğer süreler için bu değerler Şekil 1.2'den alınabilir. Şekil 1.2, ABD'de 46 atıksu tasfiye tesisine ait akım kayıtlarından çıkarılmıştır. İncelenen akım kayıtları, 1–8 sene arasında değişen süreleri kapsamaktadır. Böyle eğrileri bulurken mümkün olan en uzun kayıtları hesaba katmak gerekir [2], [3].

Şekil 1.2. Süreli maksimum ve minimum atıksu akımı değerleri

ABD'de ve İSKİ Yönetmeliği'nde, maksimum saatlik debinin, maksimum günlük (q_g) debisine oranı M pik faktörü ile gösterilir ve aşağıdaki bağıntılardan hesaplanır:

$$M = 1 + \frac{14}{4+\sqrt{P}} = \frac{18+\sqrt{P}}{4+\sqrt{P}} \tag{1.5}$$

veya

$$M = \frac{5}{P^{0,167}} \tag{1.6}$$

Burada P, bin olarak nüfus sayısını gösterir (Örneğin 100.000 kişilik nüfus için P=100 alınmalıdır).

1.1.3. Yüzeysel Akış ve Sızma

Yüzeysel akış, binaların kaçak olarak kanallara bağlanmış yağmur suyu borularından ve caddelerdeki baca kapakları gibi yerlerden şebekeye girer. Ek yerlerinden, boruların çatlaklarından ve arızalı bağlantılardan kanallara giren yeraltı suyu akımına da yüzey altı akışı (sızma) denir. Her ikisi de kanalların yaşı, durumu ve uzunluğu ile alakalıdır. ABD'de EPA'ya (Çevre Koruma Ajansı) göre, bu değerlerin müsaade edilebilir miktarları 1394 L/gün.km.cm olup, bu miktar geçilirse, kanalların yenilenmesi öngörülmektedir. Yani bu durumda, kanalları yenilemek, sızıntı suyunu uzaklaştırmak ve arıtmaktan daha ekonomiktir.

1.1.4. Atıksu Miktar ve Debilerinin Hesabı

Atıksu miktarları şehir ve kasabaların durumuna ve içme suyu kaynaklarına bağlı olarak değişmektedir. Kişi başına su ihtiyaçları 100–300 L/N.gün arasında seçilmektedir.

Bir arıtma tesisinin boyutlandırılması için debilerin bilinmesi gerekir. Bir kasaba veya şehrin atıksu arıtma tesisine gelen debi, evsel, sanayii ve sızma debilerinin toplamı olarak bulunabilir.

Evsel debi hesabı için yerleşim merkezinin gelecekteki nüfusu bilinmelidir. Bir bölgenin gelecekteki nüfusunu tahmin etmek için kullanılan hesap yöntemleri;

- Aritmetik Artış,
- Geometrik Artış (sabit veya azalan hızlı),
- İller Bankası,
- Benzer Şehirlerle Mukayese,
- Lojistik Eğri

yöntemleri olarak sayılabilir.

Ülkemizde gelecekteki nüfus tahmininde çoğu kez İller Bankası Yönetmeliği kullanılmaktadır. Bu metotta gelecekteki nüfus N_g;

$$N_g = N_s(1 + p/100)^{(30+t)} \tag{1.7}$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada;

t : Son nüfus yılı ile projenin yapıldığı yıl arasındaki sene farkıdır.
p : Nüfus artış hızı

$$p = (\sqrt[a]{N_s/N_i} - 1)\ 100 \tag{1.8}$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Bu ifadelerde;

N_s : Son nüfus sayım neticesi
N_i : İlk nüfus sayım neticesi
a : İki sayım arasındaki senelerin farkı

Hesap sonucuna göre;

p ≥ 3 ise p= 3; p < 1 ise p= 1;

1 ≤ p ≤3 ise p aynen alınır.

Dolayısıyla İller Bankası yöntemi (sabit) hızlı Geometrik Artış Yöntemidir.

İller Bankası Yöntemlerinde sabit çoğalma hızı esas alındığından ülkemizdeki mevcut nüfus artış trendini doğru yansıtmamaktadır. Bu yüzden son yıllarda bu yöntem yerine azalan hızlı geometrik artış veya lojistik eğri yöntemleri kullanılması ağırlık kazanmıştır. Nüfus tahminleri ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için Kaynak [5]'e başvurabilir.

1.1.4.1.Atıksu Debilerinin Hesabı

Atıksu arıtma tesislerine gelen debilerin hesabında evsel (Q_{ev}), sanayisi (Q_{sanayi}) ve sızma ($Q_{sızma}$) debileri toplamı dikkate alınmalıdır. Yani günlük toplam debi;

$$Q = Q_{ev} + Q_{sanayi} + Q_{sızma} \tag{1.9}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Evsel debi, kişi başına günlük su sarfiyatı nüfusla çarpılarak bulunabilir. Yıllık ortalama kişi başına günlük su ihtiyacı q_{ort} ile gösterilirse yaz aylarındaki su ihtiyacını temsil eden değer (q_{maks}), ortalama değerin 1,5 katı olarak kabul edilmektedir.

Su ihtiyacının %70–90 arasındaki belirli bir oranı kanallara intikal etmektedir. Bu yüzden evsel debi;

$$Q_{ev\,maks} = \alpha\, q_{maks}\, N \tag{1.10}$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada;

$Q_{ev\,maks}$: Yazlık evsel su sarfiyatı, m^3/gün
α : Kanala intikal yüzdesi
q_{maks} : Kişi başına yazlık su ihtiyacı, m^3/N/ gün
N : Kasabanın gelecekteki nüfusu

Buna göre debiler;

$$Q_h = Q_{ev\,maks}/n_1 + Q_{sanayi}/n_2 + Q_{sızma}/24 \tag{1.11}$$

$$Q_{24} = \left(Q_{ev\,maks} + Q_{sanayi} + Q_{sızma}\right)/24 \tag{1.12}$$

$$Q_{maks} = M\, Q_{ev\,maks}/24 + Q_{sanayi}/24 + Q_{sızma}/24 \tag{1.13}$$

$$Q_{min} = Q_{ev\,ort}/n_3 + Q_{sanayi}/n_4 + Q_{sızma}/24 \tag{1.14}$$

bağıntıları ile bulunabilir. Burada;

Q_h : Hesap (tasarım) debisi, m^3/saat
Q_{24} : Ortalama debi, m^3/saat
Q_{maks} : Maksimum debi, m^3/saat

Q_{min} : Minimum debi, m^3/saat
M : Pik debi katsayısı $(maks\ Q_h/Q_{ev\ maks*sa})$
n_1, n_2, n_3, n_4 : Sabitler
n_1 : Gün içindeki salınımları temsil eder ve nüfusa bağlı olarak değişmektedir. n_1 sabitinin değerleri nüfusa bağlı olarak Tablo 1.3'te gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Nüfusa bağlı olarak n_1 değerleri [6]

Nüfus	***<1.000***	***1.000–10.000***	***10.000–100.000***	***100.000–1.000.000***	***>1.000.000***
n_1	*10*	*12*	*14*	*16*	*18-20*

Görüldüğü üzere n_1 sabiti 10–20 arasında bir değerdir. n_1 değerini göstermek üzere, mesela n_1=14 için hesap debisi Q_{14} işaretiyle gösterilmektedir.

n_2 : Sanayi kuruluşunun vardiya sayısı ile alakalıdır. Tek vardiya çalışan tesislerde bu değer 5–6 arasında alınabilir.
n_3 : 37–40 arasında bir değerdir. Bu da mesela n_3= 40 için Q_{40} olarak gösterilmektedir.
n_4 : Üç vardiya çalışan tesislerde n_4= 24 alınabilir. Bir veya iki vardiya çalışan tesislerde minimum debi hesabında sanayisi debisi dikkate alınmaz.

1.1.4.2.Sanayi Debilerinin Tahmini

Sanayiden gelen debinin hesabı için çeşitli usuller vardır:

a. Eşdeğer nüfus hesaplanıp, sanayi debisi evlerden gelen atıksu içinde düşünülebilir.
b. Debinin zamanla değişiminin ölçülmesi suretiyle elde edilebilir.
c. Sanayi bölgelerinde hektar başına debi alınmak suretiyle hesaplanabilir. (Örneğin İSKİ Yönetmeliği'nde 0,5-1 L/s.ha değerleri esas alınmaktadır).

1.1.4.3.Sızma Debisi Tahmini

Sızma debisinin bulunması için de çeşitli yöntemler vardır:

a. Evlerden gelen debinin belli bir yüzdesi olarak kabul edilir. Örneğin ortalama günlük debinin %50-100'ü gibi.
b. Kanalların hizmet ettiği alana bağlı olarak bulunabilir. Yani atıksu toplama havzasının alanından hesaplanabilir. (0,1-0,2 L/s.ha gibi).
c. Kanal uzunluğuna göre bulunabilir. (0,80 L/s.km gibi).
d. Kanal uzunluğuna ve çapına bağlı olarak tahmin edilebilir. (0,5-5 m^3/gün.km.cm gibi, Ortalama bir değer olarak 2,5 alınabilir).

Ayrıca muayene bacalarından atıksu kanallarına giren debi de bu miktara ilave edilmelidir. (örneğin 0,4 m^3/gün/baca sayısı alınabilir).

Yukarıda verilen değerlerin atıksu kanallarının inşa kalitesi, zemin ve yeraltı suyu durumu gibi pek çok faktöre bağlı olduğu dikkate alınmalıdır.

1.1.5. Arıtma Tesislerinin Kademelendirilmesi

Atıksu arıtma tesislerinin planlama, tasarım ve yapımı genellikle 2~5 yıllık bir süreçte tamamlanmaktadır. Tesisin çeşitli bileşenlerinin boyutlandırılmasında söz konusu planlama ve işletmeye alma döneminde geçen sürenin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden atıksu arıtma tesisi tasarımında başlangıç yılı, yapımı tamamlandıktan sonra tesise atıksu verilip işletime başlandığı yıl olarak alınır. Tasarım ve planlama yılı ise tesisin öngörülen tasarım kapasitesine ulaştığı yıl olarak tanımlanır. Tasarım yılının seçimi kolay olmayıp, tesisin hizmet vereceği atıksu havzasındaki nüfus ve toplumun sosyoekonomik gelişme eğilimlerinin dikkatle incelenerek gerçekçi ve mantıklı bir değerlendirme sürecinden geçirilmesini gerektirmektedir. Tesisin tasarım dönemleri veya kademe yılları belirlenirken başlıca aşağıdaki hususlar göz önünde tutulmalıdır:

- Arıtma tesisi birimlerinin hizmet ömürleri
- Tesisin tevsiinin (genişletilme) kolay ya da zor oluşu
- Büyük kapasiteye göre boyutlandırılmış tesis üniteleri veya bileşenlerinin işletmeye açılmayı izleyen ilk dönemdeki verim durumları
- Hizmet alanının gelecekteki nüfusu, ticari ve endüstriyel faaliyetler, göç, turizm ve su temini durumu
- Piyasa faiz oranı, mevcut ve gelecekteki yapım bedelleri ve finansman temin imkanları

Tasarım süresi, arıtma tesislerinin bileşenlerine göre farklılık gösterebilir. Örneğin kanal, toplayıcı, sifon, terfi merkezi vb. yardımcı tesislerin tevsi durumu kolay olamayacağı için tasarım süresi genelde 50 yıl alınır. Arıtma tesisi birimleri, proses ekipmanları, pompalar ile çamur işleme ve uzaklaştırma tesisleri ise aşırı büyük tasarımı önlemek üzere, daha kısa dönemlere göre tasarlanırlar. Böyle durumlarda, sonraki büyütme faaliyetleri dolayısıyla farklı tasarım kademelerindeki tesis birimleri için ihtiyaç duyulacak ek alanın arıtma tesisi yerinde önceden ayrılması sağlanmalıdır. Planlama döneminde öngörülen atıksu debileri ve finansman temin şartları dikkate alınarak tasarım süresi 10, 15 ve 20 yıllık kademelere ayrılır. Proje tasarım süresinde tesis büyütülmesi için önerilen kademe süreleri Tablo 1.4'te verilmiştir. Örneğin debi artış oranı < 1,3 ise 30 yıllık tasarım dönemi, 20+10 yıllık iki döneme ayrılarak tesis üniteleri kademelendirilmelidir.

Tablo 1.4. Arıtma tesisleri ile ilgili tevsi (genişleme) faaliyetleri için önerilen kademe süreleri

Debi Artış Oranı (Tasarım dönemi sonundaki ortalama debi/Tasarım dönemi başındaki (ilk işletme yılı) ortalama debi)	***Kademe Süresi (yıl)***
<1,3	*20*
1,3~1,8	*15*
>1,8	*10*

Problem 1.1

Atıksu debi verilerinin istatistiki analizi:

Bir endüstriyel tesis deşarjında 3 aylık bir dönemde ölçülen haftalık ortalama atıksu debileri aşağıdaki gibidir (Tablo a). Bu verinin istatistiki analizini yaparak bir yıllık bir sürede gözlenmesi muhtemel maksimum haftalık debiyi tahmin ediniz.

Tablo a. *Haftalık Ortalama Atıksu Debileri*

Hafta No	***Ortalama Atıksu Debisi (m^3/hafta)***
1	*2.907*
2	*3.040*
3	*3.729*
4	*3.361*
5	*3.770*
6	*4.081*
7	*4.016*
8	*3.676*
9	*3.812*
10	*3.452*
11	*3.267*
12	*3.180*
13	*3.134*

Çözüm.

1. *Veri sayısı n = 13 < 30 olduğu için sıralanmış örneğin eklenik ihtimal (olasılık) dağılımı üzerinden istatistiki analiz yapılmalıdır. Eklenik ihtimaller,*
   $P(x \leq x_0) = F(x) = m/(n+1)$, (Tablo b)
   Weibull eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada, m küçükten büyüğe doğru sıralanmış akımların sıra no'sunu (en küçük debi için m=1), n ise toplam veri sayısını (13) göstermektedir. Sıralanmış örnek ve ilgili eklenik ihtimal değerleri aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo b. *Debi ve Eklenik İhtimal Değerleri*

Sıra No	*Debi (m^3/hafta)*	*F(x), %*
1	2.907	7,1
2	3.040	14,3
3	3.134	21,4
4	3.180	28,6
5	3.267	35,7
6	3.361	42,9
7	3.452	50,0
8	3.676	57,1
9	3.729	64,3
10	3.770	71,4
11	3.812	78,6
12	4.016	85,7
13	4.081	92,9

Eklenik ihtimallerin Normal dağılım grafiği (F (x) – x) şekilde verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere haftalık ortalama endüstriyel atıksu akımları normal dağılıma uymaktadır. Ancak günlük akımlarla çalışılsa idi muhtemelen Log-normal veya Gamma dağılımları gibi pozitif çarpıklığı olan bir dağılım uygun olurdu.

2. *Haftalık ortalama akımların istatistiki özellikler:*

Tablo c. *Temel İstatistiki Parametreler için Hesaplamalar*

Debi (m^3/hafta)	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$ 10^4	$(x_i - \bar{x})^3$ 10^6	$(x_i - \bar{x})^4$ 10^9
2907	-587	34,46	-202,28	118,74
3.040	-455	20,66	-93,90	42,68
3.134	-360	12,95	-46,62	16,78
3.180	-315	9,89	-31,11	9,79
3.267	-227	5,17	-11,76	2,67
3.361	-133	1,76	-2,34	0,31
3.452	-42	0,18	-0,07	0,00
3.676	181	3,29	5,97	1,08
3.729	234	5,49	12,88	3,02
3.770	276	7,62	21,04	5,81
3.812	318	10,09	32,06	10,19
4.016	522	27,26	142,31	74,30
4.081	586	34,40	201,73	118,31
		173,23	27,9	403,67

Verilerin temel istatistiki parametreler aşağıdaki gibidir:

$$Ortalama: \bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} = 3494\, m^3/hafta$$

$$Medyan: X_{0,5} = 3452\, m^3/hafta$$

$$Mod: X_{mod} = 3 * x_{0,50} - 2 * \bar{X} = 3368\, m^3/hafta$$

$$Standart\ sapma: S_x = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}\right]^2 = 380\, m^3/hafta$$

$Değişim\ katsayısı: CVX = SX / \bar{X} = 0{,}109\ (\%10{,}9)$

$$Çarpıklık\ katsayısı: CSX = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3/(n-1)}{S_x{}^3} = 0{,}0424$$

$Kurtosis\ katsayısı: k_x = 1{,}61 < 3$

3. *Yıllık maksimum muhtemel haftalık ortalama debi.*

$$F(x) = \frac{m}{n+1} = \frac{52}{52+1} = 0{,}981$$

Şekil a. *Normal Dağılım Olasılık Grafiği*

Şekilden bu ihtimale karşı gelen akım,

$X_{0,981}$ *= 3793 m³/hafta bulunur.*

1.2. Atıksu Özellikleri

Atıksularda bulunan başlıca organik bileşikler proteinler, karbonhidratlar, yağlar, petrol artıkları ve üredir. Bunların yanında deterjanlar (sürfaktanlar), fenoller ve zirai ilaçlar (pestisitler) gibi çeşitli sentetik organik maddeler de atıksuların bünyesinde yer almaktadır. Orta kirlilikte bir atıksuda, askıda katı maddelerin yaklaşık %75'i ve filtre edilebilen katı maddelerin yaklaşık %40'ı organik karakterdedir (Şekil 1.3).

Şekil 1.3. Atıksularda mevcut katı maddelerin sınıflandırılması

1.2.1. Atıksu Karakterizasyonunda Başlıca Parametreler

1.2.1.1.Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ)

Atıksular organik maddeler içerdiğinden, bunların konsantrasyonları, yani 1 L sudaki miktarları, kirlilik derecesinin ölçüsü olarak kabul edilir. Fakat atıksuların bileşimleri çok değişiktir ve içindeki maddeleri bir formülle ifade etmek mümkün değildir. Ayrıca bu maddeler

arıtma tesisinde bozunmaya uğradıklarından, bu etkinin de dikkate alınması gerekir. Bu yüzden bu maddeleri konsantrasyonları ile ifade etme yoluna gidilmiştir.

Organik maddenin ölçüsü olarak, biyokimyasal oksidasyon (karbonlu maddelerin oksitlenmesi) sırasında harcanan oksijen miktarı esas alınabilir ve bu değer de BOİ olarak adlandırılır. Biyokimyasal oksidasyon, su içinde bir yanma olayı olup, bu esnada suda çözünmüş (erimiş) oksijen kullanılır. Ne kadar fazla oksijen sarf edilirse, sudaki organik madde miktarı da o kadar fazla demektir. Organik madde ihtiva eden suların oksijen ihtiyacı BOİ, karbonlu maddelerin, tamamen CO_2 'ye dönüşmesine kadar artar. Teorik olarak sonsuz, pratik olarak yaklaşık 10 gün kadar bir müddet sonunda, bütün karbonlu maddeler ayrışır. Bu esnada sarf edilen oksijene, birinci kademe nihai biyokimyasal oksijen ihtiyacı denir ve $BOİ_u$ ile gösterilir. Evsel atıksular için $BOİ_5$ ile $BOİ_u$ arasında

$$BOİ_5/BOİ_u \approx 0{,}68 \tag{1.15}$$

bağıntısı vardır.

1.2.1.2.Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

Kimyasal olarak oksitlenebilen organik maddelerin oksijen ihtiyacı KOİ ile ifade edilir. KOİ asit ortamda kuvvetli bir kimyasal oksitleyici (potasyum dikromat gibi) vasıtasıyla ölçülür. Kimyasal olarak oksitlenebilecek bileşikler, biyolojik olarak oksitlenebileceklerden daha fazla olduğundan, kimyasal oksijen ihtiyacı biyokimyasal oksijen ihtiyacından daha büyüktür. Arıtılmamış atıksular için $BOİ_5$/KOİ = 0,4-0,8 (ortalama 0,65) alınabilir.

KOİ Bileşenleri

Yapılan çalışmalar sonucunda, biyolojik arıtma sistemlerinde substratın biyolojik ayrışması sonucunda, zor ayrışan (inert) ürünlerin oluştuğu saptanmış ve biyolojik arıtma tesislerinde, atıksudaki organik maddenin biyolojik ayrışmasının farklı mekanizma ve hızlarda meydana geldiği deneysel olarak gösterilmiştir.

Evsel atıksulardan biyolojik nütrient gideriminde, atıksudaki organik karbon-azot-fosfor arasındaki denge çok önemlidir. Biyolojik azot- fosfor gideriminde, arıtılmış atıksudaki kalan biyolojik olarak ayrışabilir organik madde miktarı önemlidir.

Kuvvetli atıksuların arıtımında gerek ham atıksuda bulunan gerekse biyolojik arıtım sırasında oluşan ve konvansiyonel arıtma yöntemleri ile arıtımı mümkün olmayan inert organik maddeler, deşarj standartlarına ulaşılmasını engelleyebilmektedir. Dolayısı ile biyolojik arıtma tesislerinin değerlendirilmesinde KOİ'nin bileşenlerinin belirlenmesi gerekir. KOİ'nin bileşenlerine ayrılması inert ve biyolojik olarak parçalanabilen KOİ'nin belirlenmesiyle olur. Biyolojik olarak parçalanan KOİ'nin de kolay parçalanan ve zor parçalanan olmak üzere bileşenleri belirlenmelidir. İnert KOİ'de tekrar çözünmüş inert ve partikül inert olmak üzere bileşenlere ayrılır.

Giriş Akımının KOİ Bileşenleri

Giriş akımındaki çözünmüş inert KOİ, S_{iO}, reaktörde biyolojik ayrışmayı etkilemeden aynen çıkar. Hâlbuki partikül haldeki inert KOİ, X_{iO}, sistemde tutularak biyolojik çamurda birikir ve çamurla birlikte sistemden atılır. Giriş akımındaki KOİ'nin bileşenleri Şekil 1.4'te verilmiştir.

Şekil 1.4. Giriş akımı KOİ bileşenleri

Evsel ve bazı endüstriyel atıksular için çözünmüş ve partikül inert KOİ değerleri Tablo 1.5'te verilmiştir [7].

Giriş akımında toplam atıksuda ölçülen organik madde miktarı, çözünmüş (kolay ayrışan, S_{SO} +yavaş ayrışan, S_{HO} + çözünmüş inert, S_{IO}) ve partiküller (yavaş ayrışan, X_{SO} + partikül inert, X_{IO}) bileşenlerinin tamamını yansıtmaktadır.

$$C_{TO} = (S_{SO} + S_{HO} + S_{IO}) + (X_{SO} + X_{IO}) \tag{1.16}$$

Süzülmüş atıksuda ise sadece çözünmüş bileşenler dikkate alınmalıdır.

$$S_{TO} = S_{SO} + S_{HO} + S_{IO} \tag{1.17}$$

Tablo 1.5. Çözünmüş inert KOİ literatür değerleri [7]

Atıksu	*S_{TO} (mg KOİ/L)*	*S_{IO} (mg KOİ/l)*
Evsel	*150*	*8*
	164	*13*
	250	*15*
Belediye (Evsel-Deri)	*190*	*15*
Deri	*1500*	*323*
	1075	*262*
	1870	*464*
Dokunmuş kumaş	*1176*	*90*
Örgü fabrikası	*800*	*88*
Örgü fabrikası	*535*	*117*
Pamuklu ve sentetik	*1000*	*190*
Örgü fabrikası (son işlem)	*686*	*150*
Süt entegre	*480*	*-*
Yoğurt ve tereyağı	*1190*	*-*
Kâğıt	*3340*	*137*
	560	*160*
Et	*1990*	*110*
Antibiyotik	*9330*	*2520*
Peynir altı atıksuyu		
Havasız giriş	*60000*	*-*
Havalı giriş	*1020*	*256*
Sitrik asit üretimi atıksuyu		
Havasız giriş	*29300*	*1870*
Havalı giriş	*2025*	*804*
Havasız giriş	*28100*	*1600*
Havalı giriş	*4055*	*1900*

Çıkış Akımının KOİ Bileşenleri

Havalandırma havuzlarındaki aktif çamur sıvısında ve dolayısıyla arıtma tesisi çıkış suyundaki toplam ve çözünmüş KOİ bileşenleri Şekil 1.5'te verilmiştir.

Şekil 1.5. Aktif çamur tesisi çıkışındaki KOİ bileşenleri

Şekil 1.5'te de görüldüğü gibi arıtılmış su çıkışında atıksudan gelen ve biyolojik olarak ayrışamayan partikül inert KOİ, X_{IO}, çözünmüş inert KOİ, S_{IO}, ve zor ayrışan KOİ ile X_{SO}'ın parçalanmayan bölümü olmak üzere üç farklı yapıda ve biyolojik olarak ayrışamayan inert KOİ bulunur. Bunların yanı sıra biyolojik olarak ayrışabilen organik maddeler de arıtım sırasında inert yapıda ürünlere dönüşebilir. Bunun sonucunda arıtılmış su çıkışı, arıtılmamış sudan daha fazla çözünmüş inert KOİ içerebilir.

Buradaki mikrobiyal inert KOİ (S_P) bileşeni başlıca atıksu tipi, toplam çözünmüş KOİ (S_O) ve çamur yaşının bir fonksiyonu olup (Şekil 1.6).

Şekil 1.6. Toplam çözünmüş inert KOİ (S_R)'nin çamur yaşı ile değişimi (şematik)

Zor ayrışan organik maddenin hidroliz kademesinden geçerek kolay ayrışan substrata dönüşmesi ve bu formunun çoğalmada kullanılması aktif çamur modellerinde benimsenen bir yaklaşımdır. Çözünmüş ya da partikül formda olan bazı yüksek molekül ağırlıklı organik maddeler yavaş ayrışan madde kapsamında ele alınabilir. Bu tanımdan hareketle yavaş ayrışan (X_{SO}), çözünmüş S_{HO} ve partiküller X_{SO} olarak gösterilebilir.

Çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP);

- Mikroorganizmaların çevreye uyum sağlarken ortama saldıkları enzim türü bazı organik maddeler,
- Substratın ayrışması ve mikroorganizmaların metabolik süreçleri sırasında meydana gelen organik maddeler,

- İçsel solunum sonucunda (hücre çözünmesi ve ölümü) oluşan organik maddeler, olarak sistemde bulunurlar.

Biyolojik arıtma sistemlerinde oluşan SMP'nin belirlenmesi için glikoz ile havalı ve havasız biyolojik arıtma tesislerinde yürütülen deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 1.6'da verilmiştir [1].

Tablo 1.6'da görüldüğü gibi fermantasyon endüstrisi atıklarıyla glikoz ile karşılaştırmalı olarak yapılan çalışmalarda, havalı proseste havasız prosese kıyasla 2-3 kat fazla SMP oluşmuştur. Ayrıca atıksu giriş konsantrasyonu, S_o, arttıkça her iki proseste de SMP/S_o oranı azalmıştır.

Tablo 1.6. Havalı ve havasız arıtım şartlarında glikoz ile yapılan çalışmalar

Proses	*S_o (mg KOİ/L)*	*SMP (mg KOİ/L)*	*SMP/S_o*
Aerobik	*405*	*31*	*0,077*
	1470	*65*	*0,044*
	2560	*118*	*0,046*
	3130	*132*	*0,042*
	3625	*148*	*0,041*
	3850	*157*	*0,041*
	4560	*186*	*0,041*
Anaerobik	*2135*	*34*	*0,016*
	2600	*42*	*0,016*
	3250	*48*	*0,015*
	4105	*59*	*0,015*
	5640	*80*	*0,013*

Biyolojik Olarak Giderilebilen (Ayrışabilir) KOİ Hesabı

Ham veya arıtılmış atıksulardaki biyolojik olarak giderilebilen KOİ iki farklı yolla belirlenebilir:

(a) İnert KOİ'den Hareketle Hesap

Bu yöntem, inert KOİ'nin önceden deneysel olarak tayin edildiği durumlar için uygulanır. Buna göre, biyolojik olarak giderilebilen KOİ ($KO\dot{I}_{bp}$), toplam KOİ ile inert KOİ farkına eşittir.

$$KO\dot{I}_{bp} = KO\dot{I}_{top} - KO\dot{I}_{inert} \tag{1.18}$$

(b) BOİ$_5$'ten Hareketle Hesap

İkinci yöntemle, biyolojik olarak giderilebilen KOİ, BOİ$_5$'in bir fonksiyonu olarak aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanır [2]:

$$KO\dot{I}_{bp} = [(BO\dot{I}_u/BO\dot{I}_5)/(1{,}0 - 1{,}42\, f_d\, Y_H)]\, BO\dot{I}_5 = k\, BO\dot{I}_5 \tag{1.19}$$

Burada;

$BO\dot{I}_u/BO\dot{I}_5$: Atık suyun nihai BOİ$_U$/BOİ$_5$ oranı (genelde ~1,5)
f_d : ölü hücre kalıntısı (g/g)
Y_H : biokütleye dönüşüm oranı (g $_{UKM}$/g KOİ$_{gid}$)

dır. Pratikte f_d= 0,10 – 0,20 ve Y_H = 0,30 – 0,40 aralığında değiştiği için k faktörü 1,6 – 1,7 (ort. 1,65) alınabilir. Dolaysıyla evsel nitelikli atıksulardaki biyolojik olarak giderilebilen KOİ,

$$KO\dot{I}_{bp} = 1{,}65 * BO\dot{I}_5 = 1{,}1 * BO\dot{I}_u \tag{1.20}$$

olarak bulunur.

1.2.1.3.Toplam Organik Karbon (TOK)

Özellikle çok küçük organik madde konsantrasyonları için uygun bir parametredir. Bu parametre, bilinen konsantrasyonlarda bir numuneyi yüksek sıcaklıkta bir fırına enjekte ederek saptanmaktadır. $BOİ_5$/TOK= 1-1,6 alınabilir.

1.2.1.4.Teorik Oksijen İhtiyacı (TeOİ)

Atıksularda bulunan karbonhidratlar, yağlar, proteinler ve bunların ayrışma ürünleri genel olarak karbon, hidrojen, oksijen ve azottan meydana gelir. Numunenin kimyasal formülü biliniyorsa, içindeki karbonun oksitlenmesi için gerekli oksijen miktarı bulunabilir. Bu değer KOİ ve BOİ'den daha büyüktür. Çünkü KOİ'de bile, kimyasal olarak oksitlenmeyen bir miktar karbonlu madde daima bulunur. Şekil 1.7'de organik madde konsantrasyonunu gösteren parametrelerin birbirleriyle karşılaştırılması verilmiştir.

1.2.1.5.Toplam Oksijen İhtiyacı (TOİ)

TOİ parametresi ise diğer parametrelerin bulunmasından daha sonraki yıllarda geliştirilmiştir. TOİ deneyi, numuneyi platinle katalizlenen bir yanma odasında kararlı son ürünlere çevirmeyi ve bu esnada sarf edilen oksijen miktarını bulmayı hedef alır.

Şekil 1.7. Organik madde konsantrasyonunu gösteren parametrelerin birbirleriyle karşılaştırılması

1.2.1.6.Azot-Fosfor

Azot ve fosfor elementleri, mikroorganizmaların büyümesi için çok gereklidir. Bunlara makro besi elementleri (nütrient) denir. Azot, proteinlerin sentezi için temel yapı taşı olduğundan, atıksuların biyolojik yollarla tasfiyesinde azot konsantrasyonunu bilmeye ihtiyaç vardır. Suyun azot miktarı az ise, arıtma için sisteme dışarıdan azot ilavesi gerekebilir. Aksine, yüzeysel sulara verilen atıksu deşarjları sebebiyle oluşan alg ve yosunlarının kontrolü istenirse, alıcı ortamlara verilmeden önce, azotun uzaklaştırılmasına veya miktarının azaltılmasına ihtiyaç vardır.

Genellikle atıksularda azot, esas itibariyle proteinli maddelere ve üreye bağlı olarak bulunur. Bu maddelerin ayrışması ile azot, amonyağa dönüşür. Atık suyun tazelik derecesi, amonyak miktarı ile ölçülür.

Atıksularda azot pH'a göre, ya amonyum iyonu (NH_4^+) ya da amonyak (NH_3) şeklinde bulunur:

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

pH ≥ 7 ise denge sola doğru bozulur, pH ≤ 7 ise amonyum iyonları ortama hâkim olur. Aerobik ortamda bakteri faaliyeti sonucu amonyak oksitlenerek nitrit ve nitrat haline gelir. Atıksularda nitrit azotu önemsizdir. Zira nitrit kararsız olup kolaylıkla nitrata dönüşür.

Konsantrasyonu, atıksularda 1 mg/L'yi nadiren geçer. Nitratlar ise azotun en ileri derecede oksitlenmiş halleridir. Atıksularda 0-20 mg N /L konsantrasyonlarında bulunabilir.

Alg ve diğer mikroorganizmaların çoğalması bakımından fosfor da önemlidir. Sularda fosfor fosfat olarak bulunur. Evsel atıksular genellikle fosfor bileşiklerince zengindir. Son yıllarda deterjan yapımında, katkı maddesi olarak fosfat ve polifosfat bileşikleri, büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Sentetik deterjan tüketiminin artışı ile birlikte yüzeysel sulara fosfor deşarjı da artış göstermiştir. Evsel atıksularda genellikle 4-15 mg/L civarında fosfor bulunur.

1.2.2. Evsel Atıksuların Tipik Özellikleri

Evsel atıksular askıda, koloidal ve çözünmüş halde organik ve inorganik maddeler içerir. İklimsel şartlar, insanların yaşam standartları ve kültürel alışkanlıklar atıksu özelliğini önemli ölçüde etkiler. Şehir kanalizasyon şebekesine endüstriyel atıksuların kabulü, mevcut evsel atıksu özelliklerini büyük oranda değiştirir. Konsantrasyonlar kişi başına günlük su kullanımı değerlerine bağlı olarak da değişir. Her ne kadar suya deşarj edilen atık miktarı toplumların sosyoekonomik ve kültürel özelliklerine göre farklılıklar gösterse de, bu fark çok yüksek değildir. Dolayısıyla atıksu özellikleri sadece şehirden şehre değil, ele alınan her bir yerleşim birimi için mevsimsel hatta saatlik değişkenlik gösterir.

Tablo 1.7'de ham, yani hiç arıtılmamış ve bir işleme tabi tutulmamış tipik evsel atıksu özellikleri verilmektedir [8]. Tablodan da görüleceği gibi, atıklar çok büyük oranda karbon, azot, fosfor gibi organik besinlerden ve yüksek konsantrasyonda mikroorganizmalardan oluşmaktadır. Bunlar hemen bozunmaya yatkın olup, kanallardan akarken bile biyolojik bozunmaları devam eder. Böylece zaman içinde atık suyun bazı özellikleri de değişmektedir. Tablodaki bütün değerler, projelendirmede kolay kullanılmaları ve farklı toplumlar için kolay kıyaslanmaları bakımından g/kişi.gün biriminde verilmiştir. Toplumlar arasında, özellikle de gelişmekte olan ve gelişmiş toplumlar arasında su tüketimi çok farklı olabildiğinden, mg/L olarak verilen değerler bazen yanlış algılanma durumlarına yol açabilir.

Atıksudaki kirleticilerin konsantrasyonlarına bağlı olarak atıksuyu, zayıf, orta ve kuvvetli olarak sınıflandırmak mümkündür (Tablo 1.8) [2]. Kirleticiler ve konsantrasyonları, günün saatine, haftanın gününe, yılın ayına ve diğer yerel şartlara bağlı olarak değişim gösterdiğinden tablodaki veriler yalnızca yol gösterici değerler olup tasarımda o yere ait gerçek veriler esas alınmalıdır.

Kanalizasyon sisteminin etkili çalışması durumunda, BOİ değeri genellikle ortalama 54 g/kişi∗gün civarındadır. Gelişmekte olan bazı bölgelerde üretilen atık suyun tamamı kanalizasyon sistemine dâhil edilmediğinden, BOİ değeri 30-40 g/kişi∗gün seviyesinde olabilir. Eğer kanalizasyonda birleşik sistem kullanılıyor ise, BOİ değeri %40 daha yüksek, yani 77 g/kişi.gün mertebesinde olur. Ofislerde, okullarda ve diğer yarı zamanlı kullanılan mekânlarda BOİ değeri 54 g/kişi.gün olan normal değerin yarısı, hatta daha da azı olabilir. Restoranlarda ve kafeteryalarda ise yapılan her yemek servisinin BOİ' ye etkisi 54 g/kişi.gün değerinin dörtte biri olarak kabul edilir. Gelişmiş ülkelerde ort. $BOİ_5$ yükü ~60 gr/N.gün alınmaktadır.

Türkiye'de evsel atıksular için önerilen birim (kişi başına) debi ve kirlilik yükleri için Kaynak [9]'a başvurabilir.

Tablo 1.1. Evsel atıksu özellikleri [8]

Kirletici Parametreler	*Atıklarda bulunan değeri (g/kişi.gün)*
$BOİ_5$	*45-54*
KOİ	*1,6-1,9∗$BOİ_5$*
Toplam organik karbon	*0,6-1,0∗$BOİ_5$*
Toplam katı maddeler	*170-220*
Askıda katı maddeler	*70-145*
Kum (inorganik, 0,2 mm ve yukarısı)	*5-15*
Madeni yağ	*10-30*
Alkalinite (kalsiyum karbonat olarak, $CaCO_3$)	*20-30*
Klorür	*4-8*
Toplam azot	*6-12*
Organik azot	*~0,4∗toplam N*
Serbest amonyak	*~0,6∗toplam N*
Nitrit azotu	*-*
Nitrat azotu	*~0,0-0,5∗toplam N*
Toplam fosfor	*0,6-4,5*
Organik fosfor	*~0,3∗toplam P*
İnorganik (ortho-polifosfatlar)	*~0,7∗toplam P*
Potasyum (K_2O olarak)	*2,0-6,0*
Askıda bulunan mikroorganizmalar (100 ml atıksu içinde)	
Toplam bakteri	*10^9-10^{10}*
Koliform	*10^9-10^{10}*
Faecal Streptococci	*10^5-10^6*
Salmonella typhosa	*10^1-10^4*
Protozoa kistleri	*10^3 miktarına kadar*
Helminth yumurtaları	*10^3 miktarına kadar*
Virüsler (plak oluşturan birimler)	*10^2-10^4*

Tablo 1.2. Ham evsel atık suyun tipik özellikleri [2]

Kirletici Parametreler	*Birim*	*Konsantrasyon*		
		Zayıf	*Orta*	*Kuvvetli*
Toplam katı (TS)	*mg/L*	*350*	*720*	*1200*
Toplam çözünmüş Katı (TDS)	*mg/L*	*250*	*500*	*850*
Sabit	*mg/L*	*145*	*300*	*525*
Uçucu	*mg/L*	*105*	*200*	*325*
Askıda Katı (SS)	*mg/L*	*100*	*220*	*350*
Sabit	*mg/L*	*20*	*55*	*75*
Uçucu	*mg/L*	*80*	*165*	*275*
Çökebilen Katılar	*mg/L*	*5*	*10*	*20*
$BOİ_5$ (20°C)	*mg/L*	*110*	*220*	*400*
Toplam Organik Karbon (TOK)	*mg/L*	*80*	*160*	*290*
KOİ	*mg/L*	*250*	*500*	*1000*
Azot (Toplam N olarak)	*mg/L*	*20*	*40*	*85*
Organik azot	*mg/L*	*8*	*15*	*35*
Serbest amonyum azotu	*mg/L*	*12*	*25*	*50*
Nitrit azotu	*mg/L*	*0*	*0*	*0*
Nitrat azotu	*mg/L*	*0*	*0*	*0*
Fosfor (Toplam Fosfor olarak)	*mg/L*	*4*	*8*	*15*
Organik	*mg/L*	*1*	*3*	*5*
İnorganik	*mg/L*	*3*	*5*	*10*
Klorürler	*mg/L*	*30*	*50*	*100*
Sülfat	*mg/L*	*20*	*30*	*50*
Alkalinite ($CaCO_3$ olarak)	*mg/L*	*50*	*100*	*200*
Yağ-Gres	*mg/L*	*50*	*100*	*150*
Toplam Koliform	*no/100 mL*	*10^6-10^7*	*10^7-10^8*	*10^7-10^9*
Uçucu organik bileşikler (VOCs)	*µg/L*	*<100*	*100-400*	*>400*

1.2.3. Endüstriyel Atıksular

Endüstriyel atıksuların özellikleri, endüstriden endüstriye oldukça farklılıklar göstermektedir. Aynı daldaki endüstrilerde bile, kullanılan hammaddeler ve uygulanan proseslerin farklılığı, diğer birçok faktörle birlikte çıkan atık suyun yapısında farklılıklar oluşturmaktadır. Tablo 1.9'de bir takım tipik değerler verilmiş olsa da, bu konuda genelleme yapmak zordur [8].

Endüstriyel atıksularla ilgili olarak burada belirtilmesi gereken en önemli özellik, hem debi hem de içeriğinde geni ş çapta dalgalanmaların olduğudur. Bu sebeple, bu durumları tarif etmek ve belli değerlere ulaşmak için en iyi yol deneysel verilerin istatiksel analizi yoluyla elde edilen sonuçlardan faydalanmaktır.

Örneğin, atıksu içindeki herhangi bir bileşenin konsantrasyonu (fenol, BOİ vs.) veya atık suyun debisi, ilgili deneysel verilerin eklenik ihtimal (frekans) dağılım analizi yoluyla, ortalama, medyan, %90 ~ 95'lik değerler itibariyle kolayca belirlenebilir.

1.2.3.1.Kirleticilerin yapıları ve tipik değerleri

Yiyecek endüstrisi, indirgendikleri zaman nehirlerdeki çözünmüş oksijen miktarını düşüren organikleri daha çok içerir ve bu da balıkları ve sudaki diğer hayatı olumsuz etkiler. Akarsularda koku ve anaerobik ortam oluşabilir. Bazı besin endüstrileri sadece mevsimsel olarak çalışır ve genellikle katı atıklar üretirler.

İçecek endüstrisi atıkları, yiyecek endüstrisi ve evsel atıklara benzemekle birlikte çok yüksek BOİ değerleri içerebilir. Yemek ve içecek endüstrisi atıkları sulama suyu amacıyla kontrollü olarak kullanılabilir. Atıksuda katı madde miktarı ve renkte problem olabilir. Endüstriyel atıksuların biyolojik arıtımı sırasında dışardan besi maddesi ilavesi gerekebilir.

Tekstil endüstrisindeki ana problemler boya bölümünden renk, işleme esnasında NaOH'dan kaynaklanan yüksek pH ve debide ani oynamalar görülmektedir. Makine yağları, yüksek BOİ, sülfitler ve Zn sektör çeşidine göre diğer kirletici parametrelerdir.

Kimya endüstrisi atıksuları ise yağ emisyonları, sülfit ve fenoller, makine yağları, katılar, yüksek pH, fosfatlar ve indirgenemeyen organikler içerebilirler. Tipik etkileri ise tat ve koku problemleri ile zehirlilik olabilmektedir. Termik santraller termal kirlenmeye yol açabilir. Metal üretiminden kaynaklanan atıksuda Cr, Cd, CN^-, Zn metal kirlilikleri görülebilir. Bazı metaller ve sentetik organikler besi zincirinde birikebilirler. Tabakhanelerden kaynaklanan atıksuların tipik yapıları kıl, katı madde, çamur, BOİ, azot, Cr, Sülfit kirliliği, yüksek pH ve kokudur.

Çeşitli atıksular için tipik KOİ, $BOİ_5$, KOİ/$BOİ_5$ değerleri Tablo 1.9 ve Tablo 1.10'da verilmiştir.

Tablo 1.9. Değişik atıksulardaki KOİ, $BOİ_5$ ve $BOİ_5$/KOİ oranları [8]

Atıksu cinsi	*KOİ (mg/L)*	*BOİ (mg/L)*	*$BOİ_5$/KOİ*
Mezbahane	*3.500*	*2.000*	*0,57*
İçki endüstrisi	*60.000*	*30.000*	*0,5*
Süt endüstrisi	*1.800*	*900*	*0,5*
Lastik endüstrisi	*5.000*	*3.300*	*0,66*
Deri endüstrisi	*13.000*	*1.270*	*0,1*
Tekstil endüstrisi			
Arıtılmamış	*1.360*	*660*	*0,48*
Biyolojik arıtılmış	*116*	*5*	*0,04*
Un endüstrisi			
Arıtılmamış	*620*	*226*	*0,36*
Biyolojik arıtılmış	*250*	*30*	*0,12*

Tablo 1.10. Evsel atıksulardaki temel kirletici parametreler arasındaki tipik oranlar [10]

Oran	*Düşük*	*Tipik*	*Yüksek*
KOİ/BOİ	*1,5-2,0*	*2,0-2,5*	*2,5-3,5*
KOİ/TN	*6-8*	*8-12*	*12-16*
KOİ/TP	*20-35*	*35-45*	*45-60*
BOİ/TN	*3-4*	*4-6*	*6-8*
BOİ/TP	*10-15*	*15-20*	*20-30*
KOİ/UAKM	*1,2-1,4*	*1,4-1,6*	*1,6-2,0*
UAKM/AKM	*0,4-0,6*	*0,6-0,8*	*0,8-0,9*
KOİ/TOK	*2-2,5*	*2,5-3*	*3-3,5*

1.2.4. Eşdeğer Nüfus

Atıksu debi ve kirlilik yükleri bazı durumlarda eşdeğer nüfus (EN) olarak belirtilir. Eşdeğer nüfus, birim atıksu debisi veya BOİ'ye bağlı olarak ifade edilebilir. Dünya genelinde yaygın biçimde aşağıdaki iki tanım kullanılır:

1. Eşdeğer nüfus (EN) = 60 g $BOİ_5$/gün

2. Eşdeğer nüfus (EN) = 0,2 m^3/gün

Bu iki tanımda ülkeden ülkeye değişmeyen sabit büyüklükler esas alınır. Kanalizasyon şebekesine bağlı bir yerde yaşayan bireylerin kirlilik yükleri önemli ölçüde değişim gösterebilir (Tablo 1.11). Söz konusu farklılıklar oturulan evin durumu ve konumu, kişilerin sosyoekonomik ve ekolojik hayat tarzı ile evlerde kullanılan alet/sistemler (örneğin; mutfak öğütücüleri) vb. etkenlere bağlıdır. Eşdeğer nüfus ve kişi başına kirlilik yükü kavramlarının yanlış anlaşılmaksızın dikkatli bir biçimde kullanılmaları gerekir. EN ve birim kirlilik yükü atıksu arıtma tesislerine gelen ortalama kirlilik yükünün ifade edilmesi bakımından pratik kolaylık sağlar. Türkiye şartlarında kullanılabilecek birim debi ve kirlilik yükleri için Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'nde önerilen değerler kullanılabilir. Çeşitli ülkelerdeki kişi başına yıllık kirlilik yükleri Tablo 1.12'de verilmiştir.

Tablo 1.11. Kişi başı kirlilik yükü değişimleri [10]

Parametre	*Yük*
BOİ (g/kişi.gün)	*15-80*
KOİ (g/kişi.gün)	*25-200*
N (g/kişi.gün)	*2-15*
P (g kişi.gün)	*1-3*
Atıksu (m^3/kişi.gün)	*0,05-0,40*

1.2.5. Debi ve kirlilik yüklerinin geleceğe dönük tahmini

Atıksu arıtma tesislerinin yeniden tasarımı veya büyütülmesi çalışmalarında gelecek 10~30 yıllık nüfus, debi ve kirlilik yükü tahminlerine gerek duyulur. Daha önceleri (1950-60'lı yıllar) dünyanın çoğu ülkesinde özgül atıksu debilerindeki artış nispeten kararlı iken, özellikle 1970'li yıllarda ortaya çıkan teknolojik gelişmeler dolayısıyla atıksu debileri kararlı (evsel) veya azalan (endüstriyel) değerler almaktadır. Su ve atıksu tarifelerinin debi ve kirlilik yüküne bağlı olarak uygulanması, özellikle sanayi işletmelerini kirlilik önleme ve su kullanımını azaltmaya zorlamıştır. Kanalizasyon şebekelerinin iyileştirilmesi de özellikle sızıntı suyu debilerinin önemli oranda azalmasını sağlamıştır. Debi ve kirlilik yükü tahminlerinde, imar planlarında öngörülen nüfus ve sanayi üretimi artışları dikkate alınır. Atıksu arıtma tesisi projelerinde mevcut ile 10, 20 ve 30 yıl sonraki nüfus, su/atıksu debileri ve kirlilik yükleri tahmin edilmelidir [10]. Endüstrilerde su ihtiyacı ve atıksu karakteri ile ilgili olarak, ilk yaklaşımda Tablo 1.13'teki tipik değerler esas alınabilir.

Tablo 1.12. Çeşitli ülkelerde kişi başına yıllık kirlilik yükleri [10]

Kirletici	***Danimarka***	***Brezilya***	***Mısır***	***Hindistan***	***İtalya***	***İsveç***	***Türkiye***	***Uganda***	***ABD***	***Almanya***
BOİ (kg/kişi.yıl)	*20-25*	*20-25*	*10-15*	*10-15*	*18-22*	*25-30*	*10-15*	*20-25*	*30-55*	*20-25*
AKM (kg/kişi.yıl)	*30-35*	*20-25*	*15-25*	*-*	*20-30*	*30-35*	*15-25*	*15-20*	*30-55*	*30-55*
TN (kg/kişi.yıl)	*3-5*	*3-5*	*3-5*	*-*	*3-5*	*4-6*	*3-5*	*3-5*	*5-7*	*4-6*
TP (kg/kişi.yıl)	*1,5-2*	*0,6-1*	*0,4-0,6*	*-*	*0,6-1*	*0,8-1,2*	*0,4-0,6*	*0,4-0,6*	*1,5-2*	*1,2-1,6*
YAM (yüzey aktif maddeler) (kg/kişi.yıl)	*0,8-1,2*	*0,5-1*	*0,3-0,5*	*-*	*0,5-1*	*0,7-1,0*	*0,3-0,5*	*-*	*0,8-1,2*	*0,7-3*
Fenol (gr/kişi.yıl)	*10-20*	*-*	*3-10*	*-*	*3-10*	*-*	*3-10*	*-*	*-*	*-*
Hg (gr/kişi.yıl)	*0,1-0,2*	*-*	*0,01-0,2*	*-*	*0,02-0,04*	*0,1-0,2*	*0,01-0,02*	*-*	*-*	*-*
Pb (gr/kişi.yıl)	*3-10*	*-*	*5-10*	*-*	*5-10*	*5-10*	*3-10*	*-*	*-*	*-*
Cr (gr/kişi.yıl)	*2-4*	*-*	*2-4*	*-*	*2-4*	*0,5-1,5*	*2-4*	*-*	*-*	*-*
Zn (gr/kişi.yıl)	*15-30*	*-*	*15-30*	*-*	*15-30*	*10-20*	*15-30*	*-*	*-*	*-*
Cd (gr/kişi.yıl)	*0,2-0,4*	*-*	*-*	*-*	*-*	*0,5-0,7*	*-*	*-*	*-*	*-*
Ni (gr/kişi.yıl)	*2-4*	*-*	*-*	*-*	*-*	*0,5-3*	*-*	*-*	*-*	*-*

Tablo 1.13. Endüstrilerde su ihtiyacı ve atıksu karakterleri [10]

Endüstri tesisi	*Su tüketimi*	*Özgül su tüketimi*	*Özgül kirletici hacmi*	*Çıkış konsantrasyonu*	*Açıklama*
Süt işletmeleri					
Süt üretimi	*0,7-2,0 m^3/t*	*0,7-1,7 m^3/t*	*0,4-1,8 kg $BOİ_7$/t*	*500-1500 g $BOİ_7$/t*	*t = ton süt*
Peynir üretimi	*0,7-3,0 m^3/t*	*0,7-2,0 m^3/t*	*0,7-2,0 kg $BOİ_7$/t*	*1000-2000 g $BOİ_7$/t*	*Dikkat: Tesis atıksu deşarjı/emisyonunda pH değişimleri*
Karışık süt ürünleri üretimi	*0,7-2,5 m^3/t*	*0,7-2,0 m^3/t*	*0,7-2,0 kg $BOİ_7$/t*	*1000-2000 g $BOİ_7$/t*	
Mezbahalar					
Kesimhaneler		*3-8 m^3/t*	*7-16 kg $BOİ_7$/t*	*500-2000 g $BOİ_7$/t*	*t = ton ürün*
				10-20 g TP/t	*Dikkat: keskin koku, hayvan tüyleri, dezenfektan*
Kesim + et işleme tesisleri		*3-12 m^3/t*	*10-25 kg $BOİ_7$/t*	*500-2000 g $BOİ_7$/t*	*Tesis tipine bağlı olarak su tüketiminde farklılıklar*
Et işleme tesisleri		*1-15 m^3/t*	*6-15 kg $BOİ_7$/t*	*500-1000 kg $BOİ_7$/t*	
Bira işletmeleri					
Bira ve meşrubat üretim tesisleri	*3-7 m^3/m^{3*}*	*3-7 m^3/m^{3*}*	*4-15 kg $BOİ_7/m^3$*	*1000-3000 g $BOİ_7/m^3$*	*m^{3*} = m^3 ürün*
					Dikkat: Yüksek pH
Konserve üretim tesisleri					
Patates (kuru soyum)	*2-4 m^3/t*		*3-6 kg $BOİ_7$/t*	*1000-2000 g $BOİ_7/m^3$*	
Patates (ıslak soyum)	*4-8 m^3/t*		*5-15 kg $BOİ_7$/t*	*2000-3000 g $BOİ_7/m^3$*	*t = ton ham madde*
Pancar	*5-10 m^3/t*		*20-40 kg $BOİ_7$/t*	*3000-5000 g $BOİ_7/m^3$*	*Dikkat: yüzer maddeler*
Havuç	*5-10 m^3/t*		*5-15 kg $BOİ_7$/t*	*800-1500 g $BOİ_7/m^3$*	
Bezelye	*15-30 m^3/t*		*15-30 kg $BOİ_7$/t*	*1000-2000 g $BOİ_7/m^3$*	
Karışık sebze	*20-30 m^3/tf*				*tf = ton üretilen balık*
Balık	*8-15 m^3/t*	*4-8 m^3/t*	*10-50 kg $BOİ_7$/t*	*5000-10000 g $BOİ_7/m^3$*	*t = ton ham madde*
Tekstil endüstrisi					
Tüm ürünler	*100-250 m^3/t*	*100-250 m^3/t*	*50-100 kg $BOİ_7$/t*	*100-1000 g $BOİ_7/m^3$*	*t = ton ham madde*
Pamuk		*100-250 m^3/t*	*70-120 kg $BOİ_7$/t*	*200-600 g $BOİ_7/m^3$*	*Dikkat: yükse su sıcaklığı, yüksek pH değerleri, klor gazı,*
Yün		*50-100 m^3/t*	*15-30 kg $BOİ_7$/t*	*500-1500 g $BOİ_7/m^3$*	*H_2S, tehlikeli kimyasallar*
Sentetik elyaf		*150-250 m^3/t*		*100-300 g $BOİ_7/m^3$*	
Deri			*30-100 kg $BOİ_7$/t*	*1000-2000 g $BOİ_7/m^3$*	
Karışık üretim	*20-70 m^3/t*	*20-70 m^3/t*	*1-4 kg Cr/t*	*30-70 g Cr/m^3*	*t = ton ham madde*
Deri işleme	*20-40 m^3/t*	*20-40 m^3/t*	*0-100 kg S_2/t*	*0-100 g S_2/m^3*	*Dikkat: Cr, pH değişimleri, çamur ve hayvan kılı*
Deri giyim	*60-80 m^3/t*	*60-80 m^3/t*	*10-20 kg TN/t*	*200-400 g TN/m^3*	
Çamaşırhane					*t = ton yıkama*
Islak yıkama	*20-60 m^3/t*	*20-60 m^3/t*	*20-40 kg $BOİ_7$/t*	*300-800 kg $BOİ_7/m^3$*	*Çamaşırhanelerde zıt yönlü yıkama ile su kullanımı ~%70*
			10-20 kg TP/t	*10-50 g TP/m^3*	*azalırken kirletici emisyonu (kg $BOİ_7$/t) aynı kalmaktadır.*
					Dikkat: yüksek sıcaklık
Galvanze endüstrisi	*20-200 L/ m^2*	*20-200 L/m^2*	*3-30 g hm/m^2*	*Ön arıtma öncesi*	*m^2 = m^2 yüzey alanı hm =ağır metaller*
		<1 m^3/h^*	*2-20 g CN/m^2*	*~ 150 g hm/m^3*	**Galvanze endüstrilerinin %50'sinin atıksu debisi <1*
		maks. 10 m^3/sa		*~ 100 g CN/m^3*	*m^3/sa*
				Ön arıtma öncesi	*Dikkat: solvent, siyanür, yüksek pH değerleri, ağır*
				1-10 g hm/m^3	*metaller ve kompleks yapıcı maddeler*
				0,1-0,5 g CN/m^3	

Tablo 1.12. Endüstrilerde su ihtiyacı ve atıksu karakterleri [10] (Tablonun devamı)

Endüstri tesisi	*Su tüketimi*	*Özgül su tüketimi*	*Özgül kirletici hacmi*	*Çıkış konsantrasyonu*	*Açıklama*
Elektrik devreleri endüstrisi	*0,5-1,5 m^3/m^2*	*0,5-1,5 m^3/m^2*	*100-200 g Cu/m^2* *0-5 g Sn/m^2* *0-5 g Pb/m^2*	*100-200 g Cu/m^3* *0-5 g Sn/m^3* *0-5 g Pb/m^3*	*m^2 =m^2 tabaka*
Fotoğraf laboratuvarları	*0,5-1,5 m^3/m^2*	*0,5-1,5 m^3/m^2*	*200-400 g $BOİ_7/m^2$*	*400-700 g $BOİ_7/m^3$* *50-100 g $EDTA/m^3$*	*m^2 = m^2 emülsiyon* *Çeşitli kirlilikler mevcuttur.* *Dikkat: Temas halinde ciltte tahribat, alerjik reaksiyonlar*
Basımevleri	*30-40 m^3/gün*	*30-40 m^3/gün*	*~ 7 kg Zn/gün* *~ 0,04 kg Ag/gün* *~ 0,03 kg Cr/gün* *~ 0,01 kg Cd/gün*	*170-230 g Zn/m^3* *1,0-1,3 g Ag/m^3* *0,8-1,0 g Cr/m^3* *0,2-0,3 g Cd/m^3*	*Harcamalar ticari araştırmalara bağlıdır. Tabloda su tüketim ortalaması 30-40 m^3/gün olarak verilmiştir.* *Dikkat: solvent, asit*
Araç onarım/yıkama					
Araba	*~ 400 L/(L t)* *~ 200 L/(H t)*				*Dikkat: solvent* *L.t = düşük basınçlı yıkama*
Kamyon	*~ 1200 L/ (H t)*				*H. t = yüksek basınçlı yıkama*

1.3. Atıksu Debilerinin Ölçümü

Atıksu toplama, arıtma ve deşarj sistemlerinin tasarımında temel adım atıksu debisinin belirlenmesidir. Bu sistemlerin düzgün çalışabilmesi, yatırım maliyetlerinin minimize edilebilmesi ve tesislerin birden fazla gurup tarafından paylaşılması halinde katılım paylarının belirlenebilmesi için mevcut debi ve tahmin edilen debi hakkında fiili ölçümlerle güvenilir bilginin elde edilmiş olması gerekir. Atıksu debisinin belirlenemediği durumlarda debi, su sarfiyatı, nüfus ve endüstri ile ilgili istatistikî bilgilere dayanılarak hesaplanır.

1.3.1. Debi Ölçümleri

Atıksu arıtma tesislerinde atıksu debisinin rutin ölçümü, tesisin tasarım ve işletme kontrolünün sağlıklı yapılabilmesi için esastır. Ortalama ve günlük debi değişimlerinin bilinmesinin sağladığı faydalar şu şekilde özetlenebilir:

- Sisteme ilave edilecek günlük kimyasal madde miktarının belirlenmesi.
- Sisteme verilecek hava miktarının belirlenmesi.
- Çamur geri devir oranının tespiti.
- Tesisin büyütülmesi söz konusu olduğunda mevcut debi kayıtlarının oluşturulması.
- Günlük kurak hava şartlarında belirlenen önemli debi artışları; infiltrasyon veya kanalizasyon sistemine endüstriyel atıksu deşarjı ve nüfus artışı hakkında bilgi edinilmesi.
- Yağışlı hava şartlarında ortaya çıkan önemli debi artışından hareketle yağmur suyu katkısının tahmini.

1.3.1.1.Debi Ölçüm Cihazlarının Yerleştirilmesi

Atıksu arıtma tesislerinde uygun bir debi ölçüm cihazının konulabileceği yerler aşağıda sıralanmıştır [2]:

- Kanal üstü ve kontrol bacası,
- Arıtma tesisinin girişi,
- Çubuk ızgaranın, kum tutucunun veya ön çökeltim birimlerinin çıkışı,
- Pompa istasyonunun ana terfi hattı,
- Alıcı ortama deşarj öncesi

Bu konumların her birinin fayda ve mahzurları vardır. Bu yüzden, bazı özel şartlar göz önüne alınarak ölçüm cihazının yerleştirebileceği konuma karar verilir. Genellikle farklı yerlere birden fazla debi ölçüm cihazı yerleştirilir. Tablo 1.14'te akım ölçüm cihazlarının arıtma tesisindeki konumlarına göre işletme özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 1.14. Debi ölçüm cihazlarının uygulama yerine göre işletme özelliklerinin kıyaslaması [2]

Debi Ölçüm Cihazının Konumu	***Ölçüm, akımdaki dalgalanmalardan etkileniyor mu?***	***Ölçüm, arıtılan ortalama debi miktarını temsil ediyor mu?***	***Ölçüm, katı parçacıklardan etkileniyor mu?***	***Ölçüm, kum ve diğer çökelebilen katılardan etkileniyor mu?***	***Ölçüm, tesis işletmesinde yararlı mı?***	***Ölçüm, deşarjın yapılacağı alıcı ortam için yararlı mı?***
Kanalların kesişme noktası veya kontrol bacası	*Evet*	*Hayır*	*Evet*	*Evet*	*Evet*	*Hayır*
Arıtma tesisinin girişi	*Evet*	*Hayır*	*Evet*	*Evet*	*Evet*	*Hayır*
Kaba ızgara mansabı	*Evet*	*Hayır*	*Hayır*	*Evet*	*Evet*	*Hayır*
Kum tutucu veya çökeltim birimleri çıkışı	*Hayır*	*Hayır*	*Hayır*	*Hayır*	*Evet*	*Hayır*
Deşarj öncesi	*Hayır*	*Evet*	*Hayır*	*Hayır*	*Hayır*	*Evet*

1.3.1.2.Debi Ölçüm Yöntemi ve Ölçme Cihazları

Atıksu deşarj debisinin ölçümünde kullanılan yöntemler iki ana başlıkta toplanır:

- Basınçlı borular
- Açık kanallar

Tablo 1.15'te akışkanın hız ölçümünde kullanılan farklı yöntemler ve ölçme cihazları sınıflandırılmıştır.

Tablo 1.15. Su ve atıksu debisi ölçümünde kullanılan cihazlar

Debi ölçüm cihazı	***Ölçüm prensibi***
1. Basınçlı borularda	
Venturimetre	*Basınç değişimi ölçülür.*
Ölçüm ağzı (nozül)	*Basınç değişimi ölçülür.*
Orifismetre	*Basınç değişimi ölçülür.*
Elektromanyetik debimetre	*Manyetik alan oluşturulur voltaj ölçülür.*
Türbinmetre	*Türbin kullanılır.*
Akustik esaslı debimetre	*Hız ve akışkan seviyesini ölçmede ses dalgası kullanılır.*
2. Açık kanallarda	
Kanal	*Kanalda kritik derinlik ölçülür.*
Savak	*Savak arkasındaki su yüksekliği ölçülür.*
Derinlik ölçümü	*Akımın derinliğini ölçmede yüzgeç kullanılır.*
Akustik esaslı debimetre	*Hız ve sıvı seviyesini ölçmede ses dalgası kullanılır.*
3. Açık akışlı enjektör (Kennison enjektörü veya Kaliforniya boru yöntemi)	*Serbest düşme ucundaki akış derinliği ölçülür*

Debi ölçüm yönteminin belirlenmesinde dikkate alınması gereken hususlar şu şekilde özetlenebilir:

- Akım hızı aralığı,
- Akım şartları (sürekli veya kesikli),
- Maksimum işletme basıncı ve basınç düşmesi,
- Atık suyun yapısı (katı, yağ, aşındırıcı madde vb. içeriği),
- Bakım yöntemleri ve sıklığı,
- Ölçme yönteminin kolay ölçülebilir tek bir parametreye bağlı olmasıdır.

Ölçümde kullanılan cihazın özelliklerine bağlı olarak debi hesabı yapılır. Aşağıda, basınçlı boru ve açık kanal akımında debi ölçümünde kullanılan bazı cihazların hesap esasları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Basınçlı Borularda Debi Ölçüm Cihazları

Venturi debi ölçer: Basınç farkı ölçme prensibine dayanır. (Şekil 1.8a). İki parçalı basınç ölçme birimini birleştiren daralmış bir borudan oluşur. Boğaza giriş ve boğaz kısmındaki basınç farkı akış katsayısı ile orantılıdır.

Venturi kanalı boyunca sürekli basınç düşüşünün, ölçülen farkın sadece %10'u olması Venturi debi ölçerinin kullanılmasının temel nedenidir.

Venturimetreler için ASME [11] tarafından önerilen oranlar:

Giriş konik kısım için $\alpha_1 = 21 \pm 2°$,
Çıkış konik kısım için $\alpha_2 = 5 - 15°$,
Boğaz uzunluğu = bir boğaz çapı,
Boğaz öncesi basınç ölçme noktası = giriş konisinin $0{,}25 - 0{,}5$ boru çapı öncesidir.

Şekil 1.8. Basınçlı borular için debi ölçme cihazları (a) Venturi (b) Ölçüm ağzı (nozül)

ASME Araştırma Komitesinin akışkan hızı ölçümü için kullandığı bağıntı aşağıda verilmiştir [12]:

$$Q_m = Q - \rho_1 = KYA_2\sqrt{2g_c(p_1 - p_2)\rho_1} \tag{1.21}$$

Burada;

A : boğaz kısmının kesit alanı, (uzunluk^2)

g_c : boyutsuz sabit

K : akış katsayısı, $C/\sqrt{1 - \beta^4}$

C : deşarj katsayısı, boyutsuz

p_1, p_2 : boğaz öncesi ve sonrasında ölçülen statik basınçlar, (kuvvet/uzunluk^2)

Q : boğaz öncesi basınç ve sıcaklıktaki hacimsel debi, (hacim/zaman)

Q_m : kütlesel debi, (kütle/zaman)

Y : genişleme faktörü, boyutsuz (sıvılarda 1 alınır)

β : boğaz çapının boru çapına oranı d/D, boyutsuz

d : boğaz kısmının çapı, (uzunluk)

D : boru çapı, (uzunluk)

ρ_1 : boğaz öncesi basınç ve sıcaklıktaki yoğunluk, (kütle/uzunluk^3)

Deşarj katsayısı C, Herschel tipi Venturi metrede Reynolds sayısına ve Venturi parçası boyutuna bağlıdır. C sabitinin hesaplanmasında kullanılan formüller bu bölümde verilmiştir.

Sürekli basınç kaybı, Herschel tipi Venturimetrelerde çap oranı (ß), ve çıkış konisi açısına (α_2) bağlıdır:

Küçük açılarda (5-7°) basınç farkının (p-p_1) %10-15'i

Büyük açılarda (15°) basınç farkının (p-p_1) %10-30'u

Piyasada kısa tüplü birçok Venturi metre mevcuttur, bunlar Herschel tipi Venturimetrelere kıyasla daha küçük yerlere monte edilebilmesine rağmen aynı zamanda basınç kaybına da sebep olabilmektedir. Deşarj katsayısı C, tipe göre çok farklılık gösterir bu nedenle üreticinin kalibrasyonu mevcut değilse tekil kalibrasyon önerilmektedir.

Ölçüm ağzı (nozül): Basit bir ölçüm ağzı Şekil 1.8.b'de verilmiştir. Ölçüm ağzı ani açılan kısa bir silindirden meydana gelir. Açılan kısmın kesiti eliptik veya silindirik olabilir. Boğaz kısmının düz bölümünün uzunluğu boğaz çapının yaklaşık yarısı; ağız öncesi basınç musluğu, ağzın iç yüzeyinden bir boru çapı uzaklıkta; ağız sonrası basınç musluğu ise ağzın iç yüzeyinden yarım boru çapı uzaklıkta olmalıdır. Sesten düşük hızdaki akışlarda 2 ve 3 noktalarındaki basınç pratik olarak eşittir. Ölçüm ağzının iç yüzü konik seçilirse, giriş ve boğaz kısımlarının geometrisi Herschel tipi Venturi metre ile aynı alınabilir.

Ölçüm ağzında kritik altı akım şartlarında akım hızı, Venturi metreler için verilen bağıntı ile (1.21) hesaplanabilir. Bu bağıntıda deşarj katsayısı, C, Reynolds sayısına ve çap oranı ß'ya bağlıdır. Deşarj katsayısının hesaplanması bu bölümde verilmiştir.

Orifismetreler: Orifismetrelerde debi ölçme, aralıklı plaka boyunca basınç farkı (p_1-p_2) ölçme prensibine dayanır. Orifis plakası iki boruyu bağlayan flanşlara monte edilir. Borunun büyüklüğüne göre küçük çaplı (D<5cm) ve büyük çaplı (D>5cm) orifisler mevcuttur. Orifislerde basınç musluklarının yeri deşarj katsayısını etkiler. Flanşlı orifislerde basınç muslukları orifisden her iki tarafa doğru 2,54 cm uzaklıktadır. Köşeli orifislerde ise musluklar orifisin hemen yanındadır. Büyük çaplı orifislerde, basınç ölçme musluklarının, aralığa D ve D/2 uzaklıkta yerleştirilen tipleri de vardır (Şekil 1.9).

Şekil 1.9. Orifis metrelerde basınç ölçme musluklarının yerleşimi.

Orifis metrelerde akışkan hızının belirlenmesinde (1.21) bağıntısı kullanılabilir. Orifis metrelerde bu bağıntıların kullanılmasında Re sayısının üst limitinin olmaması bir üstünlük olmakla birlikte, Venturi metre ve ölçme ağızlarına kıyasla basınç kaybının yüksek olması mahzur olarak görülmektedir. Statik basınç kaybı (1.22) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$\omega = \frac{\sqrt{1-\beta^4} - C\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4} + C\beta^2}(p_1 - p_2) \tag{1.22}$$

Burada;

ω : orifisin D mesafe öncesinde ve 6D mesafe sonrasında oluşan statik basınç kaybı (kuvvet/uzunluk^2)

Orifisli boru sistemi tasarımında yersel yük kaybının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntılar kullanılır:

$$K_m = \frac{2\omega}{\rho V^2} \tag{1.23}$$

Burada;

K_m : yersel yük kaybı katsayısı, (boyutsuz)
V : borudaki akım hızı, (uzunluk/zaman)

$$h = K_m V^2 / 2 \tag{1.24}$$

h : yük kaybı, (uzunluk)
g : yerçekimi ivmesi, (uzunluk/zaman^2)

Elektromanyetik debi ölçer: Elektromanyetik debi ölçerler (magmetre), fizikte Faraday'ın Elektromanyetik İndüksiyon prensibine göre çalışır. Faraday kanununa göre herhangi bir iletici (taşıyıcı) bir manyetik alandan geçerken oluşan voltaj bu ileticinin hızı ile orantılıdır. Elektromanyetik debimetrelerde iletici atıksudur.

Manyetik debi ölçer, yalıtılmış manyetik olmayan bir tüp ve bunun üstüne karşılıklı monte edilmiş iki adet elektromanyetik sargıdan oluşmuştur. Sargıdan geçen alternatif akım, hareketli bir iletici gibi davranan akışkanda alternatif akım voltajı oluşturur.

Elektrotlarda algılanan alternatif akım voltajı akışkanın akım hızı ile orantılıdır. Burada akışkan elektrik akımının taşıyıcısı olarak davrandığından taşıyıcı olmayan akışkanlar için elektromanyetik debi ölçer kullanılamaz.

Elektromanyetik debi ölçer kullanımında dikkate alınması gereken hususlar şunlardır:

- Boruda tam dolu akış gerçekleşmelidir; aksi takdirde akım hızı gerçek değerinden daha yüksek okunur,
- 0,3 m/s'nin altındaki akım hızlarında güvenilirlik azalır.

Tam dolu akan bir boruda, boru çapı mm ve akım debisi m^3/saat olarak alınırsa, borudaki akım hızı m/s olarak aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunabilir [13]:

$$V = 354\, Q/D^2 \tag{1.25}$$

Burada;

D : Boru çapı, uzunluk
Q : Debi, uzunluk^3/zaman
V : Akım hızı, uzunluk/zaman

Elektromanyetik debimetrelerin güvenilirliği çok yüksektir. Bu nedenle, geni ş bir debi aralığında kullanılabilir. Düz bir parça borudan ibaret olduğu için ilave bir yük kaybı yoktur. Performansları, sıcaklık, iletkenlik, viskozite, türbülans ve askıda katı madde parametrelerinden etkilenmez. En büyük mahzurları ise yüksek ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım için eğitimli bir personelin sürekli istihdamıdır.

Türbinmetre: Türbinmetrelerde dönme hızı suyun akış hızına eşit hızda dönen bir türbin vardır. Bu cihazın kullanımı, borunun tam dolu ve basınç altında olması ile sıvıda askıda katı madde içeriğinin düşük olması koşulları ile sınırlıdır. Güvenilirliği ve akış aralığı yüksektir.

Akustik esaslı debimetre: Akustik esaslı debi ölçerlerle akım hızı ses dalgası ile ölçülür. Akustik esaslı debi ölçerler sıvı seviyesini, alanı ve gerçek hızı (ses dalgasının akımın iki noktası arasında gitme süresi) belirlerler. Hız ve alan yardımıyla deşarj debisi hesaplanır.

Akustik esaslı debi ölçerlerin üstünlüğü düşük yük kaybı, doğruluk, değişik boru çaplarında kullanılabilirlik, katılarla tıkanmama ve geniş bir akım hızı aralığında kullanılabilir olmasıdır.

Deşarj katsayısının hesaplanması: Debi katsayıların hesaplanması için literatürde birçok genelleştirilmiş formül bulunmaktadır. Ancak her bir debi ölçme yönteminde imalatçı firmaların geliştirdiği değişik tipleri olduğundan montaj ve hesaplamalarda imalatçı firma katalog verileri en iyi kaynaktır. Tablo 1.16'da deşarj katsayısının hesaplanmasında kullanılan bağıntılar ve bu bağıntıların kullanım şartları verilmiştir.

D ve d' ye göre Reynolds sayısı aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesaplanır [14]:

$$Re_D = \frac{V_{boru}\, D}{V} \tag{1.26}$$

$$Re_d = \frac{V_{boğaz}\, D}{V} \tag{1.27}$$

Burada;

$V_{boru}, V_{boğaz}$: boru ve boğaz kısımlarındaki hızlar, (uzunluk/zaman)
V : kinematik viskozite, (uzunluk^2/zaman)

Tablo 1.16. Deşarj katsayısının hesaplanması

Ölçüm cihazı	*Formül*		*Geçerlilik şartları*
Venturi	$C = 0{,}9858 - 0{,}196\,(d/D)^{4,5}$	*(1.28)*	$0{,}316 \le d/D \le 0{,}775;\ 1{,}5 * 10^5 \le Re_D \le 2 * 10^6$ $6{,}5\ cm \le D \le 50\ cm;\ d \ge 5\ cm;\ k/D \le 3{,}8 * 10^{-4}$ *[11], [15])*
ISA 1932 ölçüm ağzı	$C = 0{,}99 - 0{,}2262(d/D)^{4,1} - [0{,}00175(d/D)^2 - 0{,}0033(d/D)^{4,15}][10^6/Re_D]^{1,15}$	*(1.29)*	$5\ cm \le D \le 50cm$ $0{,}3 \le d/D \le 0{,}44 \rightarrow 7 * 10^4 \le Re_D \le 10^7$ $0{,}44 \le d/D \le 0{,}8 \rightarrow 2 * 10^4 \le Re_D \le 10^7$ $k/D \le 3{,}8 * 10^{-4}$
Uz un gövdeli ölçüm ağzı	$C = 0{,}9965 - 0{,}00653[10^6(d/D)/Re_D]^{0,5}$	*(1.30)*	$5\ cm \le D \le 63cm$ $0{,}2 \le d/D \le 0{,}8;\ 10^4 \le Re_D \le 10^7$ $k/D \le 10^{-3}$
Küçük borulu orifis (D< 5 cm)	*Köşe tipli:* $C = \left\{0{,}5991 + \frac{0{,}0044}{D} + (0{,}3155 + \frac{0{,}0175}{D})[(d/D)^4 + 2(d/D)^{16}]\right\}\sqrt{1-(d/D)^4}$ $+ \left\{\frac{0{,}52}{D} - 0{,}192 + (16{,}48 - 1{,}16/D)[(d/D)^4 + 4(d/D)^{16}]\right\}\sqrt{\frac{1-(d/D)^4}{Re_D}}$	*(1.31)*	$1{,}2\ cm \le D \le 4cm$ $0{,}1 \le d/D \le 0{,}8$
	Flanş tipli: $C = \{0{,}598 + 0{,}468[(d/D)^4 + 10(d/D)^{12}]\}\sqrt{1-(d/D)^4}$ $+ [0{,}87 + 8{,}1(d/D)^4]\sqrt{\frac{1-(d/D)^4}{Re_D}}$	*(1.32)*	$2{,}5\ cm \le D \le 4cm$ $0{,}15 \le d/D \le 0{,}7$ $Re_D > 1000$
Geniş borulu orifis (D> 5 cm)	$C = 0{,}5961 + 0{,}0261\beta^2 - 0{,}0261\beta^8 + 0{,}000521(\frac{10^6\beta}{Re_D})^{0,7}$ $+ \left[0{,}0188 + 0{,}0063\left[\frac{19000\beta}{Re_D}\right]^{0,8}\right]\left[\frac{10^6}{Re_D}\right]^{0,8}\beta^{3,5}$ $+ [0{,}043 + 0{,}08 - e^{L_1} - 0{,}123 - e^{-7L_1}] - \left[1 - 0{,}11\left[\frac{19000\beta}{Re}\right]^{0,8}\right]\frac{\beta^4}{1-\beta^4}$ $- 0{,}031\left[\frac{2L_2}{1-\beta} - 0{,}8\left[\frac{2L_2}{1-\beta}\right]^{1,1}\right] - \beta^{1,3}$	*(1.33)*	*Köşe tiplide: $L_1=L_2=0$* *D ve D/2 tiplilerde: $L_1=1$ ve $L_2=0{,}47$* *$d \ge 1{,}25$ cm, 5 cm $\le D \le$ 1 m, $0{,}1 \le d/D \le 0{,}75$* *Köşe tiplide veya D ve D/2 tiplilerde;* *$0{,}1 \le d/D \le 0{,}5$ de $Re_D \ge 4000$, $d/D \ge 0{,}5$ de $Re_D \ge 16000\ (d/D)^2$* *$k/D \le 3{,}8 * 10^{-4}$*
	$D < 0{,}07112\ m\ ise;$ $+0{,}011(0{,}75 - \beta)[2{,}8 - (D/0{,}0254]$ *bu terim ilave edilir*	*(1.34)*	*Flanşlı tiplilerde:* *$Re \ge 4000$ ve $Re \ge 170.000$* *D $(d/D)^2$ (D metre)* *Flanş veya D ve D/2 tipliler için $k/D \le 10^{-3}$*

k: eşdeğer pürüzlülük yüksekliği, mm (boru malzemesinin cinsine, yeniliğine göre çok pürüzsüz yüzeylerde k ≤ 0,03 olmak üzere 0,03-1,5 mm arasındadır)

Açık Kanallarda Debi Ölçümü

- **Savak Kanalları**

Savak kanalları, açık kanallarda debi ölçümünde kullanılırlar. Genişlikleri birkaç cm ile 15m arasında, daralma kısmında ise su derinliği birkaç cm ile 2 m arasında olabilir. Savak kanallarının klasik savaklara kıyasla daha düşük yük kaybı üstünlüğü yanı sıra, kurulma ve hesaplamaların daha karmaşık olması gibi mahzurları da vardır.

Kanallarda su seviyesi, daralma (boğaz) bölümünde ölçülür. Parshall (Venturi) kanalında ölçüm, daralma (geçiş) kanalının 2/3'ü mesafesinde; dikdörtgen, trapez ve U kanallarda ise boğazdan beklenen maksimum savak yükünün 3-4 katı uzaklıkta ölçülür. Bu üç kanalda savak yükü, pozisyonla fazla değişmediğinden, Parshall kanalında olduğu gibi tam bir ölçüm yerinin olması fazla önem arz etmemektedir.

Bu bölümde, uygulamada ağırlıklı olarak kullanılmakta olan Parshall, dikdörtgen, trapez ve U kesitli kanalları ile ilgili hesaplamalar verilmiştir. Bunlardan her birinin montaj, savak yükü ölçümleri, çökme ve analizleme ile ilgili fayda ve mahzurları vardır. En yaygı n olarak Parshall kanalı (savağı) kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda gelişen yeni kanal tasarımları, Parshall kanallarının montaj zorlukları ve tortulanma eğilimi nedenleri ile daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Bu bölümde verilen hesaplama yöntemleri OSİB, ISO, ASTM ve USBR standartlarından alınmıştır [1], [16], [17], [18]. Bu bağıntılar teorik bağıntıların deneysel gözlem sonuçlarına göre uyarlanmasıyla oluşturulmuştur. Parshall kanalları için batmış ve batmış olmayan şartlar, dikdörtgen, trapez ve U kanallar için ise sadece batmış olmayan şartlar için bağıntılar verilmiştir. Batmış olmayan durum boğaz kısmında su seviyesindeki düşüşün gözle fark edildiği durumdur.

Parshall (Venturi) kanalı: Parshall kanalı, bu tür savak kanallar arasında en geniş kullanımlı olanıdır ve 1930'larda tasarlanmasından bu yana kanal ölçümlerinde standart olmuştur. Parshall kanalının en önemli üstünlüğü yük kaybının düşük olması ve kendi kendini temizleme kapasitesidir. Parshall kanalı üç bölümden oluşur: daralma bölümü, boğaz ve genişleme bölümü. Serbest akışlı ve batmış olmak üzere iki tipi mevcuttur (Şekil 1.10). Parshall kanalı boyutlandırması ASTM D1941 [17] ve ISO 9826 [19] standartlarında verildiği gibi yapılmalıdır. Standart Venturi Kanalı (Savağı) genel ölçüleri Tablo 1.17'de verilmiştir.

Kanallar sıvı akışını, kritik altından süper kritik özelliğe geçirmek üzere tasarlanmıştır. Parshall kanalı durumunda ise bu geçiş boğaz kısmında daralma ve düşü ile sağlanır. Bu dönüşüm akımın kanal boğazında kritik derinlikten geçmesine neden olur. Kritik derinlikte enerji minimuma iner. Kritik derinlik akış hızına bağlıdır ve hızın kesin yerinin tespit zorluğu nedeniyle bu derinliğin ölçümü fiziksel olarak çok zordur. Diğer taraftan boğaz öncesi derinlik kütle korunumu nedeniyle kritik derinlik ile ilişkilidir. Bu nedenle akış hızı boğaz öncesi derinliğin ölçümü ile hesaplanır.

Tablo 1.17. Standart Venturi Kanalı (Savağı) genel ölçüleri [3]

b	*A*	*2/3 A*	*B*	*C*	*D*	*F*	*G*	*K*	*N*
m	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*M*	*cm*	*cm*
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
0,076	*0,467*	*0,301*	*0,458*	*0,178*	*0,259*	*0,153*	*0,305*	*2,54*	*5,71*
0,152	*0,620*	*0,413*	*0,610*	*0,397*	*0,397*	*0,305*	*0,610*	*7,61*	*11,40*
0,228	*0,880*	*0,587*	*0,864*	*0,381*	*0,575*	*0,305*	*0,457*	*7,61*	*11,40*
0,305	*1,370*	*0,914*	*1,343*	*0,610*	*0,845*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
0,457	*1,449*	*0,965*	*1,420*	*0,762*	*1,026*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
0,610	*1,525*	*1,016*	*1,496*	*0,915*	*1,207*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
0,914	*1,675*	*1,118*	*1,645*	*1,220*	*1,573*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
1,220	*1,830*	*1,220*	*1,795*	*1,525*	*1,938*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
1,830	*2,130*	*1,420*	*2,093*	*2,135*	*2,668*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*
2,440	*2,440*	*1,625*	*2,387*	*2,740*	*3,394*	*0,610*	*0,915*	*7,61*	*22,90*

Serbest akışlı Parshall kanalıyla debi ölçümü: Bu halde boğaz kısmında hidrolik sıçrama gözle net olarak fark edilir. Yani boğaz sonrası su seviyesi, boğaz öncesi su seviyesinden belirgin derecede fark edilecek kadar düşük seviyededir.

Şekil 1.10. Parshall kanalının şematik görünümü

Serbest akışlı Parshall kanalında debi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$Q = C\,h^n \tag{1.35}$$

Burada;

Q : Hacimsel hız, debi, m^3/s
h : Boğaz öncesi derinlik, m
C : Parshall kanalı sabiti, ampirik
n : Parshall kanalı üs sabiti, birimsiz
b : Boğaz genişliği, m

C ve n sabitleri Şekil 1.11'deki grafikten bulunabilir.

Şekil 1.11. Parshall kanalı sabitleri

Batmış akışlı Parshall kanalıyla debi ölçümü: Bu halde boğaz kısmında hidrolik sıçrama gözle fark edilemeyecek, yani boğaz sonrası su seviyesinin, sıçramanın fark edilemeyeceği kadar yüksek olduğu akış şartları hakimdir. Batmış akışlı Parshall kanalında debi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$Q = C\,h^n - Q_e \tag{1.36}$$

Burada;

Q_e : batmışlığın debiyi azaltma payı, m^3/s

b< 3,05 m için (1.36) bağıntısındaki Q_e için aşağıdaki bağıntı verilmektedir:

$$Q_e = 0{,}07b^{0{,}815}\left[\left(\frac{h}{0{,}305\left(\left(\frac{1{,}8}{H/h}\right)^{0{,}8} - 2{,}46\right)}\right)^{4{,}57-3{,}14H/h} + H/h\right] \tag{1.37}$$

Burada;

H : Boğaz sonrası ölçülen su seviyesi, m, (sadece kanal batmışsa gereklidir)
H/h : Batmışlık oranı, b < 3,05 için H /h > 0,6 veya b≥3,05 için H/h>0,8 ise kanal batmış haldedir.

b ≥ 3,05 m için Q_e:

$$Q_e = C_s\,Q_3 \tag{1.38}$$

$$C_s = (0{,}3281)b \tag{1.39}$$

Burada;

Q_3 : Q_e'yi hesaplamak için akış faktörü, m^3/s (b≥3,05 için).

Batmış Parshall kanalı için C ve n sabitleri Şekil 1.11'deki grafikten, Q_3, ise H /h'nın ve h'nın fonksiyonu olarak Şekil 1.12'deki grafikten bulunabilir.

Şekil 1.12. Genişliği 3,05 m'den büyük batmış Parshall kanalı için Q_3 sabiti

Dikdörtgen kanalda debi ölçümü: Dikdörtgen en kesitli kanalın şematik görünümü Şekil 1.13'te verilmiştir. Hesaplamaların sırası aşağıdaki gibidir [17]:

$$C_d = \left(1 - \frac{0{,}006\,L}{b}\right)\left(1 - \frac{0{,}003\,L}{h}\right)^{3/2} \tag{1.40}$$

$$A = B(P + h) \tag{1.41}$$

$$\sqrt{{C_v}^{2/3} - 1} = \frac{2}{3\sqrt{3}}\frac{b\,h\,C_v C_d}{A} \quad \text{Buradan } C_v \text{ bulunur.} \tag{1.42}$$

$$Q = b\,C_v\,C_d\left(\frac{2h}{3}\right)^{3/2}\sqrt{g} \tag{1.43}$$

$$V = \frac{Q}{A} \tag{1.44}$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{g\,h}} \tag{1.45}$$

C_v sadece ($h\,b\,C_v/A < 0{,}93$) ise çözülebilir.

Burada;

A : Daralma kısmında en kesit alanı, m^2
b : Boğaz kısmı taban genişliği, m
B : Daralma kısmı taban genişliği, m
C_d : Dikdörtgen, trapez ve U kanallarda deşarj katsayısı, birimsiz
C_v : Dikdörtgen, trapez ve U kanallar için daralma hızı sabiti, birimsiz
F : Daralma kanalı akışı için Froude sayısı, birimsiz
F< 1 yavaş veya kritik altı akış, F>1 hızlı veya süper kritik akış
g : Yer çekimi ivmesi, 9,8066 m/s^2
h : Ölçülen su seviyesi, m, eşik varsa su yüzeyi ve eşik arasındaki dikey mesafe
L : Boğaz kısmının uzunluğu, m
P : Eşik yüksekliği, m
Q : Kanal boyunca akış hızı, m^3/s
V : Daralma kısmında hız, m/s

Bu hesaplamaların için ISO 4359'un önerdiği şartlar şunlardır:

$h \leq 2m, 0{,}1m \leq b \leq B, \qquad F \leq 0{,}5, \qquad h/b \leq 3$

$(bh)/[B(P+h)] \leq 0{,}7,$ $\quad h/L \leq 0{,}5$ $\quad h \geq 0{,}05\ veya\ h \geq 0{,}05\ L$ (hangisi büyükse)

Şekil 1.13. Trapez, dikdörtgen ve U kanalın şematik görünümü

Trapez en kesitli kanalda debi ölçümü: Trapez kanalda hesaplamaların sırası aşağıdaki gibidir [20]:

$$k = \sqrt{1+m^2} - m \tag{1.46}$$

$$C_d = \left(1 - \frac{0{,}006\ k\ L}{b}\right)\left(1 - \frac{0{,}003\ L}{h}\right)^{3/2} \tag{1.47}$$

$$A = (P+h)[B + M(P+h)] \tag{1.48}$$

$$T = B + 2M(P+h) \tag{1.49}$$

H = h alınır, C_s ise Şekil 1.14'teki grafikten bulunur. Bu grafik 0,02 < mH/b < 5 aralığında geçerlidir.

Şekil 1.14. Trapez kanalda C_s nin bulunması ($0{,}02 < \mathrm{mH/b} < 5$)

$$\sqrt{{C_v}^{2/3} - 1} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{bhC_vC_s}{A} \tag{1.50}$$

Bu bağıntıdan C_v bulunur. Daha sonra;

$$Q = bC_dC_sC_v \left(\frac{2h}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} \tag{1.51}$$

$$V = \frac{Q}{A} \tag{1.52}$$

$$F = V\sqrt{\frac{T}{gA}} \tag{1.53}$$

eşitlikleri ile Q bulunur.

Burada;

H : Toplam su seviyesi, m, H = h $C_v^{2/3}$
K : Trapez kanal hesaplarında kullanılan bir sabit, boyutsuz
M : Trapez kanal boğaz kısmı eğimi, (yatay/dikey)
m : Trapez kanal daralma kısmı eğimi, (yatay/dikey)
T : Daralma kısmı tavan genişliği, m

C_v sadece $h\ b\ C_s/A\ <\ 0{,}93$ ise hesaplanabilir. C_s ve C_v H ve h'nın fonksiyonu olduğundan $H = h\ {C_v}^{2/3}$, C_s, C_v, ve Q tekrardan hesaplanmalıdır. ISO 4359 [17] Q'yu üç defa hesaplamayı önermektedir. Ancak trapez kanal üreticileri dördüncü haneye kadar Q'nun hesaplanmasına devam edilmesini önermektedirler. Sonuç olarak Q'dan V ve F hesaplanır.

Bu hesaplamaların için ISO 4359 [17]'un önerdiği şartlar şunlardır:

$h\ \leq\ 2m, \qquad 0{,}1m\ \leq\ b\ <\ B, F\ \leq\ 0{,}5, \qquad h/L\ \leq\ 0{,}5$

$h\ \geq\ 0{,}05$ veya $h\ \geq\ 0{,}05L$ (hangisi büyükse)

Dikdörtgen, trapez ve U kanallarda boğaz kısmında bir eşik olduğundan savak yükü ölçümü, daralma bölümünün dibinden değil, eşiğin üzerinden yapılır.

U Kanalda debi ölçümü:

Bu tip savak kanallarıyla debi ölçümü ve hesabı aşağıdaki gibidir.

$$C_d = \left(1 - \frac{0{,}006L}{d}\right)\left(1 - \frac{0{,}003L}{h}\right)^{3/2} \tag{1.54}$$

$(P + h) < D/2$ ise;

$$\theta = cos^{-1}\left[\frac{D - 2(P + h)}{D}\right] \tag{1.55}$$

$$A = \frac{D^2}{4}(\theta - sin\theta - cos\theta) \tag{1.56}$$

$$T = 2\sqrt{(P + h)(D - P - h)} \tag{1.57}$$

$(P + h) \geq D/2$ ise;

$$A = \frac{\pi - D^2}{8} + D\left(P + h - \frac{D}{2}\right) \tag{1.58}$$

$T = D$

H =h kabul edilir ve Şekil 1.15'teki grafikten C_u bulunur. Bu grafik $0{,}1 < H/d < 3$ için geçerlidir. Daha sonra aşağıda verilen (1.59) bağıntısından C_v bulunur:

$$\sqrt{{C_v}^{2/3} - 1} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{dhC_vC_u}{A} \tag{1.59}$$

$$Q = dC_dC_uC_v \left(\frac{2h}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} \tag{1.60}$$

$$V = \frac{Q}{A} \tag{1.61}$$

$$F = V\sqrt{\frac{T}{gA}} \tag{1.62}$$

Bu hesaplamalar için ISO 4359'un önerdiği şartlar şunlardır:

$h \leq 2m$, $0{,}1m \leq d/D$ $F \leq 0{,}5$, $h/L \leq 0{,}5$

$h \geq 0{,}05$ veya $h \geq 0{,}05L$ (hangisi büyükse)

Şekil 1.15. U kanallarında C_u'nun bulunması

C_v sadece h d $C_u/A < 0{,}93$ ise hesaplanabilir. C_u ve C_v, H ve h'nın fonksiyonu olduğundan $H = h\,{C_v}^{2/3}$, C_u, C_v, ve Q tekrardan hesaplanmalıdır. ISO 4359 [17] Q'yu üç defa hesaplamayı önermektedir. Ancak U kanal üreticileri dördüncü haneye kadar doğruluk sağlanana kadar Q'nun hesaplanmasına devam edilmesini önermektedirler. Sonuç olarak Q'dan V ve F hesaplanır.

Palmer-Bowlus Savağı (Kanalı) ile Debi Ölçümü:

Palmer-Bowlus savağının en önemli üstünlüğü atıksu veya yağmursuyu kanal sistemindeki bir baca içerisine konulabilmesidir (Şekil 1.16). Savağın doğru şekilde kullanılabilmesi için savak eşiği üzerinde kritik derinliğin oluşması gerekmektedir. Kritik akım şartları, kanaldaki su yüzeyi profili eşik gerisine doğru kabartılarak sağlanır. Kanal tabanında teşkil eden küçük eşik sayesinde, minimum yersel yük kaybı ile kritik akım şartları oluşturulabilir. Kanaldan geçen akım, eşiğin memba tarafındaki su derinliğine bağlı olarak (hazırlanacak bir anahtar eğrisi ile) belirlenebilir. Bu savağın en önemli üstünlüğü, herhangi bir tıkanmaya imkan vermeden mevcut serbest yüzey akışlı dairesel kanal sistemi üzerinde teşkil edilebilmesidir. Savaktan doğru biçimde yararlanılabilmesi için memba kesimindeki su derinliği (y_1), kanal çapının %90'ını geçmemelidir ($y_1 \leq 0{,}9D$). y_1 derinliği savak eşiği başlangıcının en az 0,5D kadar önünde ölçülmelidir.

Şekil 1.16. Palmer-Bowlus savağının en önemli üstünlüğü atıksu veya yağmursuyu kanal sistemindeki bir baca içerisine yerleşimi [20]

Palmer-Bowlus (PB) savağı anahtar eğrisi aşağıdaki yaklaşım uygulanarak belirlenebilir:

Şekil 1.17'de verilen PB savağı tipik boyuna ve enine kesitleri esas alınarak, (1) ve (2) kesitleri için Bernoulli enerji dengesi eşitliği,

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + y_z \tag{1.63}$$

yazılabilir. Burada;

y_1 : savağın memba tarafındaki (1 kesiti) akım derinliği (cm)
V_1 : (1) Kesitindeki akım hızı (m/s)
y_2 : Savak üzerindeki akım derinliği (m)
V_2 : Savak üzerindeki akım hızı (m/s)
y_z : savak eşiği yüksekliği (m)

Şekil 1.17. Palmer-Bowlus kanalının kesit görünüşü (a) Eksenin yandan görünüşü (b) uç görünümü

Bu denklemde y_1 yalnız bırakılırsa,

$$y_1 = y_z + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \tag{1.64}$$

elde edilir. Savak eşiği üzerinde herhangi bir kesit için özgül hidrolik enerji (E) de,

$$E = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = y_2 + \frac{Q^2}{A_2^2\, 2g} \tag{1.65}$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada;

Q : (2) kesitinden geçen debi (m^3/s)
A : (2)'deki ıslak kanal enkesiti (m^2)

Denklem (1.65)'ün y_2'ye göre türevin sıfıra eşit olduğu durumdaki $\left(\frac{dE}{y_2} = 0\right)$ debi, enkesit, hız, derinlik ve genişlik kritik akım şartlarına karşı gelir:

$$\frac{dE}{y_2} = 1 - \frac{Q^2\, B}{A_2^3\, g} = 0 \tag{1.66}$$

$$\frac{Q_c^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} \tag{1.67}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{Q_c^2}{A_c^3\, 2g} = \left(\frac{A}{2\,B}\right)_c \tag{1.68}$$

(2) kesitinin kritik (akım) konumu için ($y_2 = y_c$), denklem (1.64) yeniden düzenlenirse,

$$y_1 = y_z + y_c + \left(\frac{A}{2\,B}\right)_c - \frac{V_1^2}{2g} = y_z + y_c + \left(\frac{A}{2\,B}\right)_c - \frac{Q^2}{A_1^2\, 2g} \tag{1.69}$$

elde edilir. Denklem (1.69)'de y_1 sadece debiye (Q) bağlıdır. Zira belli bir savak geometrisi için A_1, y_1'e bağlı olup y_z, y_c, A_c ve B_c de belli bir Q debisi için sabittir. Denklem (1.62)'de, $y_1$çeşitli Q debileri için çözülerek PB savağı anahtar eğrisi (derinlik (h)-Q) hazırlanabilir. Anahtar eğrisi yardımıyla, herhangi bir derinliğe (y_1) karşı gelen debi (Q) bulunabilir.

PB savağı anahtar eğrisi hazırlanmasında aşağıdaki ardışık hesaplama yaklaşımı uygulanır:

(1) Öncelikle savakta bir derinlik ($y_z = y_c$) seçilir.
(2) Seçilen y_c'ye karşı gelen A_c ve B_c hesaplanır.
(3) Seçilen y_c'ye karşı gelen debi, $Q_c = \sqrt{\frac{A_c^3}{B_c} g}$ ifadesinden hesaplanır.
(4) Bu Q_c debisi denklem (1.69)'deki yerine konarak tek bilinmeyen olan y_1, deneme yoluyla bulunur.

Tablo 1.18. Palmer-Bowlus Savağı ölçü tablosu (bütün ölçüler cm'dir)

Çap (D)	*D/ 4*	*2D*	y_z	*Z*	$y_{1,maks}$
10	*3*	*20*	*1*	*43*	*15*
15	*4*	*30*	*3*	*64*	*20*
20	*5*	*41*	*3*	*84*	*25*
25	*6*	*51*	*4*	*104*	*30*
30	*8*	*61*	*5*	*124*	*36*
38	*10*	*76*	*6*	*155*	*43*
46	*11*	*91*	*8*	*185*	*51*
53	*13*	*107*	*9*	*216*	*58*
61	*15*	*122*	*10*	*246*	*66*
69	*17*	*137*	*11*	*277*	*74*
76	*19*	*152*	*13*	*307*	*81*
91	*23*	*183*	*15*	*368*	*97*
107	*27*	*213*	*18*	*429*	*112*

Bu yöntem $y_1 \leq 0{,}9D$ olmak üzere çeşitli y_c değerleri için tekrarlanarak anahtar eğrisi ($y_1 - Q$) elde edilir.

Konu ile daha ayrıntılı bilgi ve sayısal uygulama için Kaynak [21]'e başvurulmalıdır.

– **Savaklar**

Savaklar açık kanallarda debi ölçümünde kullanılırlar. Bu bölümde uygulamada en yaygın olarak kullanılan dikdörtgen, V, trapez savaklarla ilgili bağıntılar verilmiştir.

Dikdörtgen savak: Dikdörtgen savaklarda temel prensip, debinin su derinliğiyle (h, Şekil 1.18'de savak yükü) doğrudan ilişkili olmasıdır. Dikdörtgen savaklar, "bastırılmış", "kısmen daraltılmış" veya "tamamen daraltılmış" olabilirler. "Bastırılmış" dikdörtgen savaklarda daralma yoktur, bu savaklarda (b) = (B)'dir. Diğer bir deyişle çentik yoktur, savak dümdüzdür. "Tamamen daraltılmış" savaklarda, (B-b) > $4h_{maks}$ (h_{maks} savakta beklenen en yüksek su seviyesidir) [18]. "Kısmen daraltılmış savakta ise 0 < (B-b) < $4h_{maks}$'dır. Savaklarda daraltma, su akışının savağa doğru sıkıştırılması amacıyla yapılır.

ISO [22], ASTM [23] ve USBR [18] bastırılmış, kısmen daraltılmış veya tamamen daraltılmış dikdörtgen savaklar için Kindsvater-Carter denklemini önermektedirler:

$$Q = C_e \frac{2}{3}\sqrt{2g}(b + K_b)(h + K_h)^{3/2} \tag{1.70}$$

Burada;

Q : debi, m^3/s

C_e	: deşarj katsayısı, boyutsuz
g	: yerçekimi ivmesi, m/s^2
b	: yerçekimi ivmesi, m/s^2
h	: su seviyesi, metre
K_b *ve* K_h	: viskozite ve yüzey geriliminin etkisi, m

($b+K_b$) toplamı "etkin genişlik", ($h+K_h$) toplamı ise "etkin savak yükü" olarak adlandırılır.

$g = 9{,}8066$ m/s^2, $K_h = 0{,}001$ m'dir. C_e, b/B ve h/P 'nin fonksiyonu; K_b, b/B'nin fonksiyonudur. Şekil 1.19'da ISO [22] ve LMNO [14]'nin çeşitli b/B değerlerinde h/P ye karşı Ce grafiği verilmiştir. Nümerik çözümler için çeşitli b/B oranlarında K_b değerleri ise Şekil 1.20'de verilmiştir.

Şekil 1.18. Dikdörtgen, üçgen ve trapez savakların şematik görünümü

Şekil 1.19. Dikdörtgen savaklarda debi katsayısı

Önerilen montaj şartları ve denklemin uygulaması [20]:

- h, savak öncesi, savaktan maksimum savak yükünün 4-5 katı uzaklıkta ölçülmelidir,
- Savağın kalınlığı önemli değildir, ancak eşiğin suyun geçtiği bölümünün kalınlığı önemlidir ve 1-2 mm'yi geçmemelidir.
- Savak sonrası su yüzeyi, kretin (savak çentiği tabanı) en az 6 cm altında olmalıdır,
- Ölçülen su seviyesi, $h \geq 0{,}03$ m olmalıdır,
- P, savak öncesi kretten itibaren ölçülmeli ve $P \geq 0{,}1$ m. olmalıdır (0,1-10.000m),
- Çentik genişliği $b \geq 0{,}15$ m ve savak genişliği $B \geq 0{,}15$ m (0,15-10.000) olmalıdır,
- $0 < b/B \leq 1$ ve $0 < h/P \leq 2{,}5$ olmalıdır,
- $b < B$ (daraltılmış savaklarda) ise $(B - b) \geq 0{,}2$ m olmalıdır.

Şekil 1.20. Dikdörtgen savaklarda K_b katsayısı

Üçgen (V - çentikli) savak: Üçgen savaklarda temel prensip, deşarjın üçgenin tabanından itibaren su yüksekliği ile orantılı olmasıdır. Bu mesafe su seviyesi (h) olarak adlandırılır (Şekil 1.18). Üçgen savaklarda deşarjdaki küçük değişimler derinlikte büyük değişimlere neden olduğundan dikdörtgen savaklara kıyasla daha hassas savak yükü ölçümlerine olanak tanır.

ISO [22], ASTM [23] ve USBR [18] üçgen savaklar için Kindsvater-Carter denklemini önermektedirler:

$$Q = 76{,}98\, C\, tan(\Theta/2)(h + k)^{5/2} \tag{1.71}$$

Burada;

Q : Debi, m^3/s
C : Deşarj katsayısı, boyutsuz
Θ : Çentik açısı, derece
h : Savak yükü, m
k : Su seviyesi düzeltme faktörü, m

C ve k'nın açıya karşı çizilmiş grafiği Şekil 1.21'deki grafikte verilmiştir. Otomatik hesaplamalar için geliştirilmiş olan C ve k denklemleri (1.72) ve (1.73)'de verilmiştir [14]:

Şekil 1.21. Üçgen savaklarda C ve k sabitleri

$$C = 0{,}607165052 - 0{,}000874466963\ \Theta + 6{,}10393334 * 10^{-6}\ \Theta^2 \quad (1.72)$$

$$k(m) = 4{,}41655 * 10^{-3} - 1{,}03495 * 10^{-4}\ \Theta + 1{,}00529 * 10^{-6}\ \Theta^2 - 3{,}23745 * 10^{-9}\ \Theta^3 \quad (1.73)$$

Önerilen montaj şartları ve denklemin uygulaması [20]:

- h, savak öncesi savaktan 4h uzaklıkta ölçülmelidir.
- Savağın kalınlığı önemli değildir, ancak suyun eşiğin V kısmından geçtiği bölümünün kalınlığı önemlidir ve V kısmının kalınlığı 0,8-2 mm aralığında olmalıdır.
- Savak sonrası su yüzeyi, V 'nin alt kısmından en az 6 cm aşağıda olmalıdır (böylece suyun serbest akışı sağlanır).
- Bağıntılar $h < 38$ cm ve $h/P < 2{,}4$ için geliştirilmiştir.
- Bağıntılar tam daraltılmış üçgen savaklar için geliştirilmiştir ($h/B \leq 0{,}2$ olmalıdır).
- Daralma bölümü ortalama genişliği $(B) > 91$ cm olmalıdır.
- V 'nin tabanı savak öncesinin dibinden en az 45 cm yukarıda olmalıdır.
- Eğer savak yukarıda belirtilen şartların bazılarını karşılamıyorsa söz konusu savak "kısmen daraltılmış" üçgen savak olabilir. Bu durumda $h/B \leq 0{,}4$ olması; V'nin tabanını n savak öncesinde dipten 10 cm yukarıda olması; daralma bölümünün 61 cm genişliğinde olması; $h < 38$ cm yerine 61 cm'ye kadar olabilmesi yeterlidir. Bu durumda C için farklı grafik vardır [24].

Tepe açısı 60° ve 90° olan üçgen savaklar için savak yükü- debi grafiği Şekil 1.22'de verilmiştir.

Trapez (Cipoletti) savaklar: Trapez savaklarda temel prensip, deşarjın su yüksekliği (h) ile orantılı olmasıdır. Bu mesafe su seviyesi (h) olarak adlandırılır (Şekil 1.18). Trapez savaklarda yan eğimler dik/paralel = 4,1'dir. Trapez savaklar tam daraltılmış olarak kabul edilirler. Deşarj katsayısı $C = 3{,}367$ olup, dikdörtgen savaklar gibi L veya P'ye bağlı değildir. U savaklar için USBR [18] şu bağıntıyı önermektedir:

$$Q = 65{,}6\ L\ h^{3/2} \quad (1.74)$$

Burada;
Q : debi, m^3/s
L : savak uzunluğu, m
H : su seviyesi, m

L, su yüzeyi boyunca değil, savağın dibi boyunca ölçülür.

Önerilen montaj şartları ve uygulama [18]:

- Yanal yüzlerin eğimi dik/paralel = 4,1 olmalıdır.
- H, savak öncesi savaktan en az $4h$ uzaklıkta ölçülmelidir.
- Savağın açılma bölümünde kalınlığı 0,8-2 mm arasında olmalıdır.
- Savak sonrası su yüzeyi trapezin alt kısmından en az 6 cm aşağıda olmalıdır.
- Ölçülen su seviyesi $h > 6$ cm ve $h < L/3$ olmalıdır.
- P, kanal öncesi kanal dibinden ölçülür ve $P > 2h_{maks}$ (h_{maks}= maksimum beklenen su seviyesi) olmalıdır.
- B, kanalın yanlarından ölçülür ve $b > 2h_{maks}$ olmalıdır.

Toplam debi : $Q = q\frac{L}{a} - \frac{8}{15}\, C_d\, tg\, \alpha \sqrt{2g}\, h^{5/2}\, \frac{L}{a}\, [m^3/s]$

Bir üçgen savak için debi : $q = \frac{8}{15}\, C_d\, tg\, \alpha \sqrt{2g}\, h^{5/2}\, \frac{L}{a}\, [m^3/s]$

Savak uzunluğu : $L\, [m]$

Savak yükü : $h\, [m]$

Savak katsayısı : $C_d = 0{,}565 + 0{,}087\, h^{-1/2}$

Şekil 1.22. Üçgen savaklarda hidrolik yük ve debi arasındaki bağıntı [3]

1.3.1.3.İz Madde Enjeksiyonu Yöntemi ile Debi Ölçümü

Türbülanslı akışlarda, çok yüksek veya düşük hızlarda akan suda fazla katı madde hareketi olması gibi durumlarda debi ani veya sürekli akıtma yöntemleri ile ölçülür.

Ani akıtma yöntemi: Akan suya bir kesitten ani olarak bir iz maddesi (kimyasal tuz, floresan madde veya zararsız bir radyoaktif madde) katılır. Aynı hat üzerinde başka bir kesitte bu iz maddesinin konsantrasyonunun zamanla değişimi ölçülür. Suya ilave edilen maddenin hacmi V_1, içindeki izleyici konsantrasyonu C_1, iz maddesi konulmadan önceki konsantrasyon C_0 ise, hat üzerindeki kesitte zamana göre ölçülen konsantrasyon değişimi C(t) olduğuna göre akarsuyun debisi kütle korunumu prensibinden (1.75) formülü ile hesaplanır.

$$Q = \frac{V_1 C_1}{\sum_0^\infty -(C - C_0)\Delta t} \tag{1.75}$$

Konsantrasyon değişiminin yeterli hassasiyetle ölçülmesi zor olduğundan bu yöntemin uygulanmasında zorluklarla karşılaşılır.

Sürekli enjeksiyon yöntemi: Bu yöntemde iz maddesi enjeksiyonu sürekli olarak yapılır. Enjeksiyon süresi hattaki ölçüm istasyonunda ölçülen izleyici konsantrasyonunun sabit bir C_2 değerine erişmesine olanak verecek kadar uzun olmalıdır. Akan suya birim zamanda katılan kimyasal hacmi Q_1, çözeltideki izleyici konsantrasyonu C_1 olduğuna göre yine kütle korunumu prensibinden akan suyun debisi hesaplanır (1.76).

$$QC_0 + Q_1 C_1 = (Q + Q_1)C_2$$

Başlangıçtaki iz maddesi konsantrasyonu $C_0 = 0$ kabul edilerek:

$$Q = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} Q_1 = \left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right) - Q_1 \tag{1.76}$$

Bu yöntemin uygulaması daha kolaydır.

Bu yöntemler kullanılırken iki kesit arasındaki uzaklığın iz maddesinin tam olarak karışmasını sağlamaya yetecek kadar uzun olmasına dikkat etmek gerekir. Yanal doğrultuda karışma düşey doğrultudaki karışmaya göre daha yavaş olduğundan enjeksiyonun kesitin çeşitli noktalarında birden yapılması daha uygundur.

1.3.1.4.Yüzgeçlerle Debi Ölçümü

Daha basit bir hız ölçme yöntemi de akı m tarafından sürüklenen yüzgeçlerin belli bir yolu almaları için geçen zamanı n ölçülmesi ile gerçekleşir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için akan suda yeterli uzunlukta (en az kesit genişliğinin 5 katı) düz bir parça bulunmalıdır [25]. Su yüzünde hareket eden bir yüzgeç kullanılıyorsa ortalama hızı bulmak için yüzgecin hızı 0,8-0,9 gibi bir katsayı ile çarpılır. Akımın derinliği boyunca uzanan yüzgeçlerle ortalama hız için daha güvenilir bir değer elde edilir. Çok sayı da yüzgeç kullanılıp sonuçların ortalaması alınarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilir. Ancak genellikle yüzgeçlerle elde edilen sonuçlar çok hassas değildir. Taşkın vb. gibi sebeplerle diğer yöntemlerin kullanılamadığı özel durumlarda bu yöntem kullanılır.

KAYNAKLAR

[1] OSİB (2012). Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi. İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Odakent Altyapı ve Çevre Çözümleri, Mühendislik, Müşavirlik Araştırma ve Geliştirme Tic. Ltd. Şti.

[2] Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[3] Muslu, Y. (1996). Atıksuların Arıtılması, Cilt I ve II, İTÜ Yayını.

[4] Imhoff, K. R., Imhoff, K. (1985). Taschenbuch der Stadtentwasserung. München: 26. überarbeitete Auflage. R. Oldenbourg.

[5] Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Aydın, A.F., Alp, K., Arıkan, O., İnsel, G., Altınbaş, M. (2012). Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi. OSİB, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.

[6] Eroğlu, V. (2002). Atıksuların Tasfiyesi, Su Vakfı Yayınları.

[7] Öztürk, İ. (2007). Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, 2. Baskı, Su Vakfı Yayınları.

[8] Arceivala, S. J. (2002). Çevre Kirliliği Kontrolünde Atıksu Arıtımı. (Çeviren: V. Balman). Tata – Mc Graw Hill.

[9] ÇOB (2010). Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı), Resmi Gazete Tarih: 20.03.2010, Sayı: 27527.

[10] Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J.C., Arvin, E. (2002). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Prosesses. Springer-Verlag Publishing.

[11] American Society of Mechanical Engineers (ASME FED) (1971). Fluid Meters, Their Theory and Application - Sixth Edition.

[12] American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2001). Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Meters. ASME MFC-14M-2001.

[13] UNIMAG Electromagnetic Closed Pipe Flow Meter. Application Guide, ISCO.

[14] LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. (2002).

[15] International Organization of Standards (ISO 5167) (1991). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices, Part 1: Orifis plates, nozzles, venturi tubes inserted in circular cross-section running full. Reference number: ISO 5167-1:1991(E).

[16] International Organization of Standards (ISO 4359) (1999). Technical Corrigendum 1 for: Liquid flow measurement in open channels-Rectangular, trapezoidal, and U -shaped flumes. Reference number: ISO 4359: 1983/Cor.1:1999 (E).

[17] American Society for Testing and Materials (ASTM D1941-91) (1991). Standard test method for open channel flow measurement of water with the Parshall flume.

[18] USBR (1997). US Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Water measurement Manual. 3ed.

[19] International Organization of Standards (ISO 9826) (1992). Measurement of liquid flow in open channels - Parshall and SANIIRI flumes.

[20] Palmer, H. H. and Bowlus, T. D. (1936). Adaptation of Venturi Flumes to Flow Measurement İn Conduits, Trans. ASCE, vol 1. 101, p.1195.

[21] Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G. (1981). Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater. New York: McGraw-Hill.

[22] International Organization of Standards (ISO1438/1) (1980). Water flow measurement in open channels using weirs and venture flumes-Part 1: Thin plate weirs. ISO 1438/1-1980 (E)

[23] American Society for Testing and Materials (ASTM) (1993). ASTM D5242. Standard test method for open channel flow measurement of water with thin-plate weirs.

[24] Kindsvater, C. E., Carter, R. W. (1959). Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs. Transactions, American Society of Civil Engineers. Vol.24. Paper No. 3001.

[25] Perry, R., Gren, D. W. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook, seventh edition, McGraw-Hill International Editions.

[26] Bayazıt, M. (1995). Hidroloji, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.

[27] Davis, L. D. Çeviri Editörü: İsmail Toröz (2015). Su ve Atıksu Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi.

[28] Gas Processors Suppliers Association (1976). Engineering Data Book. Tulsa, Oklahoma, Ninth Edition.

[29] İller Bankası A.Ş. (2000). İçmesuyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname

[30] İller Bankası A.Ş. (2000). Kanalizasyon Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname

[31] Kanal Proje İhale Dokümanları, Form No: SPR 01 REV 09/87 T. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü.

[32] Qasim, S. R. (1985). Wastewater Treatment Plants, Treatment, Design, and Operation. CBS Publishing Japan Ltd.

[33] Su Proje İhale Dokümanları, Form No: SPR 01 REV 09/87 T. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü.

KADIKÖY ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ

2. ATIKSU HİDROLİĞİ

[1] *Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Suyun basınçlı ortamda iletilmesini sağlayan atmosfere kapalı yapılara borulu sistemler denir. Normal şartlar altında suyu kısmen dolu olarak geçiren yapılar ise açık kanallardır. Boru ve açık kanallarda gözlenen akımlarda aynı hidrolik prensipler geçerlidir. Dolayısıyla her iki akıma ait hidrolik problemlerin çözümünde aynı temel formüller kullanılır. Arıtma tesisi tasarım projesinde, arıtma üniteleri, bağlantı boruları ve diğer bileşenler yerleştirildikten sonra boru hattı boyunca sürtünme kayıpları ve arıtma ünitelerindeki yük kayıpları hesaplanır. Hidrolik profil, arıtma tesisindeki hidrolik seviye (piyozometre) hattının su yüzeyi profili olarak grafik ile gösterilmesidir. Proje üzerinde arıtma üniteleri ve boruların konumları, suyun cazibe ile akabilmesini sağlamak üzere gerekli hidrolik eğim verilerek belirlenir.

Atıksu arıtma tesisi planlanırken başlangıç noktası arazi topografyasına göre seçilir. Yeterli eğim varsa giriş yapılarındaki kayıplar hesaplanır, aşağı (mansaba) doğru hareket edilerek uygun noktalarda hidrolik tahkikler yapılır. Yeterli eğim yoksa projelendirmeye deşarj noktası tarafından (mansaptan) başlanır ve ters istikamette yukarıya (memba) doğru çıkılır. Yük kayıpları hesaplanarak kontrol noktalarının kotları tespit edilir. Kontrol noktası olarak alıcı sudaki yüksek su seviyesi seçilerek hesaplamalar kaynağa doğru ilerletilir veya girişteki terfi merkezinin her iki tarafına doğru hidrolik profil çıkartılır. Yeterli hidrolik eğim verilmediğinde birçok işletme problemi doğabilir, hatta pik yüklemede kontrol dışı taşmalar yaşanabilir [1], [2].

2.1. Boru ve Açık Kanal Akımlarıyla İlgili Tanımlar ve Temel Denklemler

Boru ve açık kanal akımın analizi, akışkanlar mekaniğindeki 3 temel denklemin uyarlanmasına dayanmaktadır: süreklilik denklemi, enerji denklemi ve momentum denklemi. Bu ve benzeri kavramlara geçmeden önce hidrolikte sıklıkla kullanılan bazı terimler açıklanacaktır [3].

Laminer akım: Akışkanın her taneciği, sabit hızda boru eksenine paralel hareket ederek boru içerisinde düzgün bir akımın oluşmasını sağlar. Bunun için Re<2000 olmalıdır.

Türbülanslı akım: Akışkanın her taneciği farklı hız ve yönde gelişigüzel hareket eder ve girdap oluşturur. Bu nedenle akışkan tanecikleri boru kesitinde düzgün olmayan bir akımın oluşmasına sebebiyet verirler. Akım şartlarının belirlenmesinde Reynolds (Re) sayısının büyüklüğü önemli bir parametredir (Re>2000). Re, 2000'e çok yakınsa sistem karasız olup, Laminer ve türbülanslı akış arasında salınır.

$$R_e = \frac{V\,D}{\nu} \tag{2.1}$$

Burada;

V : akışkanın boru içindeki ortalama hızı, m/s
D : borunun iç çapı, m
ν : akışkanın kinematik viskozitesi, m^2/s (suyun çeşitli sıcaklıklardaki kinematik viskozitesi Tablo 2.1'de verilmiştir)

Hidrolik yarıçap (R): Dolu olarak su geçiren d çap ve r yarıçapındaki daire kesitli bir boruda $r/2$ veya $d/4$ alınır.

Islak kesit (F): Akışkanın doğrudan temas ettiği boru kesitidir.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Islak çevre (P): Akışkanın temas ettiği kanal veya boru duvarı, ıslak kesitin çevresini oluşturur. (Tam dolu olmayan kanal veya borudaki akışlarda ıslak çevreye hava ile temas eden kısım girmez.)

Tablo 2.1. Suyun farklı sıcaklıklardaki kinematik viskozitesi [4]

Sıcaklık °C	*Kinematik viskozite m^2/s, 10^6*
0	*1,79*
10	*1,31*
20	*1,01*
30	*0,804*
40	*0,661*
50	*0,556*
60	*0,477*

Boru ve açık-kanal akımı: Kapalı kanaldaki sıvının akımı, serbest sıvı yüzeyinin atmosferle temas edip/etmemesine göre boru (veya kapalı kanal) akımı veya açık kanal akımı olarak sınıflandırılabilir. Örneğin bir atıksu/kanalizasyon borusu; tam dolu veya basınçlı olarak akıyorsa, bu akım boru akımı olarak tanımlanır; kısmi dolu bir boru veya açık kanaldan aktığında ise açık kanal akımı olarak tanımlanır. Şekil 2.1'de boru ve açık kanal akımları kıyaslanmıştır.

Şekil 2.1. Açık kanal ve boru akımlarının kıyaslanması

Yük kaybı: Akışkanın boru ve açık kanallardan akışı sırasında meydana gelen enerji kaybına yük kaybı adı verilir. Türbülanslı akımda sürtünmenin etkilerinin üstesinden gelebilmek için gerekli enerji yük kaybına eşittir. Boru hatlarında ve açık kanallarda kullanılan ekipmandan dolayı oluşan türbülans nedeniyle meydana gelen enerji kaybı da yük kaybı olarak görülmektedir. Yük kaybı genellikle h_L sembolüyle gösterilmektedir.

Piyozometre çizgisi: Şekil 2.1'de de gösterilen hidrolik eğim (piyozometre) çizgisi, sıvı içerisine piyozometre tüpleri yerleştirildiğinde herhangi bir boru veya açık kanal boyunca sıvının yükseldiği çeşitli noktaları birleştiren bir çizgidir. Piyozometre çizgisi, söz konusu çeşitli noktalarda uygun basınç yükünün göstergesidir. Piyozometre çizgisi, açık bir kanalda akan suyun su yüzey profiliyle çakışır.

Enerji çizgisi: Referans düzeyinde herhangi bir kesitte akımın toplam enerjisi; topografik yükseklik z, basınç yüksekliği y ve hız yüksekliği $\frac{V^2}{2g}$ toplamına eşittir. Farklı kesitlerdeki enerji, genellikle enerji çizgisi veya enerji gradyanı olarak ifade edilen bir çizgi ile temsil edilir (Şekil 2.1). Sürtünme kayıpları sıfır olduğunda enerji çizgisi yatay kalsa da, yükseltiler arasında enerjinin rölatif dağılımı değişim gösterebilir. Fakat tüm gerçek sistemlerde enerji kaybı akımın

direncinden dolayı meydana gelir ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji çizgisi de yatay değil eğimli olacaktır.

Spesifik (özgül) enerji: Özgül enerji E, bir diğer adıyla özgül yük, basınç yüksekliği y ve hız yüksekliğinin $\frac{V^2}{2g}$ toplamına eşittir. Özgül enerji kavramı, özellikle açık kanal akımlarının analizinde kullanılır.

Sabit bir akım hızı için özgül enerji ve akım derinliği arasındaki ilişki genellikle özgül enerji diyagramı olarak adlandırılmakta olup Şekil 2.2'de verilmiştir. Sabit özgül enerji için, kanalın birim genişliği başına debi ile akımın derinliği arasındaki ilişki q eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 2.2 (b)).

Şekil 2.2. (a) Özgül enerji diyagramı; (b) q eğrisi

Sabit akım: Herhangi bir kesitte debi ya da akım hızı sabit olduğunda sabit akım meydana gelir.

Üniform ve üniform olmayan akım: Bir kesitten diğer kesite derinlik, kesitsel alan ve akımın diğer unsurlarının önemli ölçüde değişmediği durumda üniform akım meydana gelir. Eğim, kesitsel alan ve hızın kesitten kesite değiştiği durumda ise üniform olmayan akım oluşur. Akım ölçümleri için kullanılan Venturi savağı kesitinden geçen akım, üniform olmayan sabit akıma örnek olarak verilebilir.

Değişken akım: Kanal uzunluğu boyunca akım derinliği değişiyorsa kanaldaki akım değişken olarak nitelendirilir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi genel olarak akım, tedrici değişken (TDA) veya hızlı değişken (HDA) olabilir. Akımın derinliği aniden değiştiğinde hızlı değişken akım meydana gelmektedir.

Şekil 2.3 Değişken akım

2.1.1. Süreklilik Denklemi

Süreklilik denklemi, bir akım borusundaki kontrol hacminde kesitten kesite kütle korunumunu ifade eder (Şekil 2.4). Kütle korunumu kanununa göre, A_1 ve A_2 kesitleri arasında kütle yok edilemez veya oluşturulamaz.

Şekil 2.4. Akım borusu kontrol hacmi boyunca akım

Süreklilik denklemi şu şekilde yazılır:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \tag{2.2}$$

Burada,

P : akışkan yoğunluğu, kg/m^3
A : kesitsel alan, m^2
V : hız, m/s
Q : debi, m^3/s

Akışkan sıkıştırılamıyorsa o halde $\rho_1 = \rho_2$ olur ve süreklilik denklemi

$$A_1V_1 = A_2V_2 = Q_1 = Q_2 \tag{2.1}$$

halini alır.

1.1.1. Enerji Denklemi

Akış halindeki bir akışkan 4 çeşit enerjiye sahiptir: basınç enerjisi E_p, hız enerjisi E_v, potansiyel enerji E_q ve termal veya iç enerji E_i. E_m sıvıdan (-) veya sıvıya (+) transfer edilen mekanik enerjiyi (örneğin pompa, türbin vb.), ve E_h sıvıdan (-) veya sıvıya (+) transfer edilen ısı enerjisini (örneğin ısı değiştiricisi) temsil ediyor ise Şekil 2.5'teki 1 ve 2 noktaları arasında enerjinin korunumu kanunu aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$(E_p + E_v + E_q + E_i)_1 \pm E_m \pm E_h = (E_p + E_v + E_q + E_i)_2 + kayıplar \tag{2.2}$$

Denklem 3'teki kayıplar, sürtünmeden dolayı tersinemez faktörler tarafından geri kazanılamaz enerji formuna dönüştürülen enerjiyi temsil etmektedir (örneğin ısı veya titreşim olarak kaybedilmiş enerji).

Sıkıştırılamaz bir sıvı için genel ifade şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{{V_1}^2}{2g} + z_1 \pm E_m \pm E_h = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 + h_L \tag{2.3}$$

Burada,

p_1, p_2	: basınç, kN/m^2
γ	: suyun spesifik ağırlığı, kN/m^3
α_1, α_2	: kinetik enerji düzeltme faktörleri
g	: yerçekimi ivmesi, 9,81 m/s^2
z_1, z_2	: belli bir referans düzlemi üstündeki akım borusu yüksekliği
h_L	: yük kaybı, m

Şekil 2.1. Enerji denkleminin tanımına ait çizim

Laminer akımlı borular için α değeri 2,0'dır. Türbülanslı akıma sahip borularda ise α değeri 1,01 ile 1,10 arasında değişmektedir. Şu ana dek türbülanslı akım en sık karşılaşılan akım

türüdür ve uygulamada α, birim değerde (=1,0) alınır. Yük kaybı terimi h_L, iç enerjideki değişiklik ve kayıpları temsil eder. Söz konusu akışkan ideal (sürtünmesiz) mekanik veya ısı enerjisi transferi mevcut değilse Denklem (2.5), Bernoulli'nin yaygın olarak bilinen formunu alır:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 \tag{2.6}$$

Enerji veya Bernoulli denkleminin bir hazneden su ileten boru hattındaki akıma uygulanması Şekil 2.6'da görülmektedir. 1 ve 2 noktaları arasında enerji denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$H = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + z_1 + h_{giriş} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 + h_{giriş} + h_{f\,1-2} \tag{2.7}$$

Burada,

H : toplam yük, m
h_{en} : boru girişindeki yük kaybı, m
$h_{f\,1-2}$: 1 ve 2 noktaları arasında sürtünmeden kaynaklanan yük kaybı, m

Şekil 2.6. Bir boru hattına enerji denkleminin uygulanması

Pompalar ve terfi hatları enerji denklemi uygulamasında bir diğer örnektir (Şekil 2.7). Böyle bir durumda, 1 ve 2 noktaları arasında enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + z_1 + E_p = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 \tag{2.8}$$

Şekil 2.7. Bir pompaya enerji denkleminin uygulanması

Yük kaybı terimi h_L akışkan akımına uygulanan tüm enerji denklemlerinde bulunmaktadır. Denklem (2.8)'de E_p pompa içerisindeki yük kaybını da hesaba katarak pompa tarafından temin edilen net enerjiyi temsil eder. h_L'yi, geometrik özellikler, akışkan karakteristiği ve debinin (hem açık kanal hem de kapalı boru akımlarında) bir fonksiyonu olarak belirlemek için çeşitli denklemler kullanılabilir.

Yük kaybı terimi h_L, sürtünmeden kaynaklanan yük kaybı h_f ve akım geometrisinin süreksizliğinden ileri gelen diğer (yersel) yük kayıplarını (daralmalar, genişlemeler, sapmalar) içermektedir. Bunlar nispeten önemsiz kayıplar olarak adlandırılmaktadır [3].

2.1.3. Momentum Denklemi

Skaler bağıntılar olan süreklilik ve enerji denklemlerinin aksine momentum denklemi, kuvvet ve hızın büyüklük ve yönünün önemli olduğu vektörel bir bağıntıdır. Momentumun korunumu kanunu; "Akım yörüngesi boyunca momentumdaki değişimin zamansal hızı (akımın kütle hızı olan ρAV'nin V hızına oranı olarak tanımlanır) itici güç adı verilen bir kuvvet ile sonuçlanır" ifadesiyle bilinir.

Şekil 2.4'te görülen borudaki akımın analizine momentum denkleminin uygulanması aşağıdaki şekildedir: A_1 alanı boyunca dt süresince taşınan momentum;

$$(A_1\ boyunca\ taşınan\ kütle)V_1 = (\rho_1 A_1 V_1 dt)V_1 \tag{2.9}$$

Bu momentum V_1 yönündedir. Aynı şekilde, dt süresince A_2 alanı boyunca taşınan momentum aşağıdaki ifadeye eşittir:

$$(\rho_2 A_2 V_2 dt)\ V_2 \tag{2.10}$$

Kesit 1 ve 2 arasındaki momentum değişiminden kaynaklanan akışkandaki net kuvvet,

$$F = \frac{(\rho_2 A_2 V_2 dt)V_2 - (\rho_1 A_1 V_1 dt)V_1}{dt} \quad (2.4)$$

$$F = M\,(V_1 - V_2) \quad (2.5)$$

Olup burada,

$M = kütle = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_1 A_1 V_1$

Denklem (2.11)'deki $V_2 - V_1$ değeri, hızdaki vektörel değişimi temsil etmektedir.

Momentum denklemi, boru sapmalarında meydana gelen kuvvetleri (dirsek yükleri) analiz etmede sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, su sapma noktasından geçerken momentumdaki değişimden kaynaklanan kuvvetleri dengelemek ve mevcut dengeyi korumak için F_x ve F_y kuvvetleri uygulanmıştır. Momentum denklemi uygulandığında,

x yönünde,

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 cos\theta - F_x = \rho Q(V_2 cos\theta - V_1) \quad (2.6)$$

y yönünde,

$$p_2 A_2 sin\theta - W - F_y = -\rho Q V_2 sin\theta \quad (2.7)$$

kuvvet bileşenleri oluşur.

Dengeyi sağlamak için gereken F_x ve F_y kuvvetleri, boru yüzeyine eklenen destekleyici yapılar, tespit kuleleri, askılar, bağlantı çubukları ve benzeri yapılar ile karşılanır.

Şekil 2.2. Momentum denkleminin boru sapmalarına uyarlanması uygulaması

Momentum ve süreklilik kanunları dikdörtgen bir açık kanalda gerçekleşen hidrolik sıçrama için yazılan denklemde de kullanılabilir (Şekil 2.9).

$$\sum F_x = F_1 - F_2 = \frac{\gamma {y_2}^2}{2} - \frac{\gamma {y_1}^2}{2} = \rho y_2 {V_2}^2 - \rho y_1 {V_1}^2 \quad (2.8)$$

Süreklilik denkleminden,

$$V_1 y_1 (birim\ genişlik) = V_2 y_2 (birim\ genişlik) \quad (2.9)$$

Yazılıp Denklem (2.15) kullanılarak V_2 terimi götürülür ve aşağıdaki denklem elde edilir:

$$y_2 = \frac{-y_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{y_1}{2}\right)^2 + \frac{2y_1{V_1}^2}{g}} \tag{2.17}$$

y_1 değerini bilinen mansap durumlarıyla hesaplamak için Denklem (2.17)'deki alt indisler birbirleriyle yer değiştirir.

Sıçramadan önceki ve sonraki derinlikler (y_1 ve y_2) eşlenik derinlikler olarak adlandırılmaktadır [3].

Şekil 2.9. Momentum eşitliğinin hidrolik sıçrama olayına uygulanması

2.2. Boru ve Açık Kanallarındaki (Sürekli) Yük Kayıpları

2.2.1. Dolu Akan Borularda Sürekli Yük Kayıpları

Dolu akışlı borularda yük kayıplarının hesapları için çeşitli ampirik formüller kullanılmaktadır. Colebrook-White formülü her türlü akışkana uygulanabilirliği nedeniyle birçok ampirik formüle tercih edilir olmuştur. Ancak kompleks matematiksel yapısı dolayısı ile kullanımı daha kolay eşdeğer bazı ampirik formüller de kullanılmaktadır.

2.2.1.1.Darcy-Weisbach Formülü

Bu eşitlik aynı zamanda Darcy-Weisbach formülü olarak da bilinir. Ana iletim hatlarında yük kaybı hesabında kullanılır:

$$J = \frac{f}{D}\frac{v^2}{2g} \tag{2.18}$$

Burada;

J : yük kaybı, (m su sütunu/m boru boyu), boyutsuz
f : yük kaybı katsayısı (sürtünme katsayısı), boyutsuz
D : boru iç çapı, m
g : yerçekimi ivmesi, m/s^2

Darcy yük kaybı (sürtünme) katsayısı, f, borulardaki rölatif pürüzlülük oranı $\varepsilon = \frac{k_s}{D}$ ve Re sayısına bağlı olarak Moody diyagramından alınır (Şekil 4.1). Çeşitli boru malzemeleri için tipik pürüzlülük (k_s) değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli boru malzemeleri için tipik k_s değerleri [5]

Malzeme	k_s *(cm)*
Perçinli çelik	*0,09-0,9*
Beton	*0,02-0,2*
Fırınlanmış ahşap	*0,02-0,09*
Dökme demir	*0,026*
Galvanizli demir	*0,015*
Asfaltlanmış dökme demir	*0,012*
Ticari çelik	*0,046*
PVC	*0,00021*
Çekme boru	*0,00015*

Problem 2.1.

Moody diyagramı ve Darcy-Weisbach denkleminin kullanımı. 1 m çaplı ticari çelik borunun 500 m'lik kesiminde, enerji çizgisinde 2 m'lik düşü meydana geldiği durumdaki debiyi bulunuz.

Çözüm:

1. *Sürtünme faktörü f için bir değer seçilir. İlk yaklaşım olarak Şekil 2.11'den akımın tam türbülanslı olduğu varsayımı ile f değeri belirlenir.*
2. *Denklem (2.19) kullanılarak debi hesaplanır.*

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \qquad (2.19)$$

$$Q = \left[\frac{h_L \pi^2 g D^5}{8fL}\right]^{1/2} = \left[\frac{(2\ m)\pi^2(9{,}81\ m/s^2)(1\ m)^5}{8(0{,}0105)(500\ m)}\right]^{1/2} = 2{,}15\ m^3/s$$

Bu noktada, akımın tam türbülanslı olduğu kabul edilerek grafikten seçilen sürtünme faktörünün doğruluğu kontrol edilmelidir. Eğer Şekil 2.10'dan bulunan f değerinin ilk değerden farklı olduğu belirlenmişse, yukarıdaki hesaplamalar belirlenen yeni f değeriyle tekrardan yapılmalıdır.

3. *Akışkan hızı hesaplanır.*

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2{,}15\ m^3/s}{(\pi/4)(1\ m)^2} = 2{,}74\ m/s$$

4. *Reynolds sayısı belirlenir. Sıcaklığın 15°C, kinematik viskozitenin* $1{,}14 * 10^{-6} m^2/s$ *olduğu varsayılmıştır.*

$$R_e = \frac{VD}{\nu} = \frac{(2{,}74\ m/s)(1\ m)}{(1{,}14\ \times 10^{-6} m^2/s)} = 2{,}4 * 10^6$$

5. *Adım 4'te elde edilen Reynolds sayısı temel alınarak*
6. *Şekil 2.10'dan yeni f değeri elde edilir.*

$$f = 0{,}0115$$

7. *2 ile 4 arasındaki adımlar yeni f değeriyle tekrarlanır. Aşağıdaki debi ve Reynolds sayısı değerleri elde edilir:*

$$Q = 2{,}05\ m^3/s$$

$$Re = 2{,}3 * 10^6$$

8. *Şekil 2.10 kontrol edilerek bir önceki iterasyondan elde edilen f değerinin değiştirilmesi gerekip gerekmediği belirlenir. Burada f değerinde bir değişiklik olmadığından, adım 6'da elde edilen debi değeri doğrudur.*

Şekil 2.10. Moody diyagramı ($\boldsymbol{k_s}$ /D – R_e ilişkisi)

Şekil 2.11. Moody diyagramı (***k_s***/D – Boru cinsi/çapı ilişkisi)

2.2.1.2.Manning Formülü

Kısmen dolu boru hatlarındaki (ve açık kanallarda) yük kayıpları için:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \tag{2.20}$$

Tam dolu akışlı borularda yük kaybı formülü:

$$v = \frac{1}{n} (D/4)^{2/3} J^{1/2} \tag{2.21}$$

Burada;

n : Manning formülünde pürüzlülük katsayısı, boyutsuz
v : ilgili bölümdeki ortalama sıvı akış hızı, m/s
R : hidrolik yarıçap, (S/ P) , m
S : ıslak kesit, m^2
P : ıslak çevre, m
D : boru çapı, m

Muhtelif borular için n değerleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Muhtelif borular için Manning pürüzlülük ($\boldsymbol{n}$) katsayısı değerleri [6]

Boru, kanal cinsi	$\boldsymbol{n}$
Çelik boru	*0,010-0,013*
Font boru	*0,011-0,013*
Asbestli çimento boru	*0,010-0,012*
CTP, YYPE, PVC ve PE boru	*0,009-0,012*
Betonarme boru	*0,012-0,018*
Beton kaplı kanal	*0,014-0,018*
Düzgün enkesitli toprak kanal	*0,020-0,025*
Kazılmış toprak kanallar	*0,025-0,030*
Tabanı taş, şevleri bitkiyle kaplı kanal	*0,030-0,040*
Doğal nehir kanalı	*0,030-0,050*

Manning formülü açık kanallar ve türbülanslı pürüzlü akım şartları için basınçlı boruların hidrolik tasarımında en yaygın kullanılan ifadedir.

2.2.1.3.Hazen-Williams Formülü

Hazen-Williams formülü de yük kaybı hesaplarında sıkça kullanılır. Bu formülde yük kaybı, yük kaybı katsayısının (C_{wh})'nin fonksiyonu olarak tanımlanır. C_{wh}, borunun çapı ve iç yüzeyinin pürüzlülüğüne göre değişir. Temel bağıntı:

Kısmen dolu boru ve açık kanallarda,

$$v = 0{,}85\, C_{wh}\, R^{0{,}63}\, J^{0{,}54} \tag{2.22}$$

Tam dolu kanallarda ise,

$$J = 6{,}824 \left(\frac{v}{C_{wh}}\right)^{1{,}852} D^{-1{,}167} \tag{2.23}$$

$$v = 0{,}85 \left(\frac{D}{4}\right)^{0{,}63} C_{wh}\, J^{0{,}54} \tag{2.24}$$

Burada;

C_{wh} : Hazen-William formülünde pürüzlülük katsayısı, boyutsuz
R : Hidrolik yarıçap, boyutsuz
v : akım hızı, m/s'dir.

Muhtelif borular için C_{wh} değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.1. Muhtelif borular için Hazen-Williams formülü $\boldsymbol{C_{wh}}$ katsayısı değerleri [5]

Boru tipi	$\boldsymbol{C_{wh}}$
Asbestli çimento boru	*140*
Pirinç boru	*130-140*
Düktil font boru	
Yeni	*130*
Eski	*40-120*
Betonarme veya betonarme çizgili boru	
Çelik formunda	*140*
Tahta formunda	*120*
Bakır boru	*130-140*
Galvanizli demir boru	*135*
Cam boru	*140*
Kurşun boru	*130-140*
Plastik boru	*140-150*
Çelik (yeni) boru	*140-150*
Kalaylı boru	*130*

Hazen-Williams formülü türbülanslı akış şartlarında ($Re \geq 2000$) her türlü sıvı ve gaz akışkanlarına (özellikle içmesuyu isale ve şebeke borularında) uygulanabilir; ancak yüksek miktarda AKM içeren sıvı akışkanların yük kayıplarının hesaplanması için uygun değildir.

Problem 2.1.

Hazen-Williams formülünün uygulanması. 0,25 m^3/s debili, 500 mm çaplı 1000 m uzunluğundaki boru hattının sürekli yük kaybını belirleyiniz. Borunun Hazen-Williams sabitinin 130 olduğunu varsayınız.

Çözüm.

1. *Hazen-Williams denklemiyle yük kaybı hesaplanır. Denklem (2.25) düzenlenerek yük kaybı hesabı yapılır.*

$$Q = 0{,}278\, C D^{2{,}63} \left(\frac{h_f}{L}\right)^{0{,}54} \tag{2.1}$$

$$\frac{h_f}{L} = \left(\frac{Q}{0{,}278\, C\, D^{2{,}63}}\right)^{1/0{,}54} = \frac{10{,}7\, Q^{1{,}85} L}{C^{1{,}85} D^{4{,}87}} = \frac{10{,}7 \left(0{,}25 \frac{m^3}{s}\right)^{1{,}85} (1000\, m)}{(130)^{1{,}85} (0{,}5\, m)^{4{,}87}}$$

$$\frac{h_f}{L} = \frac{10{,}7 \left(0{,}25 \frac{m^3}{s}\right)^{1{,}85} (1000\, m)}{(130)^{1{,}85} (0{,}5\, m)^{4{,}87}} = 2{,}96\, m$$

1.1.1.1.Prandtl-Colebrook Formülü

Prandtl-Colebrook (PC) formülü;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\, log_{10}\left(\frac{k_s}{3{,}71\, D} + \frac{2{,}51}{Re}\, \frac{1}{f}\right) \tag{2.2}$$

Burada;

k_s : Eşdeğer pürüzlülük katsayısı, m
f : Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı, boyutsuz

Pürüzlülük katsayısı (k_s) değerinin seçilmesi ile Colebrook formülünden f katsayısının hesabı mümkün olmakta ve Darcy formülünden (2.18), J yük kaybı belli akış şartlarında hesaplanabilmektedir.

Prandtl-Colebrook formülünde, $\frac{k_s}{d}$'nin çok küçük olması halinde parantez içindeki ilk terim $\left(\frac{k_s/d}{3,7}\right)$ ihmal edilebilir ve denklem,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\,log\left(R_e\sqrt{f}\right) - 0,8 \tag{2.27}$$

halini alır. Moody diyagramında, türbülanslı pürüzlü akım bölgesinde $Re \to \infty$ için f'nin asimptotik değeri, denklem (2.26)'da parantez içindeki ikinci terim ihmal edilerek,

$$f_{min}^{-1/2} = -2\log(\varepsilon/3,7) \tag{2.28}$$

olur. Hager [7], pratik olarak türbülanslı pürüzlü akım rejimi için f'nin f_{min}'den ~%1,5 sapabileceğini göstermiştir. Bu durumda rölatif pürüzlülüğün limit değeri (ε_r) için,

$$\varepsilon_r = \frac{1050}{Re} \tag{2.29}$$

elde edilir. Dolayısıyla pratikte $\varepsilon > \varepsilon_r$ ise türbülanslı pürüzlü akım kabulü geçerlidir. Bununla birlikte, $\varepsilon < \varepsilon_r$ ise f sürtünme faktörü (2.26) genel eşitliğinden hesaplanmalıdır.

Türbülanslı pürüzlü akım şartlarında PC formülü ile Manning formülü hız değerleri arasındaki fark $\leq$ %5 düzeyinde kalmaktadır.

Cilalı (pürüzsüz) akım rejiminde ($\varepsilon \to 0$), rölatif pürüzlülüğün $\varepsilon_s < \varepsilon < \varepsilon_r$ aralığında kalması halinde türbülanslı geçiş bölgesinde kalındığı için yine denklem (2.26) ile hesap yapılmalıdır.

Zigvang ve Sylvester [18], aşağıdaki ifadeden bulunacak f değerinin Denklem (2.26)'dan elde edilen değerden ~%2 oranında fark edebileceğini belirtmektedir.

$$f = \frac{1}{4}\left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{13}{Re}\right]^{-2} \to \frac{1}{4}\left[log\left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{13}{Re}\right)\right]^{-2} \tag{2.30}$$

Basınçlı borularda 0,5~2,5 m/s'lik hız aralığında sürtünme faktörü $f = 0,020 \sim 0,030$ alınabilir. Yeni borular için pürüzlülük katsayısı genelde $k_s = 0,1 \sim 0,5$ aralığında seçilir.

Prandtl-Colebrook formülünün k_s = 1,0 ve 1,5 mm pürüzlülüğe göre daire kesitli kanallar için hazırlanmış grafikleri Şekil 2.12 - Şekil 2.14'te verilmiştir. Bu grafikler yardımıyla belli bir Q debisini belli bir akım hızıyla geçirecek boru (kanal) çapı ile eğimi kolayca hesaplanabilmektedir.

Şekil 2.12. Daire kesitli kanalların Prandtl-Colebrook'a göre hesabı, k_s = 1,5 mm, $\boldsymbol{\nu}$ =1,31 ∗ 10^{-6} m^2/s

Şekil 2.13. Daire kesitli kanalların Prandtl-Colebrook'a göre hesabı, k_s = 1,5 m, $\boldsymbol{\nu}$ =1,31 ∗ 10^{-6} m^2/s

Şekil 2.14. Yan bağlantısı bulunmayan daire kesitli doğru eksenli kanalların Prandtl-Colebrook'a göre hesabı, k_s = 1,00 mm, $\boldsymbol{\nu}$ =1,31 $*$ 10^{-6} m^2/s

Darcy-Weisbach, Manning ve Hazen-Williams denklemlerinin genel formu,

$$J = \frac{k\,Q^2}{D^5} \tag{2.31}$$

tir. Bu 3 denklem eşitlenip yeniden düzenlenirse, f, n ve c arasında aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$0{,}0827\,f = \frac{10{,}3\,n^2}{D^{1/3}} = \frac{10{,}7\,D^{0{,}13}}{C^{1{,}85}D^{0{,}15}} \tag{2.32}$$

2.2.2. Açık Kanallarda Akım

Açık kanallardaki akım çok büyük bir yaygınlıkla Manning denklemiyle incelenir:

$$V = \frac{1}{n}R^{2/3}J^{1/2} \tag{2.33}$$

R : Hidrolik yarıçap (ıslak kesit/ıslak çevre)

Kanal malzemesine uygun n seçilmek suretiyle, açık kanallardan belli bir J eğimiyle geçecek debi ile su derinliği yukarıdaki eşitlikten bulunabilir.

Açık kanallarda Re sayısı $10^5 < Re < 10^7$ rölatif pürüzlülük $10^{-5} < \varepsilon < 10^{-1}$ aralığında kaldığı için genelde türbülanslı pürüzlü (nadiren geçiş bölgesi) akım şartları hakimdir.

Dikdörtgen kanallar için belli bir eğimde maksimum debiyi geçirecek enkesitte $b = 2h$ şartı sağlanır (optimum enkesit: $b = 2h$). Trapez kesitli kanallar için maksimum debiyi geçirerek enkesitte ise $(b + 2nh)/2 = h\sqrt{n^2 + 1}$ ve $R_h = h/2$ şartları sağlanmalıdır.

Şekil 2.15. Dikdörtgen ve trapez kesitli kanallar

İşletmedeki atıksu ve yağmursuyu kanalizasyon şebekelerinde ise $k_s = 0{,}75 \sim 1{,}5$ (maks. 50 mm) aralığında değişebilir. PC formülü basınçlı su ve atıksu boru şebekeleri ile kanalizasyon sistemlerinin tasarımında yaygın biçimde kullanılmaktadır. PC formülü ile ilgili uygulama detayları için Kaynak [7]'e başvurulabilir.

Problem 2.3.

Manning denkleminin uygulanması. 3 m genişliğinde 0,001 m/m eğime sahip dikdörtgen beton kanalda akım derinliği 1,5 m olduğundaki debiyi belirleyiniz. n = 0,014 olduğunu varsayınız.

Çözüm.

1. *Hidrolik çap R'yi belirleyiniz.*

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(3\ m)(1{,}5\ m)}{3\ m + 2 * (1{,}5\ m)} = 0{,}75\ m$$

2. *Denklem (2.33)'ü alanla çarparak debiyi (Q) hesaplayınız.*

$$Q = \frac{1}{n} A\ R^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{0{,}014} (3\ m * 1{,}5\ m)\ (0{,}75)^{2/3} (0{,}001)^{1/2}$$

$$Q = 8{,}39\ m^3/s$$

<u>Sürekli yük kaybı hesapları için uyarı:</u>

Bölüm 2.2'de verilen ifadelerle hesaplanan yük kayıpları arasında, özellikle pürüzlülük katsayısı kabullerinden kaynaklanan farklılık söz konusudur. Su yerine, yüksek oranda AKM içeren atıksu gibi bir akışkanın iletilmesi durumunda, boru hattının yaşına bağlı olarak boru taban ve yan cidarındaki aşınma ve yumrulanmalar dolayısıyla pürüzlülük k_s önemli oranlarda artabilir ($k_s = 1{,}5 - 50$ mm). Pürüzlülük katsayısı doğru/uygun seçilebildiği takdirde, farklı eşitliklerle bulunan sürekli yük kayıpları birbirine yakın değerler alacaktır.

2.2.3. Dairesel Kesitli Boru Hatlarında Yersel Yük Kayıplarının Hesaplanması

Dairesel kesitli boru hatlarındaki akış şartlarında yersel yük kaybı hesaplamalarında (2.34) formülü kullanılmaktadır. Bu formül, hattın herhangi bir noktasında mevcut genişleme ve daralma ile vana, dirsek ve benzeri bağlantıların olması durumunda, bu noktadaki basınç kaybı hesabında kullanılır. Bu bağlantıların cinsine ve niteliğine bağlı olarak yersel yük kaybı katsayıları (k) değişmekte olup k'nın değeri yük kaybını etkiler.

$$\Delta h = k\ v^2/2g \qquad (2.34)$$

Burada;

Δh : yersel yük kaybı, metre akışkan yüksekliği
v : boru içinde ortalama akışkan hızı, m/s

g : yerçekimi ivmesi, m/s^2
k : boyutsuz sabit, söz konusu yerin tabiatına bağlı yük kaybı katsayısı

Formül (2.34) boruların yapılara giriş ve çıkışlarında, boru daralma ve genişlemelerinde, değişik açılardaki dirseklerde, boru hattı üzerinde mevcut olabilecek muhtelif tip vana, T ve Y bağlantılarında akışın sebep olduğu yerel kayıpların hesaplamalarında da kullanılır. Aşağıda değişik yapı ve bağlantıların sebep olduğu yük kaybı hesaplamalarında kullanılan yük kaybı katsayıları (k) örneklerle verilmiştir:

i. Büyük tanklara boru bağlantısında yük kaybı katsayısı

ÇIKIŞ

(a) Tanktan çıkış-keskin açı ile

k =0,5

$$\Delta h = 0{,}5\frac{v^2}{2g}$$

(b) Çıkış borusu tankın içinden (içeri giren kısım çapın 1-2 katı)

k =1

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g}$$

(c) Yuvarlatılmış çıkış

k = 0,05 (bu ortalama bir değerdir, k profilin yuvarlatılma şekline bağlı);

$$\Delta h = 0{,}05\frac{v^2}{2g}$$

GİRİŞ

k=1

$$\Delta h = 1{,}0\frac{v^2}{2g}$$

ii. Boru dönüşlerinde (dirsekler) yük kaybı katsayısı

a) Geniş açılı (yumuşak) dirsek [1]

$$k = \left(0{,}13 + 1{,}85 - \frac{d}{2r}^{3,5}\right)\frac{\theta}{180} \qquad (2.35)$$

Burada;

k *: yük kaybı katsayısı,* $\Delta h = k\frac{v^2}{2g}$

r *: kıvrımın yarıçapı, m*

d *: borunun iç çapı, m*

θ *: açı, derece*

k, *(2.35) bağıntısından bulunabilir. Ayrıca Tablo 2.5'te* r, d *ve* Θ*'nın fonksiyonu olarak verilmiştir.*

Tablo 2.5. Borularda geniş açılı dönüşlerde çeşitli $\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{d}$ ve Θ değerlerinde yük kaybı katsayısı

$\theta°$ \ r/d	1	1,5	2	3	4
22°5	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
45	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15
60	0,25	0,22	0,21	0,20	0,19
90	0,33	0,29	0,27	0,26	0,26
135	0,41	0,36	0,35	0,35	0,35
180	0,48	0,43	0,42	0,42	0,42

b) Keskin kenarlı dirsek

$$k = 67{,}610^{-2}\,\theta^{2{,}17} \tag{2.36}$$

k, *(2.36) bağıntısından bulunabilir [1].* k *yük kaybı katsayısı, çeşitli* Θ *açıları için Tablo 2.6'da verilmiştir.*

Tablo 2.6. Borulardaki keskin dönüşlerde çeşitli Θ değerlerinde k yük kaybı katsayısı

$\theta°$	22,5	30	45	60	75	90
k	0,17	0,20	0,40	0,70	1,00	1,50

iii. T (Düz boru ile aynı çapta 90° keskin açılı) bağlantılarında yük kaybı katsayısı

a) Gidiş istikametinde dallanma

$$\Delta h = k\frac{{v_t}^2}{2g} \tag{2.37}$$

k ve Δh'ın, düz borunun (k_r ve Δh_r) veya dallanmış kısmın (k_b ve Δh_b) dikkate alınmış olmasına göre ikişer değeri vardır.

Burada;

v_t : Giriş akımı hızı, m/s

k_r ve k_b, Tablo 2.7'de Q_t ve Q_b'nin fonksiyonu olarak verilmiştir

Q_t : Toplam giriş akımı debisi, m^3/s

Q_b : Dallanmış kısımdaki debi, m^3/s

Tablo 2.7. Gidiş istikametinde dallanma olan T bağlantılarında $\mathbf{Q_t}$ ve $\mathbf{Q_b}$'ya göre $\boldsymbol{k_r}$ ve $\boldsymbol{k_b}$ değerleri

Q_b/Q_t	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_r	0,04	-0,08	-0,05	0,07	0,21	0,35
k_b	0,95	0,88	0,89	0,95	1,10	1,28

b) *Gidiş akımına bağlantı*

$$\Delta h = k\frac{{v_t}^2}{2g} \tag{2.38}$$

k ve Δh'ın, düz borunun (k_r ve Δh_r) veya giriş kısmın (k_b ve Δh_b) dikkate alınmış olmasına göre ikişer değeri vardır.

Burada;

v_t : birleşimden sonraki akımın hızı, m/s
k_r ve k_b, Tablo 2.8'de Q_t ve Q_b'nin fonksiyonu olarak verilmiştir
Q_t : toplam birleşimden sonraki akımın debisi, m^3/s
Q_b : dallanmış kısımdaki (yan giriş) debi, m^3/s

Tablo 2.8. Giriş akımına bağlantı olan T bağlantılarında $\mathbf{Q_t}$ ve $\mathbf{Q_b}$'ya göre $\boldsymbol{k_r}$ ve $\boldsymbol{k_b}$ değerleri

Q_b/Q_t	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_r	0,04	0,17	0,30	0,41	0,51	0,60
k_b	-1,12	-0,40	0,08	0,47	0,72	0,91

iv. Redüksiyonlarda yük kaybı katsayısı

a) Daralan redüksiyon

b) Açılan (genişleyen) redüksiyon

→ ***Genişleme açısı ≤10°***

$$\Delta h = k\frac{{v_1}^2}{2g} \tag{2.39}$$

k, aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$k = 3{,}2 - (t\ g\ \theta/2)^{1{,}25} * \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2 \tag{2.40}$$

Burada;

v_1 : Genişlemeden önceki ortalama hız, m/s
D_1 : Genişleme öncesi borunun iç çapı, m
D_2 : Genişleme sonrası borunun iç çapı, m

→ ***Genişleme açısı >10°***

Yük kaybı aşağıda ani genişlemeler için verilen bağıntı ile bulunur (2.41).

v. Çapta ani değişimlerde yük kaybı katsayısı

a) Ani daralma

$$\Delta h = k\frac{{v_2}^2}{2g} \tag{2.41}$$

Burada;

v_2 : daralma sonrası ortalama hız, m/s
D_1 : daralma öncesi borunun iç çapı, m
D_2 : sıkışma sonrası borunun iç çapı, m

k katsayısı, $(D_2/D_1)^2$ oranına bağlı olarak Tablo 2.9'dan belirlenebilir. Özel hal için (tanktan boruya giriş halinde) $[(D_2/D_1)^2 = 0]$ k=0,5 alınır.

Tablo 2.9. *k* katsayısının $(\mathbf{D_2/D_1})^2$ oranına bağlı olarak belirlenmesi [8]

$(D_2/D_1)^2$	0"	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k	0,5	0,46	0,41	0,36	0,30	0,24	0,18	0,12	0,06	0,02	0

b) Ani genişleme

$$\Delta h = k\frac{{v_1}^2}{2g} \tag{2.42}$$

k, aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$k = \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2 \tag{2.43}$$

Burada;

v_1 : genişleme öncesi ortalama hız, m/s
D_1 : genişleme öncesi borunun iç çapı, m
D_2 : genişleme sonrası borunun iç çapı, m

Bunların dışında hesaplamalarda gerekli olabilecek kısmi yük kaybı katsayıları Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı ara elemanlarda yük kaybı katsayıları

Ekipman	*k*
Baca	*0,05*
Akım saptırmalı baca	*1*
Tam açık sürgülü vana	*0,19*
¼'ü kapalı sürgülü vana	*1,15*
½'s, kapalı sürgülü vana	*5,56*
¾'ü kapalı sürgülü vana	*24,0*
Tam açık kelebek vana	*0,3*
20° kapalı kelebek vana	*1,4*
40° kapalı kelebek vana	*10*
60° kapalı kelebek vana	*94*
Salınımlı çek vana	*0,6-2,3*
Salınımlı açık çek vana	*2,5*
Diyafram vana, tam açık	*2,3*

i. Vana ve musluklar

a) Kelebek vana

$$\Delta h = k\frac{v^2}{2g} \tag{2.1}$$

Vananın açılma açısına bağlı olarak, yük kaybı katsayısı k, diskin hidrodinamik karakteristiği ile değişir. Aşağıdaki tablo birkaç tipik değere göre k sabiti değerlerini vermekte olup, uygulamada üreticilerce verilen tablolarının kullanılması tavsiye edilir.

Tablo 2.2. Kelebek vana için değişen açılara göre yük kaybı katsayısı

β	*10*	*20*	*30*	*40*	*45*	*50*	*60*	*70*
k	*0,25 – 0,30*	*1,54*	*3,91*	*10,8*	*18,7*	*32,6*	*118*	*751*

a) Sürgülü vana $(k = l/D)$

Tablo 2.3. Sürgülü vana için değişen açılara göre yük kaybı katsayısı

Sürgü kısma değeri	*0*	*1/8*	*2/8*	*3/8*	*4/8*	*5/8*	*6/8*	*7/8*
k	*0,12*	*0,15*	*0,26*	*0,81*	*2,06*	*5,52*	*17*	*98*

b) Küresel vana

Tablo 2.13. Küresel vana için değişen açılara göre yük kaybı katsayısı

β	***10***	***20***	***30***	***40***	***45***	***50***	***55***
k	*0,31*	*1,84*	*6,15*	*20,7*	*41*	*95,3*	*275*

c) Geri tepme klapesi veya çekvalf

Tablo 2.14. Çekvalf için değişen açılara göre yük kaybı katsayısı

β	***15***	***20***	***25***	***30***	***35***	***40***	***45***	***50***	***60***	***70***
k	*90*	*62*	*42*	*30*	*20*	*14*	*9,5*	*6,6*	*3,2*	*1,7*

Üzerinde çok miktarda özel parça (vana, çekvalf, redüksiyon, dirsek vb.) bulunan Terfi Merkezleri, vana odaları vb. yerlerde, yersel yük kayıpları ilgili özel parçadaki yersel yük kaybına eşit sürekli yük kaybının oluştuğu aynı çaplı düz (eşdeğer) boru boyu (uzunluğu) cinsinden de ifade edilebilmektedir. Böyle bir hesap için kullanılan Nomogram Şekil 2.16'da, uygulaması ise Ek.1'de verilmiştir.

Şekil 2.16. Boru özel parçaları için, eşdeğer boru boyu esaslı yersel yük kayıpları nomogramı [19]

2.2.4. Açık Kanallarda Yersel Yük Kayıpları

Açık kanallardaki yersel yük kayıpları için de $\Delta h_y = k\frac{V^2}{2g}$ formunda ifadeler bulunmaktadır. Konunun kısa bir özeti aşağıda verilmiştir.

- Ani kesit daralması veya giriş kayıpları

Keskin kenarlı giriş: $\Delta h_y = 0{,}5\left(\frac{{V_1}^2}{2g} - \frac{{V_2}^2}{2g}\right)$

Yuvarlatılmış kenarlı giriş: $\Delta h_y = 0{,}25\left(\frac{{V_1}^2}{2g} - \frac{{V_2}^2}{2g}\right)$

Çan ağızlı giriş: $\Delta h_y = 0{,}05\left(\frac{{V_1}^2}{2g} - \frac{{V_2}^2}{2g}\right)$

V_1 : mansap hızı

- Perdeler etrafında dönüş kaybı $\Delta h_y = 3{,}2\frac{V^2}{2g}$

- Ani genişleme veya çıkış kayıpları

Keskin kenarlı çıkış $\Delta h_y = 1{,}0\left(\frac{{V_2}^2}{2g} - \frac{{V_1}^2}{2g}\right)$

Çan ağızlı çıkış $\Delta h_y = 0{,}1\left(\frac{{V_2}^2}{2g} - \frac{{V_1}^2}{2g}\right)$

- Sifonlar $\Delta h_y = 2{,}78\frac{V^2}{2g}$

- Bacalardaki yersel yük kayıpları
  - Dolu akan sifonların giriş/çıkışında (D $\leq$ 180 mm) $\Delta h_y = 0{,}0244\ m$
  - Değişken çaplı sifonların giriş/çıkışında $\Delta h_y = 0{,}24(D_1 - D_2)\ m$

Daralan veya genişleyen açık kanallardaki su yüzeyi profili değişimi, enerji kaybının olmadığı kabulü ile, Bernoulli denklemi yardımıyla belirlenebilir [5].

Şekil 2.17. Genişleyen bir açık kanaldaki su yüzeyi profili

$$\frac{{V_1}^2}{2g} + h_1 = \frac{{V_2}^2}{2g} + h_2 \tag{2.45}$$

$$h_2 - h_1 = \frac{{V_1}^2 - {V_2}^2}{2g}$$

Ani genişlemede Δh_y kadar enerji kaybı olduğu kabul edilirse, memba ve mansap arasındaki su seviyesi farkı,

$$\frac{{V_1}^2}{2g} + h_1 = \frac{{V_2}^2}{2g} + h_2 + \Delta h_y$$

$$h_2 - h_1 = \frac{{V_1}^2 - {V_2}^2}{2g} + \Delta h_y$$

olur.

2.3. Kısmi Dolu Akışlı Borularda Akım

Kısmi dolu akımlı atıksu ve yağmursuyu kanal şebekelerinin tasarımı büyük önem arz etmektedir. Tasarım yöntemi basit ve açık olarak formüle edilmelidir. Atıksu kanalları genellikle dairesel kesitli, birleşik sistem ve yağmursuyu kanalları ise daire, elips veya at nalı enkesitli olabilmektedir. Minimum hızlar, kanallarda katı madde birikimini engelleyecek düzeyde olmalıdır. Maksimum hızlar ise inorganik partiküllerin kanal malzemesini aşındırmasına imkan tanımayacak mertebelerde (genelde < 5 m/s) olmalıdır. Tasarımda, kanal taban eğimleri, çapları ve baca aralıkları ile ilgili teknik ve işletme kısıtlarına uyulması gerekmektedir.

(a) Maksimum Debi

Atıksu yağmursuyu kanalları kısmi dolu akıma izin verecek şekilde, $\frac{h}{D} \leq 0{,}85\ (0{,}90)$ olmak üzere boyutlandırılmalıdır. Daire enkesitli (dairesel) kanallarda enkesit ve hidrolik özellikler aşağıdaki şekil üzerinde gösterilmiştir:

Şekil 2.18. Dairesel kanallarda enkesit

$$y = \frac{h}{D} = \frac{1}{2} - \cos\delta \tag{2.46}$$

$$\frac{P}{D} = \delta$$

P : ıslak çevre

$$\frac{F}{D^2} = \frac{1}{4}(\delta - \sin\delta * \cos\delta)$$

F : ıslak enkesit alan

$R_h = \frac{F}{P}(hidrolik\ yarıçap)$

$$\frac{Q_h}{Q_0} = q_h = \frac{\pi^{2/3}}{\delta}\left(\frac{\delta - sin\delta * cos\delta}{\pi}\right)^{5/3} \tag{2.47}$$

Prandtl-Colebrook formülüne göre kısmi dolu akan dairesel kanallarda rölatif debi oranı, q_h; $q_h = Q_0/(J_F\ g\ D)^{1/2}$ olmak üzere,

$$q_h = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} log\left[\frac{2{,}51\ \nu}{(2gJ_E D^3)^{1/2}} + \frac{k_s}{3{,}71\ D}\right] \tag{2.48}$$

veya

$$q_h = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} log\left[1{,}77\ q_h \frac{1}{R_e} + 0{,}27\ \epsilon\right] \tag{2.49}$$

Eşitlikleriyle verilir. Burada,

$Q_0 =\ D$ çaplı kanalın tam (%100) dolu kesit debisini

$\epsilon = \frac{k_s}{D}$ rölatif pürüzlülüğü

$J_E = \frac{D}{Q_0}$ enerji çizgisi eğimini

$R_e = \frac{Q_d}{\nu\ D}$

göstermektedir.

Kinematik viskozite ν, temiz su için sıcaklığa bağlı olarak Tablo 2.1'deki değerleri alır.

Denklem (2.49)'nin çözümü için 6 parametreden $(Q_0, J_E, g, D, \nu\ ve\ k_s)$ 5'inin bilinmesi gerekmektedir. Genelde $Q_0, J_E, g, \nu\ ve\ k_s$ bilindiğinde çap D, iterasyonla bulunarak en yakın standart çap seçilir.

ATV'ye göre işletme şartlarındaki pürüzlülük, k_b; standart kanallarda $k_b = k_s$ (işletme) = 0,1 mm alınabilmektedir. Ancak standart dışı imal edilen kanallarda ise $k_b = 1{,}5$ mm alınması önerilmektedir. İşletme şartlarında kanal cidar pürüzlülüğü $k_b = 0{,}25 - 1{,}5$ mm aralığında seçilebilir.

(b) Minimum Debi

Minimum debide (Q_m) aşağıdaki iki şartın sağlanması gerekmektedir:

Min. su derinliği, $h\ \geq\ 3$ cm

Min. sürtünme (kayma) gerilmesi, S_m = 2,5 N/m^2

ATV'ye göre kısmi dolu olarak akan daire kesitli atıksu ve yağmursuyu kanalları için min. akım hızı, V_m, için,

$$V_m(m/s) = 0{,}5\ + 0{,}55\ D\ (m), D <\ 300\ mm \tag{2.50}$$

ifadesi verilebilir. Kanal çapının $D\ \geq\ 300$ mm olması durumunda, %10 ve altı doluluktaki min. akım hızını bulmak için yukarıdaki ifadeden bulunan V_m değeri ~%10 oranında arttırılır.

Sander [9], atıksu/yağmursuyu kanal sistemleri için gerekli min. eğim olarak,

$$J_{min} = \frac{1{,}2 * 10^{-3}}{D(m)}, D \leq 1\,m \tag{2.51}$$

$$J_{min} = 1{,}2 * 10^{-3}\ veya\ (\%1{,}2), D > 1\,m \tag{2.52}$$

ifadelerini önermektedir. Söz konusu J_{min} değerlerinde, %10 ve altı doluluk için $d \geq 0{,}35$ mm çaplı kum taneciklerinin kanal tabanında birikmesi önlenebilmektedir.

Kısmi Dolu Akan Dairesel Kanalların Tasarımı

Kısmi dolu olarak akan dairesel kanallardaki enkesit geometrisi ve temel tasarım değişkenleri daha önce Şekil 2.18 üzerinde verilmişti.

$$\frac{h}{D} = 1, \delta = 180° (= \pi\ Radyan), \frac{P}{D} = \pi, \frac{F}{D^2} = \frac{\pi}{4}\ ve\ R_h = \frac{D}{4}$$

için tam (%100) dolu kesit debisi, Q_0,

$$Q_0 = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{5/3} \left(\frac{1}{n}\right) J_E{}^{1/2} D^{8/3} \tag{2.53}$$

İfadesiyle hesaplanabilir. Burada, n Manning pürüzlülük katsayısı, J_E, enerji (kanal taban) eğimidir. kısmi dolu olarak akan kanallarda debinin maks. olduğu doluluk oranı $h/D = 0{,}95$ olup %100 dolu kesit debisi anılan maks. debiden daha küçüktür (Şekil 2.19). Hager (1999)'a göre kısmi dolu olarak akan daire enkesitli kanallarda debi oranı, q_N,

$$\frac{Q_h}{Q_0} = \frac{n\,Q}{J^{1/2} D^{8/3}} = \frac{3}{4} Y_N{}^2 \left(1 - \frac{7}{12} Y_N{}^2\right), Y_N = \frac{h}{D} < 0{,}95 \tag{2.54}$$

İfadesinden bulunabilir. Bu denklemin Manning-Strikler formülüyle çözümü Tablo 2.15'te verilmiştir.

Şekil 2.19. Dairesel kanallar için doluluk eğrisi, Doluluk oranının fonksiyonu olarak debi (Q/Q_0) ve hız (V/V_0). (□) Tam doluluk, (●) maksimum hız ve (▲) maksimum debi

Kanalizasyon şebekelerinin özel yapılarında (bacalar, yan savaklar, vorteks şartlar, sifon ve geciktirme yapıları) akım konusu bu kitabın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu konu ile ilgili detaylı bilgi için Kaynak [3], [7] ve [10]'a başvurulabilir.

Tablo 2.15. Kısmi dolu olarak akan daire enkesitli kanallarda h/D'ye bağlı olarak Q/Q_0 ve V/V_0 değerleri

h/D	F/F_0	P/P_0	R/R_0	B/D	V/V_0	Q/Q_0
0,0200	0,0048	0,0903	0,0528	0,2800	0,1592	0,0008
0,0400	0,0134	0,1262	0,1047	0,3919	0,2440	0,0033
0,0600	0,0245	0,1575	0,1555	0,4750	0,3125	0,0077
0,0800	0,0375	0,1826	0,2053	0,5426	0,3717	0,0139
0,1000	0,0520	0,2048	0,2541	0,6000	0,4247	0,0221
0,1200	0,0680	0,2252	0,3018	0,6499	0,4730	0,0322
0,1400	0,0851	0,2441	0,3485	0,6940	0,5175	0,0440
0,1600	0,1033	0,2620	0,3942	0,7332	0,5589	0,0577
0,1800	0,1224	0,2789	0,4388	0,7684	0,5976	0,0732
0,2000	0,1424	0,2952	0,4824	0,8000	0,6340	0,0903
0,2200	0,1631	0,3108	0,5248	0,8285	0,6684	0,1090
0,2400	0,1845	0,3259	0,5662	0,8542	0,7008	0,1293
0,2600	0,2066	0,3406	0,6065	0,8773	0,7316	0,1511
0,2800	0,2292	0,3550	0,6457	0,8980	0,7608	0,1744
0,3000	0,2532	0,3690	0,6838	0,9165	0,7885	0,1990
0,3200	0,2759	0,3828	0,7207	0,9330	0,8149	0,2248
0,3400	0,2998	0,3963	0,7565	0,9474	0,8400	0,2518
0,3600	0,3241	0,4097	0,7911	0,9600	0,8638	0,2800
0,3800	0,3487	0,4229	0,8246	0,9708	0,8865	0,3091
0,4000	0,3735	0,4359	0,8569	0,9798	0,9080	0,3392
0,4200	0,3986	0,4489	0,8880	0,9871	0,9284	0,3701
0,4400	0,4238	0,4617	0,9179	0,9928	0,8478	0,4017
0,4600	0,4491	0,4745	0,9465	0,9968	0,9662	0,4340
0,4800	0,4745	0,4873	0,9739	0,9992	0,9836	0,4668
0,5000	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000
0,5200	0,5255	0,5127	1,0248	0,9992	1,0154	0,5336
0,5400	0,5509	0,5255	1,0483	0,9968	1,0299	0,5674
0,5600	0,5762	0,5383	1,0704	0,9928	1,0435	0,6013
0,5800	0,6014	0,5511	1,0913	0,9871	1,0561	0,6351
0,6000	0,6265	0,5641	1,1106	0,9798	1,0677	0,6689
0,6200	0,6513	0,5771	1,1285	0,9708	1,0785	0,7024
0,6400	0,6759	0,5903	1,1449	0,9600	1,0883	0,7356
0,6600	0,7002	0,6037	1,1599	0,9474	1,0971	0,7682
0,6800	0,7241	0,6172	1,1732	0,9330	1,1050	0,8002
0,7000	0,7477	0,6310	1,1849	0,9165	1,1119	0,8313
0,7200	0,7708	0,6450	1,1950	0,8980	1,1178	0,8616
0,7400	0,7934	0,6594	1,2033	0,8773	1,1226	0,8907
0,7600	0,8154	0,6741	1,2097	0,8542	1,1264	0,9185
0,7800	0,8369	0,6892	1,2143	0,8285	1,1290	0,9448
0,8000	0,8576	0,7048	1,2168	0,8000	1,1305	0,9695
0,8200	0,8776	0,7211	1,2171	0,7684	1,1306	0,9922
0,8400	0,8967	0,7380	1,2150	0,7332		
0,8600	0,9149	0,7559	1,2104	0,6940		
0,8800	0,9320	0,7748	1,2029	0,6499		
0,9000	0,9480	0,7952	1,1921	0,6000		
0,9200	0,9625	0,8174	1,1775	0,5426		
0,9400	0,9755	0,8425	1,1579	0,4750		
0,9600	0,9866	0,8718	1,1316	0,3919		
0,9800	0,9952	0,9097	1,0941	0,2800		
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

2.3.1. İSKİ'nin Kanalizasyon Şebekeleri Hidrolik Tasarım Şartnamesi

Hidrolik Hesaplar:

Atıksu ve yağmursuyu kanal şebekelerinin hidrolik tasarımında Prandtl-Colebrook eşitliği esas alınmaktadır.

Atıksu Debisi Hesabı:

Ortalama Debi (Q_{ort}, m^3/s):

$$Q_{ort} = Q_{evs.ort} + Q_{end.ort} + Q_{sızma} \tag{2.55}$$

$$Q_{evs.ort} = \frac{q\,N}{24 * 3600}$$

$$Q_{end.ort} = k_{end}\,F(ha)$$

Küçük sanayi için $k_{end} = 0{,}5$ L/s.ha

Orta sanayi için $k_{end} = 1{,}0$ L/s.ha

Büyük sanayi için $k_{end} = 1{,}5$ L/s.ha

$Q_{sızma}(L/s) = 0{,}1 * F(ha)$

Evsel debi için pik katsayısı, β:

$$\beta = \frac{5}{P^{1/5}} \geq 1{,}72\,, P = N/1000 \tag{2.56}$$

Pik debi:

$$Q_{pik} = \beta\,Q_{evs.ort} + \alpha_{end}\,Q_{end.ort} + Q_{sızma} \tag{2.57}$$

İlgili terimler:

q : Kişi başına atıksu miktarı (130-170 L/ N.gün)
F : Atıksu toplama alanı (ha)
N : Gelecekteki nüfus (kişi)
n : Gelecekteki nüfus yoğunluğu (N/F)
N_i : i. kanala atıksu veren kısmi nüfus ($F_i\,n$)
F_i : i. kanala atıksu veren bölgenin kısmi alanı (ha)
α_{end} : Endüstri için pik faktörü

Yağmursuyu Debisi Hesabı:

Yağış şiddeti i (L/s.ha) = f (T), belli bir tekerrür esas alınarak seçilen bölgenin süre-şiddet tekerrür eğrisinden T'ye bağlı olarak alınmaktadır. Burada T (toplama süresi),

$$\mathrm{T} = t_1 + t_2 \tag{2.58}$$

dir.

t_1 : giriş süresi (dk)
t_2 : akış süresi (dk)

t_1 giriş süresi, arazi eğimine bağlı olarak aşağıdaki gibi seçilmektedir:

Tablo 2.16. Arazi eğimine göre giriş süresinin belirlenmesi

J_z	t_1
$> 1:20$	*5*
$1:20 - 1:50$	*10*
$< 1:50$	*15*

Kanala gelen yağmursuyu debisi:

$$Q = i\,F\,C \tag{2.59}$$

i : T süreli ve n (2~5 yıl) tekerrürlü yağışın şiddeti (L/ sn.ha)
F : su toplama alanı (ha)
C : akış katsayısı (yüzeyin kaplama durumuna bağlı)

Hesaplamada Rasyonel Metot kullanılmakta olup, T > 30 dk ve L > 1500 m için tercihen diğer metotların uygulanması önerilmektedir. Yağmursuyu şebekelerinde genelde tali kanallar n = 2 yıl, ana kanallar (toplayıcılar) n=3~5 yıl tekerrürlü yağışlara göre tasarlanır.

Hız ve Eğim Limitleri:

Maksimum hız, atıksu kanallarında ≤ 3,0 m/s, yağmursuyu kanallarında ≤ 5,0 m/s alınmaktadır. Minimum hız, atıksu kanallarında ≥ 0,6 m/s, yağmursuyu kanallarında ise ≤ 0,5 m/s'dir. Kanal eğimleri, su hızına bağlı olarak ilgili hidrolik bağıntılardan hesaplanmaktadır.

Doluluk Oranı:

Kanallardaki doluluk oranının $\frac{h}{D} \leq 0{,}90$ olması öngörülmektedir.

Baca Aralıkları:

D ≤ 120 cm ise L_{maks} = 50 – 70 m

D > 120 cm ise L_{maks} = 70 – 100 m

Maksimum düşü yüksekliği 2,5 m'dir.

Kısmi dolu akışlı atıksu ve yağmursuyu kanal sistemlerinin tasarımı ile ilgili kapsamlı uygulamalar için Kaynak [10] ve [11]'a başvurulmalıdır.

2.4. Borulama ve Hidrolik Profil

Arıtma tesisinde bir üniteden diğerine akışın sağlanabilmesi için kanal, boru ve diğer bileşenlerin yerlerinin belirlenmesi önemlidir. Borulama projesinin hazırlanmasında üç temel unsur söz konusudur:

- Montaj ve işletmeye uygunluk,
- Bakım için kolay erişilebilirlik,
- İleride muhtemel bağlantı veya yeni hatların ilave edilebilmesi

Borulama arıtma birimleri ve tesis için gerekli çevirme (baypas) hatları ile su, çamur, hava ve kimyasal madde besleme borularını içermelidir.

2.4.1. Hidrolik Profil

Hidrolik profil atık suyun deşarj edileceği noktaya göre belirlenir. Bir tesiste hidrolik profil hazırlanmasında göz önünde bulundurulması gereken temel prensipler şunlardır [12]:

- Hidrolik profil, pik ve ortalama tasarım debisi (Q_h) ile minimum başlangıç debisi için hazırlanır.
- Hidrolik profil, genellikle tesis içindeki tüm ana su hatları için hazırlanır.

- Arıtma tesisindeki toplam yük kaybı; arıtma üniteleri, bağlantı boruları ve diğer kısımlardaki yük kayıplarının toplamıdır.
- Arıtma ünitesindeki yük kayıpları şunlardır:
  a. Atıksu giriş yapılarındaki yük kayıpları,
  b. Atıksu çıkış yapılarındaki yük kayıpları,
  c. Ünitelerdeki yük kayıpları,
  d. Diğer kayıplar.

Arıtma tesisinde en büyük yük kaybı, pik tasarım debisinin geçtiği dönemlerde, en büyük ünite servis dışı kaldığında, geri devirli durumlarda oluşur. Çeşitli arıtma birimlerindeki yaklaşık yük kayıpları Tablo 2.17'de verilmiştir.

Tablo 2.17. Arıtma birimlerindeki yük kayıpları, [12]

Arıtma birimi	***Toplam yük kaybı (m)***
Izgara	*0,02-0,3*
Kum tutucu	
Havalandırmalı kum tutucu	*0,5-1,2*
Hız kontrollü kum tutucular	*1,0-2,5*
Ön çökeltim havuzu	*0,5-1,0*
Havalandırma havuzu	*0,3-0,8*
Damlatmalı filtre	
Düşük hızlı ve dozlama tertibatlı	*3,0-6,0*
Yüksek hızlı, tek kademeli	*2,0-5,0*
İkinci (son) çökeltim havuzu	*0,5-1,0*
Klorlama ünitesi	*0,2-2,5*

- Bağlantı boruları ve kanallardaki toplam yük kaybı aşağıdakilerin toplamıdır:
  a. Giriş kaybı,
  b. Çıkış kaybı,
  c. Daralma ve genişleme kaybı,
  d. Sürtünme (sürekli) yük kaybı,
  e. Dirsek, ara bağlantılar, kapak, vana ve metrelerdeki yük kaybı,
  f. Savak ve diğer hidrolik kontroller için gereken yük,
  g. Serbest düşme için gereken yük,
  h. Arıtma tesisinin ilerideki genişleme ihtimaline karşı bırakılan yük.
- Boru ve mecraların bağlantı yerlerindeki akış hızı, katıların çökmesine meydan vermeyecek seviyede tutulur. Tasarım koşullarında minimum 0,6 m/s hız yeterlidir. Minimum başlangıç akımında ise 0,3 m/s hız organik katı maddelerin sürüklenmesi için yeterli görülmektedir. Maksimum ve minimum debi oranı çok büyük olduğundan başlangıç şartlarında (projenin ilk yıllarında) kendi kendini temizleme hızı sağlanamaz. Bu durumda temizleme ancak daha yüksek akış şartlarında (süpürme ile) sağlanabilir. Bu tür tasarımlarda temizlemenin sıklığı dikkate alınmalıdır. Bazı durumlarda katıları askıda tutmak için havalandırma uygulanır.
- Açık kanal ve mecralarda yersel yük kayıpları hız yüksekliğine ($k\ v^2/2g$) bağlı olarak hesaplanır. Yersel yük kayıpları Bölüm 2.2.3'te izah edilmiştir.
- Basınçlı borularda sürtünme kayıpları Hazen-Williams veya Prandtl-Colebrook bağıntıları ile bulunabilir. Bu konu Bölüm 2.2'de izah edilmiştir.
- Kanallarda akım yüksekliği (derinlik) akış şartlarına bağlıdır. Bu yüzden açık kanallarda derinlik, tasarım debi değerinde, su yüzeyi hidrolik profilini temsil edecek seviyede tutulur. Açık kanallarda akış düzenli (kararlı) veya düzensiz (kararsız) olabilir. Kesiti, debisi ve hızı sabit olan kanallarda akış düzgün olur. Kanal tasarımında genellikle pik

tasarım değerinde akışın düzgün (kararlı) olduğu varsayılır. *Açık kanallarda genelde Manning formülü kullanılır.*
Kesit değişken veya kanala giren atıksu debisi sabit değilse akış düzensiz olur. Bu durumda laminer akımlar için sürekli yük kaybı formülü geçerli olmaz. Atıksu arıtma tesislerinde geçiş akışları ve düzensiz akışlar için yeterli tolerans sağlanır. Geçiş için yük kaybı genellikle enerji denklemi kullanılarak hesaplanır.

- Atıksu arıtma tesislerinde kullanılan debi ölçme cihazlarının çoğu yük kaybı esası ile çalışır. Hidrolik profil, debi ölçme cihazları için uygun yük kaybı hesaplamalarını da içermelidir.
- Hidrolik profil hazırlanmasında y ekseni, arıtma ünitelerini ve su yüzeyindeki değişimleri göstermek üzere özellikle deforme edilir (düşey ölçek: 1/100, yatay ölçek: 1/1000). Tesiste optimum seviyeyi belirlemek ve hidrolik kontrolleri sağlamak üzere toprak seviyesi de belirtilmelidir.

Boru hatlarında sürtünmeden kaynaklanan yük kayıpları boru çapı ile ters orantılıdır. Boru çapı büyüdükçe terfi için gerekli enerji maliyeti düşer ancak bu durumda da boru hattının amortisman maliyeti yükselir. Bu iki giderin de minimum olacağı "ekonomik çap" olarak adlandırılan bir boru çapı tanımlanmıştır. Literatürde, ekonomik çapın hesaplanması için geliştirilmiş formüller bulunmaktadır (Vibert formülü, (2.60)).

$$D = 1{,}456 \left(\frac{n\,e}{f}\right)^{0{,}1554} Q^{0{,}46} \qquad (2.60)$$

Burada;

D : borunun ekonomik çapı, m
n : günlük pompa çalışma saati oranı (24'e bölünmüş olarak)
e : kW saat fiyatı ($/kWh)
f : hattın birim boy maliyeti ($/m boru)
Q : debi, m^3/s

Bu formülde 1,456 sayısı 50 yıllık proje ömrü ve yıllık %8 yıpranmaya karşı gelmektedir. Ancak bu değerler teorik olup piyasada satılan ve "ticari çap" olarak tanımlanan değerlerle örtüşmez. Bu yüzden pratikte denklem (2.60) ile bulunan ekonomik çapın hemen üstünde bir boru çapı seçilir. Ekonomik çap genelde, tasarım debisinde 1~1,5 m/s, maksimum debilerde ise ≤2 m/s hıza karşı gelir.

Problem 2.4.

Aşağıda bir kısmının boy kesiti verilen Atıksu Arıtma Tesisleri'nde ortalama ve maksimum debiler için hidrolik profili belirleyiniz. Çamur geri devir hattının havalandırma havuzuna verildiğini, ön ve son çökeltim havuzlarında 90° tepe açılı üçgen savak kullanıldığını, havalandırma havuzu çıkış savağının ortada b=1,37 m genişlikli dikdörtgen savak tarzında olduğunu kabul ediniz. Gerekli diğer bilgiler aşağıdaki şekil üzerinde verilmiştir.

Şekil a. *Hidrolik Profil*

Çözüm:

(1) m^3/gün cinsinden debilerin hesabı.

$$Q_{ort} = 3785{,}4\ m^3/gün + \%100\ geri\ devir = 2 * 3785{,}4\ m^3/gün = 7570{,}8\ m^3/gün = 0{,}0876\ m^3/s$$

$$Q_{maks} = 7570{,}8\ m^3/gün + \%50\ geri\ devir = 1{,}5 * 7570{,}8\ m^3/gün = 11356{,}2\ m^3/gün = 0{,}1314\ m^3/s$$

(2) Son çökeltim tankında su yüzeyi kotlarının belirlenmesi

$$Savak\ sayısı = \frac{\pi\ (15.24\ m)}{0{,}61\ m} = 79\ adet$$

$$Ortalama\ debi/savak = 3785{,}4\ m^3/gün\ /79 = 47{,}92\ m^3/gün * savak$$

$$Pik\ debi/savak = 7570{,}8\ m^3/gün/79 = 95{,}83\ m^3/gün * savak$$

Üçgen (V tipi) savak için debi formülü (Kindsvater-Carter denklemi);

$$Q = 76{,}98 * C * tan(\theta/2)\ (h + k)^{5/2}$$

Burada;

Q *: Debi, m^3/s*
C *: Deşarj katsayısı, boyutsuz*
θ *: Tepe açısı, derece*
h *: Savak yükü, m*
k *: Su seviyesi düzeltme faktörü, m*

Üçgen savaklarda C ve k sabitleri Şekil 1.21'den okunabilir.

Son çökeltme savaklarında ortalama kot= 0,044 m

Son çökeltme tanklarında maksimum kot= 0,057 m

Son çökeltme tankında ortalama su yüzeyi kotu= 518,24 + 0,044 = 518,284 m

Son çökeltme tankında maksimum su yüzeyi kotu= 518,24 + 0,057 = 518,297 m

(3) Havalandırma tankı çıkış kanalındaki su yüzeyi kotunun belirlenmesi

Bu kısımdaki boruda boru kayıp sabitleri;

$K_{ÇIKIŞ} = 1,0$

$K_{GİRİŞ} = 0,5$

$K_{90^o DİRSEK} = 2 \times 0,4 = 0,8$

Sürtünme faktörü olarak atıksu alanında kullanılan tipik değer olan 0,02 alınmıştır.

Borudaki hızlar;

$Ortalama\ hız\ =\ (0{,}0876\ m^3/s)/(\pi/4 * 0{,}5082)\ =\ 0{,}432\ m/s$

$Maksimum\ hız\ =\ (0{,}1314\ m^3/s)/(\pi/4 * 0{,}5082)\ =\ 0{,}648\ m/s$

Bu borudaki toplam yük kaybı;

$$Ortalama\ yük\ kaybı = \frac{(0{,}432\ m/s)^2}{2 * 9{,}81}\left(\frac{38{,}1 * 0{,}02}{0{,}508\ m} + 1{,}0\ +\ 0{,}8\ +\ 0{,}5\right) =\ 0{,}036\ m$$

$$Maksimum\ yük\ kaybı\ =\ \frac{(0{,}648\ m/s)^2}{2 * 9{,}81}\left(\frac{38{,}1 * 0{,}02}{0{,}508\ m} +\ 1{,}0\ +\ 0{,}8\ +\ 0{,}5\right)\ =\ 0{,}081\ m$$

Maksimum ve ortalama debilerde havalandırma tankı çıkışındaki su yüzeyi kotu;

Ort. debide hav. tan. çık. su yüzeyi kotu= 518,284 + 0,036 =518,32 m

Maks. debide hav. tan. çık. su yüzeyi kotu= 518,297 + 0,081 = 518,378 m

(4) *Havalandırma tankı çıkış savağındaki su yüzeyi kotunun belirlenmesi*

Dikdörtgen savaklar için Kindsvater-Carter denklemi;

$$Q\ =\ C_e \frac{2}{3}\sqrt{2g}(b + K_b)(h + K_h)^{3/2}$$

Burada;

- Q : *debi, m^3/s*
- C_e : *deşarj katsayısı, boyutsuz*
- g : *yerçekimi ivmesi, m/s^2*
- b : *tepe genişliği, m*
- h : *su seviyesi, m*

K_b *ve* K_h*: viskozite ve yüzey geriliminin etkisi, m*

K_h*=0,001 M, g= 9,81 m/s^2, b=1,37 m*

Dikdörtgen savaklarda;

$0 < b/B \leq 1$ ve $0 < h/P \leq 2,5$

$h \geq 0,03$ m, $P \geq 0,1$ m, $b \geq 0,15$ m, $B \geq 0,15$m olmalıdır.

Dikdörtgen savaklarda deşarj katsayısı sabitleri Şekil 1.19'dan, K_b ve b/B arasındaki ilişki Şekil 1.20'den alınmalıdır.

Dikdörtgen savaklar için Kindsvater-Carter denklemi basitleştirilerek şöyle yazılabilir;

$$Q\ =\ 0{,}20\ g^{1/2}\ h^{3/2}\ b$$

$Havalandırma\ tankında\ ortalama\ kot;\ h =\ 0{,}22\ m\ bulunur.$

$Havalandırma\ tankı\ çıkış\ savağında\ ortalama\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}07 + 0{,}22 = 519{,}29\ m$

$Havalandırma\ tankında\ maksimum\ kot;\ h =\ 0{,}28\ m\ bulunur.$

$Havalandırma\ tankı\ çıkış\ savağında\ maksimum\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}07 + 0{,}28 = 519{,}35\ m$

(5) *Havalandırma tankı girişindeki su yüzeyi kotunun belirlenmesi.*

Havalandırma tankında 0,18 m yük kaybı olduğunu varsayınız.

$Havalandırma\ tankı\ girişinde\ ortalama\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}29 + 0{,}18 = 519{,}47\ m$

$Havalandırma\ tankı\ girişinde\ maksimum\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}35 + 0{,}18 = 519{,}53\ m$

(6) *Ön çökeltme tankına ait çıkış savak kanalındaki su yüzeyi kotunun belirlenmesi.*

Borunun bu kısmında boru kayıp sabitleri;

KÇIKIŞ = 1,0

KGİRİŞ = 0,5

K90° DİRSEK = 0,4

Sürtünme faktörü = 0,02

Borudaki hızlar;

$Ortalama\ hız = (0{,}0438\ m^3/s)/(\pi/4 * 0{,}4062) = 0{,}338\ m/s$

$Maksimum\ hız = (0{,}0876\ m^3/s)/(\pi/4 * 0{,}4062) = 0{,}677\ m/s$

Bu borudaki toplam yük kaybı;

$$Ortalama\ yük\ kaybı = \frac{(0{,}338\ m/s)^2}{2 * 9{,}81}\left(\frac{45{,}72 * 0{,}02}{0{,}406\ m} + 1{,}0 + 0{,}4 + 0{,}5\right) = 0{,}0243\ m$$

$$Maksimum\ yük\ kaybı = \frac{(0{,}677\ m/s)^2}{2 * 9{,}81}\left(\frac{45{,}72 * 0{,}02}{0{,}406\ m} + 1{,}0 + 0{,}4 + 0{,}5\right) = 0{,}0969\ m$$

Maksimum ve ortalama debi altında ön çökeltme tankı çıkış kanalındaki su yüzeyi kotu;

$Tank\ çıkış\ kanalında\ ort.su\ yüzey\ kotu = 519{,}47 + 0{,}0243 = 519{,}49\ m$

$Tank\ çıkış\ kanalında\ maks.su\ yüzey\ kotu = 519{,}53 + 0{,}0969 = 519{,}63\ m$

(7) *Ön çökeltme tankındaki su yüzeyi kotunu belirleyiniz.*

$$Savak\ sayısı = \frac{\pi\ (13{,}72\ m)}{0{,}61\ m} = 70$$

$Ortalama\ debi/savak = 3785{,}4\ m^3/gün/70 = 54{,}08\ m^3/gün$

$Pik\ debi/savak = 7570{,}8\ m^3/gün/70 = 108{,}15\ m^3/gün$

$Ön\ çökeltme\ savaklarında\ ortalama\ kot = 0{,}046\ m$

$Ön\ çökeltme\ tanklarında\ maksimum\ kot = 0{,}058\ m$

$Ön\ çökeltme\ tankında\ ortalama\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}53 + 0{,}046 = 519{,}576\ m$

$Ön\ çökeltme\ tankında\ maksimum\ su\ yüzey\ kotu = 519{,}53 + 0{,}058 = 519{,}588\ m$

Konu (Hidrolik Profil) ile ilgili daha kapsamlı bilgi Ek1'deki Hidrolik Tasarım Örneği'nde verilmiştir.

Şekil b. *Maksimum ve Ortalama Debilerdeki Su Yüzeyi Kotları*

KAYNAKLAR

[1] Muslu, Y. (1996). Atıksuların Arıtılması Cilt 2. İstanbul: İTÜ Matbaası.

[2] Pont a Mousson Research Center (1992). A Comprehensive Ductile Iron Pipeline System. Pont-à-Mousson: Pont-à-Mousson Research Center.

[3] Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G. (1981). Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater. New York: McGraw-Hill.

[4] Green, D. ve Perry, R. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook. New York: McGraw Hill.

[5] Topacık, D. ve Koyuncu, İ. (2006). Arıtma Tesislerinin Hidroliği. İstanbul: Su Vakfı

[6] Öztürk, İ. (2011). Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı: Atıksu, Termal ve Tuzlu Su Deşarjları. İstanbul: Su Vakfı

[7] Hager, W. H. (1994). Wastewater Hydroulics Theory and Practice. Berlin: Springer.

[8] Sümer, M., Ünsal, İ. ve Bayazıt, M. (1985). Hidrolik. İstanbul: Birsen Yayınevi

[9] Sander, T. (1994). Zur Dimensionierung von ablagerungsfreien Abwasserkanälen unter besonderer Berücksichtigung von neuen Erkenntnissen zum Sedimentations-verhalten (The design of depositionless sewers under particular attention of new result relative to sedimentation). Korrospondenz Abwasser 32 (5): 415-419.

[10] Muslu, Y (1998). Çevre Mühendisliğinin Esasları, İTÜ İnşaat Fakültesi Yayını: İstanbul. Muslu, Y. (2005). Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı, Su Vakfı Yayınları (3. Baskı).

[11] Türkdoğan, F. İ. ve Yetilmezsoy, K. (2008). Su Getirme ve Kanalizasyon Uygulamaları, Su Vakfı Yayınları (2. Baskı).

[12] Qasim, S. R. (1998). Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation. Lancaster: CRC Press.

[13] Ağıralioğlu, N. ve Erkek, C. (2002). Su Kaynakları Mühendisliği Uygulamaları, İstanbul: Beta Yayınları

[14] Biwater Industries (1993). Water Industrial Manual Water Products and Services.

[15] Hager, W. H. (1999). Wastewater Hydraulics: Theory and Practice. Berlin: Springer.

[16] King, H. W. (1959). Hidrolik El Kitabı (çev. Fuat Şentürk). Ankara: D Sİ.

[17] Nalluri, C. ve Featherstone, R. E. (1982). Civil Engineering Hydraulics: Essential Theory with Worked Examples. Granada: HarperCollins Distribution.

[18] Zingvang, D. J. ve Sylvester, N. D. (1985). Discussion to “A simple explicit formula for the estimation of pipe friction factor”, von J. J. J. Chen. Proc. Insitution Civil Engineers 79: 218-219.

[19] Davis, L. D. Çeviri Editörü: İsmail Toröz (2015). Su ve Atıksu Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi.

3. FİZİKSEL ARITMA

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Atıksu arıtma tesisindeki arıtma üniteleri: ilk (mekanik) arıtma, birinci kademe arıtma ve ikinci kademe arıtma olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Her bir grupta kullanılan elektromekanik ekipman genellikle farklıdır. Arıtma çamuru için kullanılan ekipmanlar ileride çamur arıtma bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.1. İlk (Mekanik) Arıtma

İlk (mekanik) arıtmada atıksudaki kağıt, tekstil atıkları, plastik, metal gibi iri katı maddeler ile kum ve yağ-gres gibi maddelerin ayrılması işlemi uygulanmaktadır. Bu maddeler, bu aşamada uzaklaştırılmadığı takdirde daha sonra pompalar ve çamur işleme ekipmanlarına, vanalara ve borulara zarar vererek arıtmada ciddi işletme problemlerine yol açabilirler. Askıda katıları gidermek için bazen ince ızgaralar ve elekler de kullanılır.

3.1.1. Izgara ve Elekler

Kaba Izgara: Kaba ızgaralar, koruyucu ekipman olduklarından ilk ünite olarak kullanılırlar. En yaygın olarak kullanılan kaba ızgaralar: çubuk ızgaralar, elekler ve öğütücülerdir. Çubuk ızgaralar, elekler ve öğütücülerle ilgili özet bilgi Tablo 3.1'de verilmiştir. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde kaba ızgaralara her durumda gerek olmayabilir.

Çubuk Izgara: Izgara aralığı 25-50 mm mertebesinde olup evsel atıksu ile gelebilecek 50 mm'den iri maddeler (çöp, naylon, ahşap malzeme vb.) ızgarada tutularak zaman ayarlı temizleme mekanizması ile atıksudan uzaklaştırılır. Bu maddelerin arıtma tesisinde mevcut mekanik ekipmanlara zarar vermemesi ve boru hatlarında tıkanıklara yol açmaması için mutlaka uzaklaştırılması gereklidir. Çubuk ızgaralar için tipik tasarım değerleri Tablo 3.2'de verilmektedir.

Çubuk ızgaraların tasarımında aşağıdaki formül kullanılır:

$$A = \frac{Q}{v}\frac{(b+s)}{S} \tag{3.1}$$

Burada;

A : gerekli ızgara alanı, m^2
Q : maksimum debi, m^3/s
v : akış hızı, m/s, (genellikle 1,0 m/s seçilir)
b : ızgara çubuk genişliği, mm
s : ızgara çubukları arası net açıklık, mm

Çubuk ızgaralar dikdörtgen bir kanal içine kurulur. Kanalın zemini genellikle giriş atıksu borusundan 7-15 cm aşağıdadır. Kanal zemini yatay olarak düz veya eğimli olabilir. Izgara kanalları, kum ve diğer ağır parçacıkların burada birikmesini önlemek üzere tasarlanırlar. Izgara yaklaşım kanalı, ızgaraya dik ve tüm ızgara yüzeyine üniform atıksu dağılımı sağlayacak şekildedir. Arıtma tesislerinde ızgara bölümünün herhangi bir nedenle devre dışı kalması durumunda pik debiye göre tasarımı yapılmış en az bir yedek ızgara daha bulunmalıdır.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Tablo 3.1. Kaba ızgara, elek ve öğütücülerin özellikleri [1], [2]

Tip	*Yerleşim*	*Açıklama*
Çubuk ızgara	*Pompaların ve kum tutucuların önüne*	*Elle temizlemeli veya mekanik temizlemeli olabilirler. Küçük arıtma tesislerinde elle temizlemeli olanlar kullanılır.*
Elek	*Çubuk ızgaranın önüne veya damlatmalı filtrenin arkasına*	*Çubuk ızgaraya göre daha küçük parçacıkların uzaklaştırılmasında kullanılır. Düz, sepet, kafes ve disk tiplileri vardır. Izgaralar kanaldan çıkartılarak temizlenip yerine takılır. Yeni tipleri hareketli eleklerdir. Tasarımları ince ızgaralara benzer. Katılar sürekli ayrılarak oluğa boşaltılır. Uzaklaştırılacak maddelerin boyutuna bağlı olarak aralıklar 3-20 mm arasındadır.*
Öğütücü	*Kaba eleklerle birlikte*	*Öğütücüler ızgaralarda tutulan katı maddeleri öğütür. Dönen veya titreşen bir merdane üzerinde kesme dişleri veya doğrama kısımları vardır. Öğütücüler neredeyse tamamen batmış konumdadır.*

Tablo 3.2. Kaba ızgara, elek ve öğütücülerin özellikleri [1], [2]

Tasarım faktörü	*Elle temizlemeli*	*Mekanik Temizlemeli*
Izgarada hız (m/s)	*0,3-0,6*	*0,6-1,0*
Izgara boyutu		
Genişlik (mm)	*4-8*	*8-10*
Derinlik (mm)	*25-50*	*50-75*
Izgara çubukları arası net açıklık (mm)	*25-75*	*10-50*
Izgaraların yatayla yaptığı açı (derece)	*45-60*	*75-85*
Müsaade edilen yük kaybı, kirli (kısmen tıkalı) ızgara, (mm)	*150*	*150*
Maksimum yük kaybı, kirli ızgara, (mm)	*800*	*800*

Çubuk ızgaralarda yük kaybı: Kaba ızgaralarda yük kaybı hesaplarında, ızgaraların temizliğine bağlı olarak üç değişik formül kullanılmaktadır: Temiz veya kısmen tıkanmış ızgaralarda (3.2)(3.1) formülü, temiz ızgaralarda (3.3) formülü kullanılmaktadır. (3.4) ifadesi ise genel orifis formülü olup ince ızgaralarda yük kaybı hesaplarında kullanılır.

$$h_L = \frac{V^2 - v^2}{2g}\frac{1}{0{,}7} \tag{3.2}$$

$$h_L = \beta\left(\frac{W}{b}\right)^{4/3} h_v \sin\theta \tag{3.3}$$

Burada;

h_L : Izgara boyunca yük kaybı, m,
V, v : Izgara boyunca ve ızgara öncesi kanalda hız ($V > v$), m/s,
g : Yerçekimi ivmesi, 9,81 m/s^2,
W : Izgara çubuğunun akıma dik istikametteki en büyük kalınlığı, m,
b : Izgara çubukları arası en küçük mesafe, mm
h_v : Izgara yaklaşım kanalındaki hız yüksekliği, m,
θ : Izgara çubuklarının yatay düzlemle yaptığı açı,
β : ızgara şekil katsayısı, temiz ızgaralarda ızgara şekil katsayıları Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Temiz çubuk ızgaralarda ızgara şekil katsayıları

Izgara çeşidi	*β*
Keskin kenarlı dikdörtgen	*2,42*
Yarı dairesel yüzü yukarı (menbaya) bakan dikdörtgen	*1,83*
Dairesel	*1,79*
Yarı dairesel yüzü yukarı ve aşağı bakan dikdörtgen	*1,83*
İki ucu inceltilmiş çubuk şeklinde	*0,76*

İnce Izgara ve Elek: Çubuk aralığı genellikle 15-25 mm mertebesindedir. Bu tip ızgaralar mekanik temizleme mekanizmalarına haiz olup ızgarada tutulan katı maddeler zaman zaman otomatik olarak temizlenerek katı madde konteynerlerinde depolanır ve daha sonra atık depolama alanlarına dökülürler. İnce ızgaraların amacı mekanik arıtmadır. Son yıllarda ikinci kademe arıtımın yükünü düşürmek amacıyla mikro elekler de kullanılmaktadır.

İnce ızgaralar, hareketli ve hareketsiz elemanlardan oluşur. Hareketsiz veya statik elekler; dik, eğik veya yatay olarak monte edilirler. Bunlar tırmık, diş veya fırça ile temizlenirler. Hareketli elekler ise çalışma sırasında sürekli olarak temizlenirler. Her iki tip ince elekte de %20-25 askıda katı madde ve $BOİ_5$ giderimi sağlanabilir. Ayrıca bu sistemlerde yağ ve çözünmüş oksijen giderimi değerlerinde de yükselme sağlanır. Hareketli eleklerin hareketsiz eleklere göre yük kaybı daha düşük fakat enerji ihtiyacı daha yüksektir. Mekanik düzeneklere haiz ince eleklerde ortaya çıkabilecek arızalara karşı, sistemde ızgaranın elle (manüel) temizlemeli olması durumunun da düşünülmesi gerekir. Tablo 3.4'te farklı tipte hareketli elek özellikleri verilmiştir.

İnce ızgaralarda yük kaybı: İnce ızgaralarda yük kaybı hesaplamalarında (3.4) bağıntısı kullanılır.

$$h_L = \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{C\,A}\right)^2 \tag{3.4}$$

Burada;

Q : İnce ızgara boyunca debi, m^3/s,
A : Suya dalmış etkili alan, m^2,
C : Debi katsayısı, (temiz çubuk için C= 0,60 alınır)

Izgaralarda tıkanmalardan dolayı yük kayıpları önemli mertebelere ulaşır. Bu nedenle ızgaraların periyodik olarak temizlenmesi gerekmektedir. Mekanik temizlemeli ızgaralarda ızgara yüzeyinin zaman ayarlı otomatik çalışan temizleme mekanizmaları ile temizlenmesi yük kayıplarının istenilen düzeyde tutulmasını sağlayacaktır.

Tablo 3.4. Hareketli elek tipleri

Tip	*Açıklama*
Bant elek	*İki silindirin üstünden geçen sonsuz delikli bir banttan oluşmuştur. Eleğin üzerinde biriken maddeleri sıyırmak için bir fırça düzeneği vardır. Tutunan kumu uzaklaştırmak içinse su jeti kullanılır.*
Kanat veya kepçe elek	*Yatay düzlemde yavaşça dönen, dairesel olarak dizilmiş delikli kepçelerden oluşmuştur.*
Kalbur veya merdane elek	*Üstü elek kaplı dönen bir silindirden oluşur. Su silindirin içine girer ve merkezden dışarı doğru hareket eder. Biriken katı maddeler su jeti ile uzaklaştırılır ve olukta toplanır. Elek aralıkları 0,02-3 mm'dir.*

Öğütücü: Kaba ızgaraların alternatifi atıksudaki büyük boyutlu katıların sudan ayrılmadan ufalanmasıdır. Öğütücülerin işlevi, kaba taneli katıları parçalayarak sonraki arıtma işlemlerinde ve proseslerinde problem oluşturmalarını önlemektir. Öğütücülerin kullanımı özellikle pompa

istasyonlarında, pompaların korunması açısından gereklidir. Ayrıca bir kısım katı maddelerin ızgara ile toplanması arıtma tesisine giren katı madde yükünü de azaltır. Soğuk iklimlerde öğütücülerin kullanımı donma tehlikesini önler.

Arıtma konusunda iki farklı temel görüş vardır. Bir görüşe göre, atıksudan ayrılan bir madde ne şekilde olursa olsun tekrar atıksuya verilmemelidir. Diğer bir görüş ise, katıların boyutları küçüldükten sonra arıtma tesisinin ilgili kademelerinde arıtılmalarının kolay olduğunu savunmaktadır. Son yıllarda, arıtma tesislerinde daha fazla biyogaz üretilebilmek için mutfak öğütücülerinden geçirilmiş organik çöplerin bile atıksu kanal şebekelerine verilmesi tercih edilmektedir.

Şekil 3.1'de bir öğütücünün şematik görünümü verilmiştir. Öğütücü, üstü bıçaklı dönen bir merdaneden (küçüklerde 6 mm, büyüklerde 10 mm aralıklı) oluşmuştur. Kaba tanecikler merdane üstündeki bıçakla parçalanır, alt kısma geçer ve buradan sifonla çıkış borusuna iletilir.

Şekil 3.1. Bir öğütücünün şematik görünümü

3.1.2. Kum Tutucu

Burada kum olarak tanımlanan maddeler; kum, taş, cam, cüruf gibi yoğunluğu veya çökelme hızı, biyolojik arıtımda parçalanabilen organik maddelere kıyasla daha yüksek olan maddelerdir. Yumurta kabukları, kemik parçacıkları, tohumlar, kahve parçacıkları ve yemek artıkları gibi organik parçacıklar da bu kapsama girmektedir. Kum olarak giderilen maddeler çoğunlukla inert ve oldukça kurudur. Kum kompozisyonu çok farklı olabilir. Örneğin rutubet oranı %13-65 arasında, uçucu kısım %1-56 arasında değişir. Yoğunluğu genellikle 1600 kg/m^3 dür. Kum, bir miktar organik madde içerdiğinden atıksudan ayrıldıktan sonra uygun şekilde bertaraf edilmezse kolaylıkla çürür. 0,2 mm'den daha büyük kum parçacıklarının arıtma tesisinin ileriki kademelerinde problem oluşturduğu bilinmektedir. Bazı durumlarda 0,15 mm çaplı kumların kum tutucularda % 100 giderimi sağlanmakla birlikte, bazen kum boyutu çok daha küçük olabilmekte ve 0,15 mm'nin altındaki kumların kum tutucuda sadece %60 giderilebilmektedir.

Arıtma sistemlerindeki hareketli mekanik ekipmanın aşınmasını önlemek, boru ve kanallarda birikintileri engellemek ve kum birikiminden dolayı çamur çürütücünün temizlenme periyodunu azaltmak için kum tutucuların (kum ayırıcı), santrifüj, ısı değiştirici ve yüksek basınçlı diyafram pompalardan önce kullanılması şarttır.

Kum tutucular, genellikle kaba ızgaradan sonra ilk çökeltimden önce kullanılırlar. Kum tutucuların ızgara ve eleklerden sonra olması, toplanan kumun temizlik ve bertarafını kolaylaştırır.

Üç tip kum tutucu vardır:

- Yatay akışlı, dikdörtgen veya kare planlı
- Havalandırmalı

- Dairesel (Vorteks akımlı)

Yatay akışlı kum tutucularda atıksu, kum tutucuyu yatay doğrultuda geçer. Çizgisel hız; kum tutucunun boyutu, girişte dağıtım yapısı ve çıkışta çeşitli savaklarla kontrol edilir. Havalandırmalı kum tutucular spiral akışlı havalandırma tankından oluşur. Spiral hız, tank boyutu ve verilen hava miktarı ile kontrol edilir. Vorteks akımlı kum tutucular ise silindir bir tanktan oluşur. Atıksu, tanka teğet olarak giriş yaparak girdap oluşturur. Santrifüj ve yerçekimi kuvvetleri kumun çökmesini sağlar. Şekil 3.2'de tipik bir havalandırmalı kum tutucu verilmiştir.

Şekil 3.2. Havalandırmalı kum tutucu

Kum tutucuların tasarımı, özgül ağırlığı 1,3-2,7 olan kum partiküllerini içeren 15,5°C sıcaklıktaki atıksular için yapılır. Yatay akışlı havalandırmasız kum tutucular için tipik tasarım kriterleri Tablo 3.5'te, havalandırmalı kum tutucular için tasarım değerleri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

Kum tutucularda toplanan kumu uzaklaştırmak için kullanılan ekipmanların pahalı olması ve yatay akışlı kum tutucuların birçoğunda kum yıkama ekipmanının gerekmesi, havalandırmalı kum tutucuların popülerliğini arttırmıştır. Havalandırmalı kum tutucular, saatlik pik debilerde, 0,2 mm boyutunda partikülleri, 2-5 dakikalık kalma süresinde gidermek üzere tasarlanmışlardır. Tasarımda, havalandırma difüzörleri, tabanın 0,45-0,60 m yukarısına yerleştirilirler.

Endüstriyel atıksuların da söz konusu olduğu havalandırmalı kum tutucularda havalandırmadan dolayı UOK (Uçucu Organik Karbon-VOC) oluşumu dikkate alınmalıdır. UOK oluşumu, arıtma tesisi işletmecileri açısından sağlık riski teşkil eder. UOK oluşumu önemli miktarlarda ise kum tutucu üzerine kapatılmalı veya havalandırmasız kum tutucular tercih edilmelidir.

Tablo 3.5. Yatay akışlı kum tutucuların tasarım kriterleri [3]

	Değer	
	Aralık	***Tipik***
Hidrolik kalış süresi, sn	*45-90*	*60*
Yatay hız, m/s	*0,24-0,40*	*0,31*
Çökelme hızı:		
65 no.lu elekten geçen madde, m/dk	*0,98-1,28*	*1,16*
100 no.lu elekten geçen madde, m/dk	*0,61-0,91*	*0,76*
Kontrol bölümünde yük kaybı (kanaldaki % derinlik)	*30-40*	*36*
Giriş ve çıkışta izin verilen türbülans	*$2D_m$~0,5L*	

D_m: kum tutucuda maksimum derinlik, L: kum tutucu hücresinin teorik uzunluğu.

Tablo 3.6. Havalandırmalı kum tutucuların tasarım kriterleri [1], [3].

	Değer	
	Aralık	***Tipik***
Pik debide hidrolik kalış süresi, dk	*2,5-5*	*3*
Boyutlar:		
Derinlik, m	*0,24-0,40*	*0,31*
Uzunluk, m	*0,98-1,28*	*1,16*
Genişlik, m	*0,61-0,91*	*0,76*
Genişlik-derinlik oranı	*1:1-5:1*	*1,5:1*
Uzunluk-genişlik oranı	*3:1-5:1*	*4:1*
Verilecek hava m^3/dk.m uzunluk	*0,19-0,46*	
Tutulan kum miktarı, $m^3/10^3$ m^3	*0,004-0,2*	*0,015*

Vorteks akımlı kum tutucular iki tiptir. Birinci tipte atıksu girişi ve çıkışı teğet olarak gerçekleşir. Dönen türbin, sabit akış hızı sağlarken ayarlanabilir bıçaklar, organiklerin kumdan ayrılmasını sağlarlar. Dönen türbin, ayrıca kum parçacıkları için silindirik bir akış oluşturur. Kum, yerçekimi ile haznenin içine çöker. Haznede biriken kum, kum pompası veya havalı kaldırmalı (mamut) pompa ile uzaklaştırılır (Şekil 3.3a).

İkinci tip Vorteks akımlı kum tutucularda giriş akımı, ünitenin üst kısmından teğet bir giriş yaparak serbest girdap oluşumunu sağlar. Atıksu, tepeden dönen silindirin merkezinden çıkış yapar (Şekil 4.3b). Silindirin içinde yoğunluğu 1'den büyük parçacıkların yerçekimi etkisiyle çökelmeleri önlenir. Çökebilen maddeler, kum tutucunun dibine yerçekimi ile çökerken, santrifüj kuvveti ile kumdan ayrılan organikler atıksu ile birlikte sistemi terk ederler. Sistemde yük kaybı, giderilen partiküllerin boyutuna bağlı olup çok ince parçacıklar söz konusu olduğunda yük kaybı miktarı yükselir. Bu çeşit kum giderme üniteleri oldukça yeni olup her biri 0,3 m^3/s debiyi kaldırabilir. Bu sistemler çok ağır olduğundan ya derin temelli olmalı veya toprak seviyesinin üstünde olacaksa terfi istasyonu yapılmalıdır. Dairesel (Vorteks akımlı) kum tutucuların tasarım kriterleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Şekil 3.3. Dairesel (Vorteks akımlı) kum tutucu

Şekil 3.3. Dairesel (Vorteks akımlı) kum tutucu (devamı)

Tablo 3.7. Dairesel (Vorteks) kum tutucular için tipik tasarım kriterleri [1], [3]

	Değer	
	Aralık	***Tipik***
Pik debide hidrolik kalış süresi, dk		*30*
Boyutlar:		
Çap		
Üst bölme, m	*1,22-7,32*	
Alt bölme, m	*0,91-1,83*	
Yükseklik, m	*2,74-4,88*	
Kum tutma verimi, %		
50 no.lu elekten geçen (0,30 mm üstü)		*95*
70 no.lu elekten geçen (0,24 mm üstü)		*85*
100 no.lu elekten geçen (0,15 mm üstü)		*65*

Kum miktarı: Tutulan kum miktarı; kanalizasyon sisteminin yerine ve durumuna, yolların buzlanmaya karşı ne sıklıkta kumlandığına, endüstriyel atıksu türüne, lavabo öğütücüsü kullanım oranına ve yöredeki çıplak arazi miktarı gibi faktörlere bağlıdır. Tutulan kum miktarı ise 0,004-0,21 $m^3/10^3 m^3$ civarındadır. Tablo 3.8'de muhtelif atıksu arıtma tesislerinde kum ve elek üstü madde miktarları verilmektedir. Atıksu karakteri ve ekipman verimliliğindeki farklılıklar, akış hızı ve toplanan ızgara/elek üstü maddeler ile kum arasında yeterli seviyede bir korelasyon kurulmasını imkansız kılmaktadır.

Kum uzaklaştırılması: Bazı büyük sistemlerde kum çamurla birlikte yakılır. Yürürlükteki yönetmeliklere de bağlı olarak, kumun kireçle stabilize edilip düzenli çöp depolama alanlarında bertarafı da gerekebilir.

Bazı arıtma sistemlerinde kum tutucular kullanılmaz, kum ön çökeltim tankında çöktürülür. Kum ayrımı, seyreltik birincil çamurun siklon tip kum ayırıcı da ayrılması ile sağlanır. Siklon, kum tutucu santrifüj ayırıcısı olarak görev yapar. Siklon ağır kum ve katı parçacıklar girdap hareketi ile küçük parçacıklardan ve sıvı kısımdan ayrılır. Bu sistemlerin faydası, kum tutucuların ilk yatırım maliyetinin ortadan kaldırılmasıdır. Mahzurları ise şunlardır:

- Seyreltik çamurun pompalanması çamur yoğunlaştırıcı gerektirebilir.
- Kumun birincil çamur ile pompalanması, çamur kolektörlerinin ve çamur pompalarının bakım gereksinimini ve çamur terfi maliyetini arttırır.

Tablo 3.8. Değişik atıksu arıtma tesislerinde kum ve elek üstü madde miktarları [3]

Tesisin yeri	*Debi* m^3*/gün*	*Kum* $m^3/10^3m^3$	*Elek üstü* $m^3/10^3m^3$
Uniontown, Pennsylvania	*11.400*	*0,074*	*0,006*
East Hartford, Connecticut	*15.100*	*0,017*	*0,009*
Duluth, Minnesota	*45.400*	*0,006*	*0,004*
Lamberts Point Water Pollution Control Plant, Norfolk Virginia	*75.700*	*0,034*	*0,009*
Village Creek W.W. Treatment Plant, Ft. Worth, Texas	*170.000*	*0,009*	*0,005*
County of Milwaukee, Wisconsin, South Shore	*454.000*	*0,003*	*0,004*
Twin Cities Metro W.W Treatment Plant, Minnesota	*825.000*	*0,034*	*0,008*
Chicago, Illinois	*1.260.000*	*0,003*	*0,006*

3.1.3. Dengeleme

Arıtma sistemlerinde dengelemenin amacı atıksu karakteristiklerindeki değişiklikleri minimize ederek arıtım kademelerinde optimum şartları sağlamaktır. Dengeleme ünitesinin boyutu ve tipi, atık suyun miktarı ve karakterizasyonu ile ilgilidir. Dengeleme tankı, atıksu debisindeki farklılıkları ve üretimden dolayı zaman zaman atılan veya istemeyerek dökülen bazı konsantre atıksu akımlarını biriktirebilecek boyutta tasarlanır. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde dengelemenin amaçları şunlardır [4]:

- Biyolojik sisteme şok yüklemeyi önlemek amacıyla organik yük dalgalanmalarını yumuşatmak,
- Yeterli pH kontrolü sağlamak veya nötralizasyon için gerekli kimyasal madde miktarını minimize etmek,
- Üretim olmadığı zamanlarda biyolojik sisteme sürekli atıksu sağlamak,
- Kanalizasyon sistemine daha kontrollü ve çok değişken olmayan su deşarj etmek,
- Biyolojik sisteme yüksek konsantrasyonda toksik maddelerin girişini önlemek.

Dengeleme ünitesinde, konsantrasyonun dengelenmesi ve çökelmenin önlenmesi amacıyla karıştırma uygulanır. Buna ilaveten karıştırma ve havalandırma ile yükseltgenebilen maddelerin ve BOİ'nin kısmi oksidasyonu gerçekleşir. Dengeleme tanklarında karıştırma yöntemleri şunlardır:

- Giriş akımının dağıtımı ve perdeleme
- Türbinlerle karıştırma
- Difüzörle havalandırma
- Mekanik havalandırıcılarla havalandırma

Dengeleme ünitesi tasarımında şu hususlar dikkate alınır:

- Dengeleme ünitesinin arıtma tesisi içindeki yeri
- Dengelemenin hat üzerinde ya da hat dışında olması
- Gerekli dengeleme havuzu hacmi

3.1.3.1.Dengeleme Ünitesinin Yeri

En uygun dengeleme tankı yeri, arıtmanın türü ile atıksu ve atıksu toplama sistemi özelliklerine bağlı olduğundan değişik dengeleme tankı yerleri için detaylı çalışma yapılmalıdır. Dengeleme tankının mekanik (ilk) arıtmadan sonra, biyolojik arıtmadan önce bir yerde olması uygundur. İlk arıtmadan hemen sonra dengeleme, çamur ve köpük problemlerini azaltacaktır. İlk çökeltimden ve biyolojik arıtmadan önce yapılacak dengeleme ünitelerinde, katı maddelerin çökmesini ve konsantrasyon dalgalanmalarını önlemek için yeterli karışım, koku problemine karşı da yeterli havalandırma sağlanmalıdır.

3.1.3.2.Hat Üstü veya Hat Dışı Dengeleme

Dengeleme havuzu atıksu kanal hattına yerleştirilebildiği gibi hat dışına da yerleştirilebilir. Hat dışı dengelemede ortalama günlük debinin üzerindeki debi fazlası by-pass'a yerleştirilmiş dengeleme havuzundan geçirilir, ortalama debi düşünce suyu boşaltmaya başlar. Atıksu hattına yerleştirildiğinde bütün debi bu havuzdan geçer. Bu yüzden konsantrasyon ve debi, hat dışı sisteme kıyasla büyük ölçüde dengelenir.

3.1.3.3.Gerekli Dengeleme Havuzu Hacmi

Debi dengelenmesinde gerekli hacim, toplam akış hacminin (debinin) zamana karşı çizilmesi ile hesaplanır. Aynı diyagrama ortalama günlük debi (grafik orijini ile son noktanın birleştirildiği düz çizgi) de çizilir (Şekil 3.4). Debi toplam eğrisine teğet, ortalama günlük debi eğrisine paralel bir doğru çizilir. Gerekli dengeleme hacmi, teğet çizilen noktanın ortalama günlük debi doğrusuna dik doğrultudaki uzaklığıdır. Eğer toplam debi grafiği Şekil 3.4-b'deki gibi ortalama debi doğrusunun üstüne çıkıyorsa gerekli dengeleme hacmi, iki teğet doğru arasındaki dik uzaklıktır. Uygulamada dengeleme tankı hacmi teorik olarak hesaplanan değerden daha büyük tutulur.

Şekil 3.4. Tipik farklı toplam debi grafiği esas alınarak gerekli dengeleme hacmi bulunmasında kullanılan kütle diyagramı [1]

3.1.3.4.Dengeleme Havuzu İnşası

Dengeleme tankı inşasında dikkate alınacak hususlar, kullanılan malzeme, tank şekli ve teçhizattır. Mevcut bir havuz kullanılacaksa gerekli değişiklikler yapılır. Genellikle borulama ve yapısal değişiklikler gerekir.

Dengeleme Havuzu Malzemesi: Dengeleme havuzları toprak, beton veya çelikten inşa edilebilir. Toprak havuzların maliyeti daha düşüktür. Yerel şartlara bağlı olarak yanal eğim 3:1 ve 2:1 olabilir. Tipik bir dengeleme tankı kesiti Şekil 3.5'te verilmiştir. Yeraltı suyu kirliliğini önlemek için havuz geçirimsiz bir malzeme ile kaplanır. Havasız şartların oluşmasını önlemek için difüzörlü havalandırma veya yüzer havalandırıcılar kullanılır. Yüzer havalandırıcı

kullanıldığında erozyona karşı koruma sağlamak amacıyla havalandırıcının altına beton bir plaka yerleştirilir. Yüzer havalandırıcılarda havalandırıcıyı korumak amacıyla minimum çalışma seviyesi 1,5-2 m olarak öngörülmektedir.

Havuz Şekli: Havuz şekli hat üstü veya hat dışı dengeleme kullanılması durumuna göre değişir. Hat üstü dengeleme uygulandığında dengeleme havuzu mümkün olduğu kadar tam karışımlı bir reaktör gibi çalışacak şekilde tasarlanmalı, giriş ve çıkış yapıları kısa devreyi en aza indirecek şekilde olmalıdır. Giriş akımının karıştırıcıya yakın bir yerde olması, birçok noktadan giriş ve çıkış olması, birden fazla bölümlü gibi uygulamalar gerekebilir.

Şekil 3.5. Tipik bir dengeleme havuzu kesiti [1]

İşletme Teçhizatı: Dengeleme tankı tasarımına dahil edilmesi gereken işletme teçhizatı şöyle özetlenebilir: Havuz duvarlarında birikebilecek katıları ve yağı temizleme düzeneği, pompa arızası durumuna karşı acil taşma (dolu savak) düzeneği, yüzer madde ve köpük için yüksek çıkış ve köpük problemi varsa havuzun kenarlarında köpük birikimini önlemek üzere su fıskiyesi.

3.1.3.5.Karıştırma ve Hava İhtiyacı

Dengeleme tanklarının düzgün çalışması için karıştırma ve havalandırma gerekmektedir. Karıştırma derecesi, tank içeriğinin karışmasını sağlayacak ve tankta katıların çökmesini önleyecek düzeyde olmalıdır. 220 mg/L askıda katı madde içeren orta kuvvette bir evsel atıksu için karıştırma ihtiyacı 4-8 W/m^3 dür. Havalı şartları korumak için de 0,01- 0,015 m^3/m^3.dk debide hava verilmelidir. Ön çökeltim sonrası ve kısa kalma süreli (iki saatten daha az) dengelemede havalandırma gerekmeyebilir.

3.1.3.6.Pompa ve Pompa Kontrolü

Dengeleme, atıksu arıtma tesisine göre ilave bir su seviyesi farkı gerektirdiğinden pompalama gerektirir. Pompalama dengeleme havuzunda veya dengeleme çıkışında uygulanır ancak arıtma tesisinin emniyeti açısından dengeleme havuzunda pompalama tercih edilir. Minimum geometrik terfi yüksekliği, dinamik kayıplar ve su seviyesindeki değişimlerin toplamıdır. Bazı durumlarda hem atıksu girişi hem de çıkışı için terfi gerekebilir.

3.2. Birinci Kademe Arıtma

Atıksu arıtımında ön çökeltim ve öncesi birimlerde gerçekleştirilen işlemlerin tamamına (çamur yoğunlaştırma, stabilizasyon ve susuzlaştırma da dahil) birinci kademe arıtma adı verilir.

3.2.1. Ön Çökeltim

Ön çökeltim, durgun şartlarda özel olarak tasarımlanmış çökeltim tanklarında, çökebilen ve yüzebilen katıların ayrılmasını sağlar. Ön çökeltim tanklarının üç ana fonksiyonu vardır:

- Çökeltim ile sıvıdan katıları (çamur) ayırma,
- Yüzdürme ile sıvıdan katıları (köpük, yağ, yüzen birikintiler) ayırma,
- Katıları yoğunlaştırma.

Ham atıksudan katıların giderilmesi ile önemli miktarda askıda katı ve $BOİ_5$ de giderilir, böylece biyolojik arıtma ünitesinde arıtılacak organik yük azaltılmış olur. Organik yükteki azalma biyolojik arıtma ünitesinde sisteme verilmesi gerekli oksijen miktarının azalmasına, dolayısı ile enerji ihtiyacının ve oluşan fazla aktif çamur miktarının azalmasına yol açar. Ham atıksudaki köpüğün giderilmesi ile de havalandırma ve çökeltim tanklarında köpük oluşumu azaltılmış olur. Ön çökeltim tanklarının bunların dışındaki yararları Tablo 3.9'da verilmiştir.

Ön çökeltim tankları, Tablo 3.9'da belirtilen işlevlerin de sağlanması için, genellikle büyük kapasiteli (>3800 m^3/gün) atıksu arıtma tesislerinde kurulur. Daha küçük tesislerde, ikinci kademe arıtma ünitesi tüm yükü kaldırabilecekse ve köpük, yağ ve yüzen maddeler işletme problemi yaratmayacaksa ön çökeltim ünitesi kurulmaz. Damlatmalı filtre, döner biyolojik disk ve batmış biyofiltre gibi ikinci kademe arıtma üniteleri mevcutsa ekipmanın zarar görmemesi için mutlaka sistemin önüne ön çökeltim tankı konulmalıdır.

Çökeltim tankları dairesel veya dikdörtgen planlıdırlar. Seçim, tesisin büyüklüğü, yerel arazi şartları, mevcut birincil arıtma ekipmanı, ilgili mühendisin kararı, iş sahibinin tercihi, yatırım ve işletme maliyeti gibi faktörlere bağlıdır.

Dairesel ön çökeltim tankları: Dairesel ön çökeltim tanklarında besleme merkezden yapılır. Atıksu merkezden dış duvarlara doğru hareket eder ve dış çevre boyunca yer alan savaktan çıkış yapar. Çöken çamur sıyırıcılarla merkeze doğru itilir. Üstte toplanan yüzer maddeler döner bir sıyırıcı ile toplanarak bir haznede birikir. Dairesel bir çökeltim tankı Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Ön çökeltim tanklarının işlevleri [5], [6]

İşlev	***Etki***
Ham atıksu kalite ve debisinin dengelenmesi	*Sabit debi ile ikinci kademe arıtma ünitesinin performansının iyileşmesi sağlanır.*
Kum tutucu	*Ayrı bir ünite yoksa çamur ve kum giderimini bir yerde toplar.*
Atık suyun $BOİ_5$ ve AKM giderimini arttırmak ve besin elementi giderimi için ham atık suyun kimyasal arıtımı	*Ön çökeltim tankına kimyasal madde ilavesi ile $BOİ_5$ ve AKM giderimi arttırılır ve önemli oranda besin elementi giderimi (genellikle fosfor) sağlanır.*

Dikdörtgen ön çökeltim tankları: Dikdörtgen planlı ön çökeltim tanklarında atıksu beslemesi bir uçtan yapılır, atıksu uzun kenar boyunca hareket ederek öbür uçtan tankı terk eder. Çöken çamur dip kısımda atık suyun ters yönünde hareket eden sıyırıcılar vasıtasıyla çamur toplama bölümüne itilir. Tüm su yüzeyinde dolaşan köpük, sıyırıcılar yüzeydeki köpüğü toplayarak atıksu çıkışı tarafındaki köpük haznesine iter (Şekil 3.7).

Ön çökeltim tankları yüzey yüküne göre boyutlandırılırlar. İyi bir performans elde etmek için bunun dışında tank derinliği, hidrolik kalma süresi, çamur sıyırıcı küreme kapasitesi gibi parametrelerin de dikkate alınması gereklidir. Yüzeysel hidrolik yük, tüm geri devir akımları da dahil, çökeltim tankına giriş debisinin toplam tank alanına (çıkış akımı toplama olukları da dahil) oranıdır. Ön çökeltim tankları için önerilen tasarım değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Şekil 3.6. Dairesel çökeltim tankı şematik görünümü

Uygun hidrolik yüklerde iyi tasarımı yapılmış ve düzgün işletilen bir ön çökeltim tankında ham evsel atıksuda %30-35 $BOİ_5$, %50-60 askıda katı madde giderimi sağlanır. Endüstriyel atıksu halinde ise atıksudaki çözünmüş $BOİ_5$ miktarı farklı olduğundan bu oranlar değişir. Ön çökeltim tankına kimyasal ilavesi yapılırsa arıtım verimleri yükselir. Çökeltim tankında hidrolik kısa devre, atıksu debisindeki aşırı değişiklikler, çok yüksek ya da düşük atıksu sıcaklıkları, yüksek geri devir oranları, $BOİ_5$ ve AKM giderimlerinin tipik değerlerin altına düşmesine neden olur.

Şekil 3.7. Dikdörtgen ön çökeltim tankı

Ön çökeltim tankının iyi çalışmaması veya aşırı yüklenmesi durumunda son çökeltim tankı yüklemesi de artmış olacaktır. Ancak son çökeltim tankı daha yüksek yüklemeleri kaldıracak şekilde tasarlanmışsa bu durum bir problem oluşturmaz. Aynı şekilde ön çökeltim tankı yüzeysel hidrolik yükünün önerilenin üstünde olması durumunda da ancak aktif çamur sistemi daha yüksek organik yükü kaldıracak şekilde tasarlanmışsa problem olmayacaktır.

Tablo 3.10. Ön çökeltim tankları için gerekli tasarım kriterleri [1], [5].

	Aralık	***Tipik***
Ön çökeltim (son çökeltim mevcut):		
Kalma süresi, saat	*1,5-2,5*	*2*
Yüzey yükü, m^3/m^2.gün:		
Ortalama akış	*33-49*	
Pik saatlik debi	*81-122*	*102*
Savak yükü, m^3/m.gün	*124-496*	*248*
Aktif çamur geri dönüşlü ön çökeltim:		
Kalma süresi, saat	*1,5-2,5*	*2*
Yüzey yükü, m^3/m^2.gün:		
Ortalama akış	*24-33*	
Pik saatlik debi	*46-69*	*61*
Savak yükü, m^3/m.gün	*124-496*	*248*

Savak yükünün ön çökeltim tankı performansına etkisi çok azdır. Savak yükünün 124-496 m^3/m.gün aralığında olması önerilmektedir. Aşırı değerleri önlemek üzere, yeterli tank derinliği ve çıkış suyu kanalları arasında yeterli mesafe olması önerilmektedir. Böylece dipte toplanan çamurun yüzeye doğru hareketlenip çıkış suyu ile sürüklenmesi önlenmiş olur.

Ortalama tasarım debisinde hidrolik bekleme süresi 2,5 saati geçmemelidir. Uzun kalma sürelerinde septik şartlar oluşur ki bu da çökelme performansının düşmesine (havasız çürüme şartlarında oluşan gazlar çamurun çökmesini engeller) ve koku oluşmasına sebep olur (havasız çürüme sırasında çıkan gazlar). Uzun çamur bekleme süresi, çöken organik katıların çözünmesine neden olur bu da takip eden arıtma üniteleri için daha yüksek organik yükleme demektir. Düzgün tasarlanmış çamur toplama üniteleri, toplanan çamurun uygun sürede nakli ile tankın dibinde çamur birikimini önleyecektir. Çamur kalınlığı, septik şartların oluşumunu ve uzun çamur kalma yaşını önlemek üzere minimize edilmelidir.

Çökelme işlemlerinde çöken çamurun akışkan tarafından sürüklenmemesi için akışkanın yatay hızı büyük önem taşımaktadır. Akışkanın yatay hızının belirli bir değerden büyük olması durumunda, çökeltme tankı tabanında birikmiş çamurun sürüklenme riski vardır. Kanalizasyon borularında yatay hız, katı parçacıkların kanalda çökmesini önlemek için yüksek tutulur. Kritik yatay hız aşağıdaki formülle hesaplanır [1], [7].

$$V_H = \left(\frac{8k * (s-1)gd}{\lambda}\right)^{1/2} \tag{3.5}$$

Burada;

V_H : Kritik yatay hız, m/s
s : Partikül yoğunluğu, (kg/m^3)
g : Yerçekimi ivmesi, m/s^2
d : Partikül çapı, m
k : Sabit (kum için 0,04, yapışkan çamur için 0,06)
λ : Darcy-Weisbach sürtünme faktörü (0,02-0,03)

Boyutlandırma: Dikdörtgen ve dairesel ön çökeltim tanklarının tipik boyutları Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.11. Ön çökeltimde kullanılan dikdörtgen ve dairesel planlı çökeltim tankı boyutları ve tasarım kriterleri

	Aralık	***Tipik***
Dikdörtgen		
Derinlik, m	*3-4,5*	*3,7*
Uzunluk, m	*15-90*	*24-40*
Genişlik, m	*3-24*	*5-10*
Sıyırıcı hızı, m/dk	*0,6-1,2*	*0,9*
Dairesel		
Derinlik, m	*3-4,5*	*3,7*
Çap, m	*3-60*	*12-45*
Taban eğimi, mm/m	*62-167*	*83*
Sıyırıcı devir sayısı, dev/dk	*0,02-0,05*	*0,03*

3.2.2. Kimyasal Destekli Ön Çökeltim

Kimyasal destekli ön çökeltim (1. kademe arıtma) 100 yılı aşkın bir süreden beri bilinmekle birlikte evsel atıksularda uygulanması 20. yy'da gerçekleştirilmiştir. En çok bilinen

uygulamaları; alıcı ortamlara deşarj öncesi yüksek verimli ön arıtım, fosfor giderimi ve kompakt bir ön arıtma sisteminin en önemli bileşeni olma şeklinde sıralanabilir. Kimyasal (destekli) ön çökeltim (KDÇ), evsel atıksulara alum veya $FeCl_3$ (koagülant, pıhtılaştırıcı) ile flokları güçlendirmek üzere polielektrolit (flokülant, yumaklaştırıcı) ilavesiyle gerçekleştirilen bir fiziko-kimyasal arıtma prosesidir. Bu sayede konvansiyonel ön çökeltime göre önemli ölçüde daha yüksek $BOİ_5$, AKM, TP ve patojen giderimleri sağlanabilmektedir.

	Konvansiyonel ön çökeltim	***KDÇ***
$BOİ_5$ giderimi (%)	*20-35*	*60-75*
AKM giderimi (%)	*40-50*	*80-95*

Tipik bir KDÇ prosesi akım şeması Şekil 3.8'de verilmiştir.

Şekil 3.1. KDÇ prosesi akım şeması

Genelde iyi işletilen bir KDÇ sistemiyle, evsel atıksuların Yüksek Yüklü Aktif Çamur (A) prosesi eşdeğeri arıtma sağlanabilmektedir.

KDÇ prosesinde düşük dozlu metal tuzu kullanımı esastır. En yaygın kullanılan pıhtılaştırıcılar alum ve $FeCl_3$'tür. Koagülant dozu 20~50 mg/L aralığında tutulur ve 0,3~1,0 mg/L'lik organik polielektrolit ilavesiyle güçlendirilir. Kurulu tesislerin çoğunda <20 mg/L $FeCl_3$ ve <0,2 mg/L'lik polielektrolit dozlarının yeterli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte pratikte optimum kimyasal madde dozlarının standart kavanoz testleriyle belirlenmesi önerilmektedir. Pıhtılaştırıcı tercihen havalandırmalı kum tutucu girişine, yumaklaştırıcı ise ön çökeltim öncesine (kum tutucu çıkışında) uygulanmaktadır.

KDÇ prosesi çökeltim havuzunda ortalama yüzeysel hidrolik yük konvansiyonel ön çökeltim havuzlarındaki 24~48 m^3/m^2.gün değerinin 2~3 katı (60~100 m^3/m^2.gün) alınabilmekte olup ~2 saatlik ortalama çökelme süresi önerilmektedir.

Konvansiyonel ve kimyasal destekli ön çökeltim proseslerinin AKM ve $BOİ_5$ giderim verimlerinin mukayesesi Şekil 3.9'da görülmektedir.

Şekil 3.9. Konvansiyonel ve kimyasal destekli ön çökeltim proseslerinde AKM ve BOİ$_5$ giderimleri

ABD'de kurulu 19 adet birinci kademe evsel atıksu arıtma sistemine uygulanan KDÇ dönüşümü sonucunda, <30 mg/L $FeCl_3$ ve <0,13 mg/L anyonik polimer dozlandığında elde edilen ortalama AKM, BOİ$_5$, TP ve TN giderimleri sırasıyla %71, %55, %63 ve %37 olarak raporlanmıştır. Aynı araştırmada söz konusu verimlerin bazı büyük tesislerde (Hyperion AAT gibi) %83 AKM, %52 BOİ$_5$ ve %80 TP olarak gerçekleşip belirtilmektedir [8].

KDÇ prosesinde, $FeCl_3$ ve organik polimer kullanımı sonucu açığa çıkacak olan çamur miktarının

$$S(kg/gün) = AKM_{gid} + 1{,}42\, P_{gid} + 0{,}66\, FeCl_{3\ kullanılan} \tag{3.6}$$

İfadesiyle bulunabileceği belirtilmektedir [8].

Burada;

S	: Toplam çamur oluşumunu (kg KM/gün)
AKM_{gid}	: Giderilen AKM miktarını (kg KM/gün)
P_{gid}	: Giderilen toplam P miktarını (kg KM/gün)
$FeCl_{3\ kullanılan}$	: Tesise eklenen $FeCl_3$ miktarını (kg $FeCl_3$/gün)

göstermektedir.

Oluşan çamurun kireçle stabilizasyon veya ~7 günlük kompostlaştırma sonrası araziye uygulanması ya da 15-20 günlük anaerobik çürütme sonrası uzaklaştırılması mümkündür.

KDÇ prosesinin inşa (ilk yatırım) maliyeti 20~40 $/kişi, işletme ve bakım maliyeti ise 1,5~2,0 $/kişi yıl aralığında değişmektedir [9].

3.3. Atıksu Pompaları ve Pompa (Terfi) İstasyonları

Atıksu terfi, atıksu, yağmur suyu, çamur ve arıtılmış suların uzaklaştırma işlemlerini kapsar. Debilerdeki dalgalanmalar ve bir problem durumunda çevreyi kirletme riski dolayısıyla kanalizasyon ve yağmur suyu terfi tesisleri, emniyetli ve bakımı kolay olmalıdır. Özellikle büyük pompa istasyonlarında pompa verimi ve atıksu içindeki katıların çökelmeden pompalanması çok önemlidir.

Pompa ve ekipmanlarının doğru seçimi ve kullanımı tecrübe gerektirir. Bu bölümde atıksu pompaları seçimine yardımcı olacak temel bilgiler verilmiştir. Pompalar teorik olarak kinetik enerjili pompalar ve pozitif yer değiştirmeli pompalar olmak üzere iki ana grupta toplanır.

Pompa istasyonları ise ıslak ve kuru hazneli olmak üzere iki grupta toplanır. Islak hazneli terfi merkezleri, düşey milli ve dalgıç pompalar da teşkil edilir. Islak hazneli düşey milli terfi istasyonlarında motor, ıslak hazne sıvı seviyesinin üstünde monte edilir fakat pompa atıksuya batmış kalır (Şekil 3.11a). Dalgıç pompalar, sıvı içinde çalışmaya uygun, özel izolasyonlu ve entegre motorludurlar (Şekil 3.11b).

Kuru hazneli terfi merkezlerinde kuru tip veya kendinden emişli santrifüj pompalar kullanılır. Pozitif emmenin mümkün olabilmesi için pompa ekseni ıslak taraftaki suyun alt (min) seviyesi altında olmalıdır (Şekil 3.11d). Diğer bir alternatif de, Şekil 3.11c'de görüldüğü gibi, pompanın bir kademe teşkili sonucu ıslak bölümün içinde olmasıdır. Bunların dışındakiler ise vidalı (Şekil 3.11e), hava yükseltmeli (mamut) (Şekil 3.11f), basınçlı havalı (Şekil 3.11g) pompalardır. Çeşitli pompa tipleriyle ilgili kısa açıklamalar ve uygulama alanları Tablo 3.12'de özetlenmiştir.

Terfi (Basma) Yüksekliği: Belirli bir seviyenin üstündeki belli yükseklikteki sıvı kolonuna eşit hidrolik enerjiyi (kinetik veya potansiyel) tanımlar. Terfi yüksekliği ve basınç birbirleri cinsinden ifade edilebilirler (1 m su = 9,81 kPa). Terfili iletimde adı geçen başlıca terfi yüksekliği tipleri, emme yüksekliği, (manometrik) basma yüksekliği ve geometrik yüksekliktir.

Bir pompanın toplam terfi yüksekliği (H_m) ise geometrik yükseklik (H_0), toplam yük kaybı (h_f) (yersel yük kayıpları dahil), ve hız yüksekliği (h_v) toplamıdır. Yük kaybı borulardaki yük kaybı olup (emme ve basma), Darcy-Weisbach veya Hazen-Williams formülleri ile hesaplanabilir. Yersel yük kayıpları (h_m), bağlantılar, vana, dirsek, giriş, çıkış gibi yerlerde oluşur ve hız yüksekliği cinsinden hesaplanır (Şekil 3.10).

$$H_m = H_0 + h_f + h_m + h_v \tag{3.7}$$

Atıksu terfi hatlarındaki akım hızı <2,5 m/s olduğundan h_v ihmal edilebilir.

Şekil 3.10. Santrifüj pompalarda işletme noktası

Pompalarda güç ihtiyacı: Pompalarda güç ihtiyacı (N) (3.8) formülü ile kW olarak hesaplanır [10].

$$N = \frac{\rho\, g\, Q\, H_m}{1000\, \eta} \tag{3.8}$$

Burada;

Q : Gerekli pompa debisi, m^3/s
η : Pompa verimi (%)

ρ : Pompalanacak sıvının yoğunluğu, kg/m^3
H_m : Toplam terfi yüksekliği
g : Yerçekimi ivmesi, m/s^2

Pompa verimi, santrifüj pompalar için 0,7-0,8 aralığında alınabilir.

Terfi merkezleri tasarımı konusunda daha kapsamlı bilgi için Ek1 ile [11] ve [12] kaynaklarına başvurulabilir.

Şekil 3.11. Çeşitli pompa tipleri ve pompa istasyonları [1]

Tablo 3.12. Pompa çeşitleri ve atıksu arıtımında uygulama alanları [1], [2]

Ana sınıflama	*Pompa tipi*	*Kısa açıklama*	*Başlıca uygulamaları*
Kinetik enerjili	*Santrifüj*	*Pervane giriş ve deşarj bağlantıları ile bir haznede bulunur. Yük santrifüj kuvveti ile oluşur.*	*Ham atıksu, biyolojik çamur geri devir ve atma, ön çökeltim çamuru, yoğunlaştırılmış çamur, çıkış atıksuyu.*
	Vorteks	*Hücre içindeki pervane, akımdan bağımsız bir haznede bulunur.*	*Köpük, kum, çamur ve ham atıksu*
	Tork akışlı	*Dönen parça (çark) sıvıyı kapalı bir hazne içinde döndürerek basma borusuna iter.*	*Yağlama yağları, kimyasal çözeltiler, küçük debide su ve atıksu*
Pozitif yer değiştirmeli	*Vidalı (Arşimet)*	*Eğimli bir hazne içinde spiral bir vidadan ibarettir*	*Kum, çöktürülmüş ön çökeltim ve biyolojik arıtma çamurları, yoğunlaştırılmış çamur, ham atıksu*
	Diyafram	*Bir silindirin etrafına tutturulmuş esnek bir diyafram veya disk*	*Kimyasal çözeltiler*
	Pistonlu	*Silindir içinde hareket eden bir piston veya şırıngadan ibarettir. Her bir defada belirli miktar sıvı pompalar*	*Köpük, ön çökeltim, biyolojik ve son çökeltim çamurları, kimyasal çözeltiler*
	Hava ile yükseltmeli	*Kısmen batmış dik bir tüpün içine hava gönderilir. Hava kabarcıkları tüpün içindeki akışkanın birim hacim ağırlığını düşürür. Yüksek birim hacim ağırlığındaki akışkan düşük yoğunluklu olanla yer değiştirerek onu tüp içinde yükselmeye zorlar.*	*Biyolojik çamur geri devri ve deşarjı, kum*
	Basınçlı havalı	*Hava giriş hücresine basınçla gönderilir, basınçlı hava atıksuyu iter.*	*Küçük tesislerde (100-600 L/ dk) ham atıksu*

3.4. Karıştırma

Atıksu arıtımının birçok kademesinde karıştırma gereklidir. Örneğin: bir maddeyi diğeri ile tamamen karıştırmak, sıvı süspansiyonlarını karıştırmak, flokülasyon, ısı transferi gibi. İkinci kademe arıtma çıkış suyunun dezenfeksiyon için klor veya hipoklorit ile karıştırılması gerekir. Aktif çamur prosesinde havalandırma tankı muhteviyatının karıştırılması, sisteme mikroorganizmalar için hava veya oksijen verilmesi gerekir. Aktif çamur sistemlerinde havalandırma sistemi aynı zamanda karışımı da sağlar. Çamurdan suyun ayrılmasının kolaylaşması için çamur bazı kimyasallarla karıştırılır. Havasız arıtımda, biyolojik dönüşümün hızlanması ve tüm reaktörün homojen olarak ısınmasının sağlanması için karıştırma uygulanır.

Karıştırma, boru veya kanalda veya reaktörde olmak üzere ayrılır. Boru veya kanalda karışımda amaç bir maddeyi diğerinin içinde sürekli karıştırmaktır. Karıştırma süresi saniye mertebesindedir. Kimyasalların bir sıvıda hızlı karıştırılması çeşitli şekillerde yapılabilir:

- Açık kanallarda hidrolik sıçrama ile
- Venturi kanallarında
- Borularda
- Pompalama ile
- Statik mikserlerle
- Mekanik mikserlerle

Bunlardan ilk dördünde karışım türbülansla sağlanır. Statik mikserlerde türbülans, enerji kaybı ile sağlanır. Mekanik mikserlerde ise türbülans, dönen bir çark vasıtasıyla enerji verilmesi ile sağlanır.

Reaktörde karıştırmada ise amaç bir reaktör veya tanktaki muhtevayı sürekli karışım halinde tutmaktır. Sürekli karıştırma çeşitli şekillerde yapılabilir:

- Mekanik mikserlerle
- Basınçlı havalı (pünömatik)
- Statik mikserlerle
- Pompalama ile

Basınçlı hava ile karıştırma biyolojik arıtımın havalandırma kademesinde uygulanır.

3.4.1. Karıştırmada Enerji Dağılımı

Birim sıvı hacmine verilen enerji, karıştırmanın etkinliği için yaklaşık bir ölçümdür.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \tag{3.9}$$

G : Ortalama hız gradyanı, L/ sn
P : Güç ihtiyacı, W
μ : Dinamik viskozite, N. sn/m^2
V : Reaktör hacmi, m^3

Bu bağıntıda her iki taraf teorik hidrolik kalma süresi t_d =V /Q ile çarpılırsa:

$$Gt_d = \frac{1}{Q}\sqrt{\frac{PV}{\mu}} \tag{3.10}$$

elde edilir.

Burada;

t_d : kalma süresi, sn
Q : debi, m^3/s

Muhtelif karıştırma işlemleri için tavsiye edilen G değerleri Tablo 3.13'te verilmiştir.

3.4.2. Karıştırmada Enerji İhtiyacı

Karıştırma şekline göre enerji ihtiyacı aşağıda verilmiştir.

Pervane ve türbin karıştırıcılar: Karıştırma hızı ve türbülans ne kadar büyükse karıştırma da o kadar etkilidir. Laminer ve türbülanslı akım şartları için aşağıdaki formüller kullanılır.

Laminer akış için ($Re < 10^4$):

$$P = k\,\mu\,n^2\,D^3 \tag{3.11}$$

Tablo 3.13. Atıksu arıtma proseslerinde tipik hız gradyanı ve kalma süreleri

Proses	***Değer aralığı***	
	Kalma süresi	***G, sn^{-1}***
Hızlı karıştırma		
Atıksu arıtımında tipik hızlı karıştırma işlemleri	*5-20 sn*	*250-1.500*
Temaslı filtrasyon proseslerinde hızlı karıştırma	*<1-5 sn*	*1.500-7.500*
Yumaklaştırma		
Atıksu arıtımında kullanılan tipik flokülasyon prosesleri	*10-30 dk*	*20-80*
Doğrudan filtrasyon proseslerinde flokülasyon	*2-10 dk*	*20-100*
Temaslı filtrasyon proseslerinde flokülasyon	*2-5 dk*	*30-150*

Türbülanslı akış için ($Re > 10^4$):

$$P = k\,\rho\,n^3\,D^5 \tag{3.12}$$

Burada;

P : Enerji ihtiyacı, W,
k : sabit, (Tablo 3.13),
μ : sıvının dinamik viskozitesi, N. sn / m^2,
ρ : akışkanın yoğunluğu, kg / m^3,
D : karıştırıcı pervane çapı, m,
n : karıştırıcı devir sayısı, dev/s.

Reynolds sayısı (3.13) formülü ile bulunabilir.

$$Re = \frac{D^2 n \rho}{\mu} \tag{3.13}$$

Burada;

Re : Reynolds sayısı,
D : pervane çapı, m,
n : dev/s
ρ : sıvının yoğunluğu, kg/m^3,
μ : dinamik viskozite, N sn/m^2.

k değerleri Tablo 3.14'te verilmiştir. Havuzdaki girdap şartlarının, dört adet perde ile ortadan kaldırıldığı kabul edilmektedir (perdelerin her biri tank çapının %10 u genişliğindedir).

Pedallı karıştırıcılar: Pedallı karıştırıcılar genellikle yavaş dönerler. Fiziko-kimyasal arıtımda atıksuya alüminyum veya demir sülfat ve polielektrolit ilave edilirse pedallar floklaştırıcı olarak görev yapar. Flokülasyon yavaş hareket eden pedallar ve hafif karıştırma ile hızlanır. Karıştırma hızlı olursa oluşan floklar parçalanır ve küçülür böylece çökmeleri zorlaşır. Floklaşma 10-30

dakikada tamamlanır. 0,6-0,9 m/s pedal ucu hızında flokları kırmadan yeterli türbülans sağlandığı bildirilmektedir. Pedallı sistemlerde güç ihtiyacı pedalların sürükleme kuvveti ile ilişkilendirilir (3.14).

$$F_D = \frac{C_D\, A\, \rho\, v_p^2}{2} \tag{3.14}$$

$$P = F_D v_p = \frac{C_D\, A\, \rho\, v_p^3}{2} \tag{3.15}$$

Tablo 3.14. Karıştırmada güç ihtiyacı eşitliğindeki k değerleri

Sürücü	***Laminer Akım***	***Türbülanslı Akım***
Pervaneli, kare aralıklı, 3 kanatlı	*41,0*	*0,32*
Pervaneli, iki diş aralığı, 3 kanatlı	*43,5*	*1,00*
Türbin, 6 düz kanatlı	*71,0*	*6,30*
Türbin, 6 eğik kanatlı	*70,0*	*4,80*
Fan türbini, 6 kanatlı	*70,0*	*1,65*
Türbin, 6 ok tipli kanatlı	*71,0*	*4,00*
Düz kanatlı, 6 kanatlı	*36,5*	*1,70*
Kaplanmış türbin, 2 eğik kanatlı	*97,5*	*1,08*
Bobinli kaplanmış türbin (perdesiz)	*172,5*	*1,12*

Burada;

F_D : sürükleme kuvveti, N,
C_D : akışkana dik yönde hareket eden pedalın sürükleme katsayısı,
A : pedalların enine kesiti, m^2,
ρ : akışkan kütle yoğunluğu, kg/m^3,
v_p : pedalların akışkana kıyasla rölatif viskozitesi, m/s, genellikle pedal ucu hızının 0,6-0,75 katı kabul edilir.
P : güç ihtiyacı, W.

Statik karıştırıcılar: Statik karıştırıcıların hareketli parçaları yoktur. Tipik örnek boru hatlarındaki statik karıştırıcılardır. Hattaki statik karıştırıcılarda hızda ani değişiklikler oluşturulur. Statik karıştırıcılar, kimyasalların karıştırılmasında, şaşırtmalı perdeliler ise flokülasyonda kullanılır. Statik karıştırıcılarda kullanılan güç miktarı (3.16) ile bulunabilir.

$$P = \gamma\, Q\, h \tag{3.16}$$

Burada;

γ : suyun özgül ağırlığı, kN/m^3,
Q : debi, m^3/s,
h : yük kaybı, m.

Basınçlı havalı karıştırma: Karıştırma tanklarına, havalandırmalı kanallara, flokülasyon tanklarına tankın dibinden hava verilerek karıştırma sağlanır. Karıştırma veya flokülasyon tanklarına hava verildiğinde hava kabarcıklarını yükselten güç, (3.17) formülü ile hesaplanabilir.

$$P = p_a V_a \ln \frac{p_c}{p_a} \tag{3.17}$$

Burada;

p_a : atmosfer basıncı, kN/m^2,
V_a : atmosfer basıncında hava hacmi, m^3/s,
p_c : deşarj noktasında hava basıncı, kN/m^2.

Atmosfer basıncında hava debisi m^3/dk ve basınç metre olarak alınırsa (3.18) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P = KQ_a \ln\left(\frac{h + 10{,}33}{10{,}33}\right) \tag{3.18}$$

K : sabit (1,689),
Q_a : atmosfer basıncında hava debisi, m^3/dk,
h : deşarj noktasındaki hava basıncı, m.

Hız gradyanı G, (3.18)'den bulunan P değeri, (3.11)'de yerine konularak bulunur.

Karıştırma ve karıştırıcı uygulamaları hakkında daha fazla bilgi için Kaynak [1]'e başvurulmalıdır.

3.5. Yüzdürme

Yüzdürme sıvı fazda, sıvı veya katı partiküllerin ayrıldığı bir işlemdir. Ayırma ince gaz kabarcıklarının (genellikle hava) sıvı faza verilmesi ile sağlanır. Hava kabarcıkları partiküllere tutunur ve birlikte yüzeye yükselirler.

Atıksu arıtımında yüzdürme, askıda maddeleri uzaklaştırarak, biyolojik çamurun yoğunlaşmasını sağlar. Yüzdürmenin çökeltmeye göre temel üstünlüğü, yavaş çöken çok küçük boyutlu ve hafif partiküllerin çok daha hızlı ve yüksek oranda uzaklaştırılabilmesidir. Yüzeye çıkan partiküller yüzeyden sıyrılarak toplanırlar.

Yüzdürme işleminde hava kabarcıkları değişik yöntemlerle oluşturulur:

- Sıvı basınç altındayken (275~350 kPa) bir kompresörle hava enjekte edilir, sonra basınç kaldırılır (Şekil 3.12) (çözünmüş-hava ile yüzdürme DAF),
- Atmosfer basıncında havalandırma (hava ile yüzdürme),
- Atmosfer basıncında hava ile doyurma, daha sonra sıvıya vakum uygulama (vakum ile yüzdürme).

Bu sistemlerin tümünde giderim verimi bazı kimyasalların (alum, $FeCl_3$, organik polimerler) kullanımı ile arttırılabilir [1].

Büyük tesislerde çıkış akımının %15~20'si geri devrettirilebilir.

DAF sistemi verimi büyük ölçüde hava (A)/katı(S) oranına bağlıdır. Aktif çamur yoğunlaştırması için tipik A/S oranı 0,005~0,060 aralığında değişebilir. Konuya ilişkin daha detaylı bilgi için Kaynak [1] ve [4]'e başvurulabilir.

Şekil 3.12. Çözünmüş hava ile yüzdürme sistemi (DAF) şematik görünümü

Çözünmüş hava ile yoğunlaştırma (yüzdürme) fazla biyolojik çamurlar ile özellikle yemeklik yağ ve kağıt endüstrisi atıksularında yaygın olarak kullanılır.

3.6. Havalandırma

Atıksuyun havalandırılmasında iki temel yöntem vardır:

- Hava veya saf oksijenin atıksuya batmış difüzörlerle veya diğer havalandırma cihazları ile verilmesi veya
- Atıksuyun mekanik olarak karıştırılarak havanın suda çözünmesinin hızlandırılması

Difüzörlü hava sistemleri; atıksuya batmış difüzörler ve üfleyiciden (blower) ibarettir.

Çeşitli havalandırma sistemlerinin üstünlük, kısıt ve oksijen transfer değerleri Şekil 3.13a ve Şekil 3.13b'de verilmiştir.

3.6.1. Difüzörler ve Hava Üfleyiciler

3.6.1.1.Difüzörler

Önceleri difüzör sistemleri, ince kabarcıklı ve kaba kabarcıklı olarak iki grupta inceleniyordu. Ancak bu terimlerin tam tanımı, ince ve kaba kabarcıkların boyutları açık olmadığından son yıllarda difüzörlü havalandırma sistemleri, cihazın fiziksel karakteristikleri ile ifade etmek tercih edilmektedir. Bu şekilde üç esas sınıf belirlenmiştir (Şekil 3.13):

- Gözenekli veya ince gözenekli difüzörler
- Gözenekli olmayan difüzörler
- Jet tipi, aspiratörlü ve U -tüpü havalandırıcılar

Oksijen transferi: Atıksu arıtımında gaz transfer hızı, o andaki gazın çözeltideki konsantrasyonu ve denge konsantrasyonu farkı ile orantılıdır.

Şekil 3.13a. Oksijen transferinde kullanılan gözeneksiz difüzörler, (a) orifis, (b) tüp, [1]

Şekil 3.13b. Oksijen transferi için kullanılan diğer ekipmanlar: (a) statik tüp mikser, (b) jet tipi havalandırıcı, (c) hava hattı üzerine monteli jet havalandırıcı, (d) aspiratörlü havalandırıcı, [1]

$$r_m = K_g A(C_s - C) \tag{3.19}$$

Burada;

r_m : Kütle transfer hızı,
K_g : Gaz difüzyon katsayısı,
A : Gazın difüze olduğu alan,
C_s : Gazın çözeltideki doygunluk konsantrasyonu,
C : Gazın çözeltideki konsantrasyonudur

Ayrıca aşağıdaki ilave işlemler sonrası

$$r_m = V\frac{dC}{dt} \tag{3.20}$$

$$r_C = \frac{dC}{dt} = \frac{r_m}{V} = K_g \frac{A}{V}(C_s - C) \quad (3.21)$$

$K_g \frac{A}{V}$ yerine orantı faktörü K_L a yazılarak:

Suya oksijen aktarım (transfer) hızı için

$$r_C = \frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) \quad (3.22)$$

ifadesi elde edilir.

Burada;

r_C : Konsantrasyon değişimi, mg/L sn,
$K_L a$: Toplam kütle transfer katsayısı, sn^{-1}'dir.

(3.22) formülünün $C = C_o$, C=C, t=0, t=t aralığında integrali alınırsa (3.23) elde edilir.

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_o} = e^{-(K_L a)t} \quad (3.23)$$

$(C_s - C_t)$ ve $(C_s - C_o)$ terimleri başlangıç ve sonuçtaki çözünmüş oksijene doygunluk eksikliğini gösterir.

Aktif çamur sisteminde $K_L a$ değeri, mikroorganizmaların oksijen kullanımı (tüketimi) bazında hesaplanır. Havuzda oksijen 1-3 mg/L mertebelerinde tutulur ve oksijen verilir verilmez mikroorganizmalar tarafından kullanılır. Bu ilişki denklem (3.24)'de verilmiştir

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) - r_M \quad (3.24)$$

Burada;

r_M : mikroorganizmaların oksijen kullanım (tüketim) hızı, (2-7 gO_2/g uçucu askıda katı madde/gün)'dür.

Oksijen seviyesi sabit tutulursa $\frac{dC}{dt} = 0$ olur. Buradan (3.24) tekrar düzenlenirse:

$$r_M = K_L a(C_s - C) \quad (3.25)$$

Bu durumda C de sabit olur. Warburg cihazında r_M bulunarak aşağıdaki bağıntı yardımı ile $K_L a$ hesaplanır.

$$K_L a = \frac{r_M}{(C_s - C)} \quad (3.26)$$

Tablo 3.15a. Çeşitli havalandırma sistemlerinin üstünlük, kısıt ve oksijen transfer değerleri (Basınçlı hava sistemleri) [2], [8]

Havalandırma sistemi	***Açıklama***	***Üstünlükler***	***Kısıtlar***	***Transfer verimi (%)***	***Transfer hızı (standart kgO_2/kWh)***
Basınçlı hava sistemi	*Hava tankın dibine yakın bir yerden gözenekli veya gözeneksiz difüzörlerden verilir. Hava kabarcıkları yüzeye çıkarken oksijen transferi ve karışma gerçekleşir.*				
İnce kabarcıklı	*Seramikten yapılmış gözenekli plaka, tüp, kubbemsi difüzör veya plastik esnek membran*	*İyi karıştırma, hava debisini değiştirerek işletme esnekliği ve iyi oksijen transferi, enerji ihtiyacı düşük, membran tiplilerin bakım masrafları düşük*	*Yüksek yatırım ve bakım maliyeti, hava filtresi gerekiyor.*	*10-30*	*1,2-2,0*
Orta kabarcıklı	*Üstü kaplanmış delikli paslanmaz çelik tüp*	*İyi karıştırma, kaplama malzemesi değiştirilebildiğinden bakım maliyeti düşük*	*İlk yatırım maliyeti yüksek, hava filtresi gerekebilir*	*6-15*	*1,0-1,6*
İri kabarcıklı	*Basınçla dağılan hava esnek diski yerinden oynatabilir.*	*Tıkanma olmaz, bakımı düşük, hava filtresi gerekmez, spiral akış için kullanılır.*	*İlk yatırım maliyeti yüksek, oksijen transferi düşük, enerji gideri yüksek*	*4-8*	*0,6-1,2*
Jet havalandırıcılı	*Basınçlı hava ve sıvı karıştırılıp öylece verilir. İnce kabarcıklar yükselirken karışma ve oksijen transferi sağlar.*	*Maliyet orta, derin tanklar için uygun, yüksek transfer verimi*	*Üfleyici (blower) ve pompalama ekipmanı gerektirir, ağızda (nozzle) tıkanma problemi*	*10-25*	*1,2-1,4*

Tablo 3.15b. Çeşitli havalandırma sistemlerinin üstünlük, kısıt ve oksijen transfer değerleri (Mekanik havalandırma sistemleri) [2], [8]

Havalandırma sistemi	***Açıklama***	***Üstünlükler***	***Kısıtlar***	***Transfer verimi (%)***	***Transfer hızı (standart kgO_2/kWh)***
Mekanik sistem	*Hava dolambaçlı yoldan yukarı doğru bir tüp içinden akar. Karışma ve oksijen transferi sağlanır.*	*Yatırım maliyeti düşük, transfer verimi yüksek*	*Karışım düşük*	-	*1,2-1,6*
Radyal akışlı düşük hızlı (20-60 dev/dk)	*Düşük hız, büyük çaplı pervane kullanılır, yüzer veya sabittir, vites değiştirici kullanır.*	*Tank şekli ve boyutu uyarlanabilir, iyi karışma.*	*İlk yatırım maliyeti yüksek, soğuk iklimde buzlanma, redüktör bakım problemi yaratabilir.*	-	*1,2-2,4*
Eksenel akışlı yüksek hızlı (300-1200 dev/dk)	*Yüksek hız, daha küçük çaplı pervane kullanılır. Yüzer yapı.*	*İlk yatırım düşük, çeşitli su seviyelerine ayarlanabilir, esnek işletme.*	*Soğuk iklimde buzlanma, bakım zor, karışım yetersiz.*	-	*1,2-2,4*
Döner fırçalı	*Havalandırma ve sirkülasyon sağlar, çevresinden çelik fırça çıkan silindir şeklinde.*	*Havalandırma ve sirkülasyon sağlar, oksidasyon hendeklerinde kullanılır, ilk yatırım orta, bakım kolay.*	*Tank şekli sınırlı, verim düşük*	-	*1,2-2,4*
Batmış türbin tipli	*Şiddetli karışım sağlar, sıkıştırılmış hava pervanenin altından verilir. Sabit köprü gerektirir.*	*Karışım iyi, birim hacim için kapasite yüksek, derin tanklar için uygun, işletme esnekliği, buzlanma ve sıçrama yok.*	*Üfleyici ve devir düşürücü gerektirir, toplam enerji ihtiyacı yüksek, ilk yatırım maliyeti yüksek.*	-	*1,2-1,5*

Toplam kütle transfer katsayısı, $K_L a$, sıcaklığın, karıştırma hızının (aynı zamanda havalandırma cihazı (sistemi) tipi ve karışma hücresi şekli) ve sudaki maddelerin de fonksiyonudur. Bu faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Sıcaklığın etkisi: (3.27) formülü ile ifade edilir.

$$K_L a_{(T)} = K_L a_{(20°C)} \theta^{T-20} \tag{3.27}$$

Burada;

$K_L a_{(T)}$: T sıcaklığında oksijen kütle transfer katsayısı, sn^{-1}
$K_L a_{(20°C)}$: 20°C de oksijen kütle transfer katsayısı, sn^{-1}
θ : sıcaklık aktivite katsayısı (1,015-1,040, difüzörlü ve mekanik havalandırma sistemleri için tipik değer 1,024 dür).

- Karıştırma ve tank şeklinin etkisi: Karıştırma hızı ve tank şeklinin $K_L a$ ya etkisini teorik bazda bulmak çok zordur. Havalandırma sistemlerinde sistem seçimi verimle, verim de $K_L a$ ile ilişkili olduğundan mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Havalandırma sistemlerinin $K_L a$ değeri genellikle musluk suyu kullanılarak ve düşük çözünmüş oksijen seviyelerinde deneysel olarak belirlenir. Gerçek sistemde $K_L a$'yı (çalışan tesislerde) bulmak için α faktörü kullanılır:

$$\alpha = C_{s\ (atıksu)} / C_{s\ (musluk\ suyu)} \tag{3.28}$$

α değeri havalandırma sistemi tipi, şekli, karıştırma şekli ve atıksu karakteristiklerine göre 0,3-~1,2 aralığında değişir. α, difüzörlü sistemlerde 0,4-0,8, mekanik havalandırmalı sistemlerde ise 0,6-1,2 arasındadır. Gerçek havalandırma tankı geometrisi, deney için kullanılandan çok farklıysa uygun α değerinin seçilmesinde çok dikkatli olunmalıdır.

- Atıksu karakterinin etkisi: Üçüncü düzeltme faktörü ß, test sistemi oksijen transfer hızını, atıksudaki tuzların, partikül maddelerin ve yüzey aktif maddelerin oksijenin çözünürlüğüne etkisini düzeltmek amacıyla kullanılır:

$$\beta = C_{s\ (atıksu)} / C_{s\ (çeşme\ suyu)} \tag{3.29}$$

$\beta = 0{,}7 - 0{,}98$ arasında değişir. Atıksu için genellikle $\beta = 0{,}95$ değeri kullanılır. β'nın tayini, atıksu arıtma tesisi laboratuvarlarında kolaylıkla yapılabileceğinden kullanılacak değerlerin laboratuvarda doğrulanması önerilmektedir.

Düzeltme faktörlerinin uygulaması: Yukarıda bahsedilen düzeltme faktörlerinin kullanımına örnek olarak, deneysel ölçümler yardımı ile mekanik yüzey havalandırıcılı arazi ölçekli sistemde oksijen transfer hızının bulunması verilmiştir.

$$OTR_f = SOTR \left(\frac{\beta C_s - C_w}{C_{s_{20}}} \right) \theta^{T-20} (\alpha) \tag{3.30}$$

Burada:

OTR_f : gerçek işletme şartlarındaki oksijen transfer hızı, g O_2/kWh,
$SOTR$: 20°C ve 0 çözünmüş oksijen test şartlarında standart oksijen kullanım hızı, g O_2/kWh,
C_s : musluk suyu için arazi şartlarında oksijen doygunluk konsantrasyonu, mg/L,
C_w : işletme şartlarında atıksudaki oksijen, seviyesi mg/L,
$C_{s_{20}}$: musluk suyu için 20°C'de oksijen seviyesi, mg/L.

Difüzörle havalandırmada (3.30)'daki Cs değerleri, havanın tankın dibinden verilmesi nedeni ile atmosferik doygunluk konsantrasyonundan (su yüzeyindeki değer) daha yüksek olacağı dikkate alınarak düzeltilmelidir.

Difüzörlerin performansı: Difüzörlerin oksijen transfer verimi aşağıdaki faktörlere bağlıdır,

- Difüzörün tipi, boyutu ve şekli
- Hava debisi
- Suya batma derinliği
- Tank şekli (difüzörün yeri de dahil)
- Atıksu karakteristikleri

Havalandırma teçhizatı önce temiz suda denenir, sonuçlar dönüşüm faktörleri ile işletme şartlarına uyarlanır. Tablo 3.16'da çeşitli tipte difüzörlerin temiz suda oksijen transfer verimleri ve hava debileri verilmiştir. Standart Oksijen Transfer Verimi (SOTE) değerleri 4,57 m difüzör derinliği, 20°C sıcaklık, 101,3 kN/m^2 basınç ve 0 mg/L başlangıç çözünmüş oksijen seviyesinde yapılmıştır.

Gözenekli difüzörlerde Oksijen Transfer Verimi (OTE), iç veya dış tıkanmalar nedeniyle düşebilir. İç tıkanmalar sistemde kullanılan basınçlı havadaki kirliliğin hava filtresinde tutulmamış olmasından kaynaklanabilir. Dış tıkanmalar ise genellikle biyofilm veya inorganik çökelti oluşumundan kaynaklanır.

Tablo 3.16. Çeşitli difüzör sistemleri için temiz suda oksijen transfer verimleri, [1]

Difüzör tip ve konumu	***Hava debisi (m^3/dk difüzör)***	***SOTE (%) (derinlik 4,57 m)***
Seramik disk-ızgara şeklinde	*0,01-0,10*	*25-35*
Seramik disk-ızgara şeklinde	*0,015-0,07*	*27-37*
Seramik plaka-ızgara şeklinde	*0,60-1,50*[a]	*26-33*
Rijit gözenekli plastik tüpler		
Izgara şeklinde	*0,07-0,11*	*28-32*
Çift taraflı spiral tüp	*0,08-0,31*	*17-28*
Tek taraflı spiral tüp	*0,06-0,30*	*13-25*
Rijit olmayan gözenekli plastik tüp		
Izgara şeklinde	*0,03-0,20*	*26-36*
Tek taraflı spiral tüp	*0,06-0,20*	*19-37*
Delikli membran tüpler		
Izgara şeklinde	*0,03-0,10*	*22-29*
Çeyrek (1/4) noktalarda	*0,06-0,17*	*19-24*
Tek yönlü spiral tüp	*0,05-0,17*	*15-19*
Jet havalandırma		
Yan başlıklı	*1,50-8,50*	*15-24*
Gözeneksiz difüzörler		
Çift taraflı spiral tüp	*0,10-0,28*	*12-13*
Orta genişlikte	*0,12-0,25*	*10-13*
Tek taraflı spiral tüp	*0,28-1,00*	*9-12*

[a] *birim m^3/m^2 difüzör/dk*

3.6.1.2.Hava Üfleyiciler (Blower)

Yaygın kullanılan üfleyici tipleri: Santrifüj üfleyiciler, pozitif yer değiştirmeli üfleyiciler ve santrifüj türbinleridir. Santrifüj tipliler 425 m^3/dk'nın üstündeki birim kapasitelerde kullanılırlar. Deşarj basıncı 48-62 kN/m^2 arasındadır.

Atıksu arıtımında üfleyiciler geniş hava debisi, düşük basınç aralıkları ve farklı çevre şartlarında çalışabilmelidir. Üfleyiciler genellikle belirli işletme şartlarında çalışırlar. Atıksu

arıtma tesisinde geniş bir hava debisi ve basınç aralığı gerekebileceğinden üfleyicilerin işletme şartlarındaki değişikliğe ve yeni düzenlemeye uygun olduğu konusunda üreticiden onay alınmalıdır. Değişiklik ve düzenleme yöntemleri şöyle sıralanabilir:

Santrifüj üfleyicilerin işletme karakteristikleri düşük devirli santrifüj pompalara benzer. Basma basıncı kapatma anında kapasitesinin %50'sinde maksimuma yükselir ve sonra düşer. Üfleyicinin işletme noktası santrifüj pompalar gibi basma yüksekliği kapasite eğrisi ile sistem eğrisinin kesişme noktasıdır. Üfleyici özellikleri standart hava şartlarına göre verilir (20℃, 760 mm cıva basıncı ve %36 nispi nem oranı). Standart havanın özgül ağırlığı 1,2 kg/m^3'tür.

Havanın yoğunluğu santrifüj üfleyicinin performansını etkiler, giriş hava sıcaklığı veya barometrik basınçtaki değişiklik, sıkıştırılmış havanın yoğunluğunu değiştirecektir. Gazın yoğunluğu ne kadar yüksek olursa basınç da o kadar yüksek olur, bunun sonucu olarak sıkıştırma için daha fazla enerji gerekir. Üfleyici seçimi, sıcak yaz günlerinde yeterli kapasiteyi sağlayacak, soğuk kış günlerinde ise yeterli gücü sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Adyabatik sıkıştırma için enerji ihtiyacı (3.31)'de verilmiştir.

$$P_w = \frac{w * R * T_1}{29{,}7 * n * e}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0{,}283} - 1\right] \tag{3.31}$$

Burada:

P_w : Her bir üfleyici için güç ihtiyacı, kW,
w : Geçen havanın ağırlığı, kg/s,
R : Havanın ideal gaz sabiti, 8,314 kJ/k mol °K,
T_1 : Giriş sıcaklığı, °K,
P_1 : Giriş basıncı, atm,
P_2 : Çıkış basıncı, atm,
n : Hava için (k^{-1})/k = 0,283
k : Hava için 1,395,
e : Verim (sıkıştırma için 0,70-0,90)

Basma basıncı 55 kN/m^2'nin üstünde ve hava debisi 425 m^3/dk'nın altında ise pozitif yer değiştirmeli üfleyiciler kullanılır. Pozitif yer değiştirmeli üfleyiciler su seviyesinde önemli değişiklikler beklendiğinde de kullanılırlar. Bunlar sabit kapasitede değişken basınçta çalışır.

Son yıllarda yüksek kapasite ve verimli hava yataklı turbo blowerların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde hava üfleyici, dağıtıcı ve difüzör sistemlerinin tasarımı ile ilgili kapsamlı bilgi Kaynak [1]'den edinilebilir.

3.6.2. Mekanik Havalandırıcılar

Mekanik havalandırıcılar yatay veya düşey milli olmak üzere iki grupta toplanır. Her iki grup kendi aralarında tekrar yüzeysel ve batmış havalandırıcılar olarak iki gruba ayrılır. Yüzeysel ve batmış havalandırıcılarda oksijen atmosferden alınır, ancak bazı batmış tiplerde hava veya saf oksijen tanka dipten verilir. Her iki durumda da pompalama ve havalandırma hareketi karışımı sağlar.

3.6.2.1.Düşey Milli Yüzeysel Havalandırıcılar

Bu tür havalandırıcılar yüzer ya da sabit motora tutturulmuş batmış veya kısmen batmış pervaneden oluşmuştur. Yüzeysel havalandırıcılar pervane tipine (santrifüj, dönel) veya pervanenin dönüş hızına (düşük hızlı, yüksek hızlı) bağlı olarak sınıflandırılabilir. Santrifüj tipliler aynı zamanda düşük hızlı sınıfına girer. Dönel akış tipliler ise yüksek hızda çalışır. Düşük hızlı havalandırıcılarda pervane elektrik motoruna bağlı devir düşürücü ile çalışır. Motor ve dişli kutusu platforma veya yüzen kısma monte edilir. Yüksek hızlı havalandırıcılarda

pervane motorun döner parçasına tutturulur ve mutlaka yüzen kısma monte edilirler. Bu sistemler su seviyesi değişiminin fazla olduğu veya sabit bir yerin uygun olmadığı gölet ve lagünlerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Yüzeysel havalandırıcıların gücü 0,75-100 kW aralığındadır.

3.6.2.2.Düşey Milli Batmış Havalandırıcılar

Mekanik havalandırıcıların çoğu oksijen transferini sağlamak üzere su yüzeyini hava ile şiddetli karıştırma prensibine dayanır. Batmış mekanik havalandırıcılarda pervanenin altından hava veya saf oksijen de verilebilir. Pervane hava kabarcıklarını dağıtır ve tank içeriğinin karışmasını sağlar. Batmış mekanik havalandırıcıların gücü 0,75-100 kW aralığındadır.

3.6.2.3.Yatay Milli Döner Mekanik Havalandırıcılar

Yatay milli mekanik havalandırıcılar yüzeyde ve batmış olmak üzere iki grupta toplanır. Fırça tipli havalandırıcılar, su seviyesinin tam üstünde olacak şekilde fırçalı (çelik fırçalı, plastik çubuklu veya bıçaklı) yatay bir silindirden ibarettir. Çalışma sırasında motora bağlı silindir hızla dönerken suyu tank boyunca spreyler ve atık suyun içine hava alır. Bu tür havalandırıcılar genelde oksidasyon hendeklerinde kullanılır. Batmış Yatay milli mekanik havalandırıcılar prensip olarak yüzeysel tiplere benzer. Ancak farklı olarak batmış tiplerde, döner şafta tutturulmuş pedal veya diskler vardır. Disklerin, çapın 1/8- 3/8'i kadarlık kısmı suya batmıştır ve sürekli şekilde suya girerler. Disklerin durması, disk döndüğünde su yüzeyinin altında hava sıkışmasına yol açar. Disklerin yerleştirilmeleri oksijen ve karışma gereksinimine bağlı olarak değişir. Tipik enerji ihtiyacı 0,1-0,75 kW/disk'tir.

3.6.2.4.Mekanik Havalandırıcı Performansı

Mekanik havalandırıcılar standart şartlarda kg O_2/kW-h olarak belirtilen oksijen transfer hızına göre değerlendirilirler. Standart şartlar, 20°C sıcaklık, 0,0 mg/L çözünmüş oksijen (Ç.O), ve test suyu çeşme suyu durumudur. Test ve değerlendirme kararsız-durumda oksijeni sodyum sülfit ile giderilmiş temiz su ile yapılır. Ticari boyutlu yüzey havalandırıcıların verimi 1,2-2,4 kg O_2/kWh aralığındadır. Çeşitli mekanik havalandırıcıların oksijen transfer değerleri Tablo 3.17'de verilmiştir. Üretici firma tarafından havalandırıcı performansı olarak verilen verim değerleri, söz konusu havalandırıcının gerçek model ve boyutunda yapılan test sonuçları ile doğrulandığında kabul edilmelidir. Tasarımda ise standart performans verileri, arazi şartlarına uyarlanmalıdır. Bu uyarlama aşağıda verilen (3.32) bağıntısı ile sağlanır. Parantez içindeki terim düzeltme faktörüdür.

$$N = N_o \left(\frac{\beta C_{walt} - C_L}{C_{s\,20}} \right) 1{,}024^{T-20} a \qquad (3.32)$$

Burada:

N : Arazi şartlarında transfer edilen kgO_2/kWh,
N_o : 20°C, Ç. O. =0, şartlarındaki suda transfer edilen kgO_2/kWh,
β : Tuzluluk yüzey gerilimi düzeltme faktörü, genellikle 1,
C_{walt} : Verilen sıcaklık ve rakımda çeşme suyunun oksijen doygunluk konsantrasyonu, mg/L,
$C_{s\,20}$: Çeşme suyunun 20°C de oksijen doygunluk konsantrasyonu, mg/L,
C_L : Gerçek işletme halinde oksijen konsantrasyonu, mg/L,
T : Sıcaklık, °C,
a : Atıksu için oksijen transferi düzeltme faktörü (Tablo 3.18)

Tablo 3.17. Çeşitli mekanik havalandırıcılar için oksijen transfer değerleri [1]

Havalandırıcı tipi	*Transfer hızı (kg O_2/kWh)*	
	Standart [a]	*Arazi* [b]
Yüzeysel, düşük hızlı	*1,22-3,04*	*0,73-1,46*
Yüzeysel, düşük hızlı, tüplü	*1,22-2,80*	*0,73-1,28*
Yüzeysel, yüksek hızlı	*1,22-2,19*	*0,73-1,22*
Yüzeysel, aşağı doğru türbinli	*1,22-2,43*	*0,61-1,22*
Batmış türbin, serpme cihazlı	*1,22-2,01*	*0,73-1,09*
Batmış pervaneli	*1,22-2,43*	*0,73-1,09*
Yüzey, fırça ve bıçaklı	*0,91-2,19*	*0,49-1,09*

[a] *Standart şartlar, musluk suyu 20°C sıcaklık, 101,3 kN/m² basınç, Ç. O. =0,0 mg/L*
[b] *Arazi şartları, atıksu, 15°C sıcaklık, 152,4 m yükseklik, α = 0,85, β = 0,9, işletme Ç. O. =2 mg/L.*

Tablo 3.18. Düşük hızlı yüzeysel havalandırıcılarda bazı atıksular için tipik α değerleri [1]

Atıksu	*$BOİ_5$, mg/L*		*a faktörü* [a]	
	Giriş	*Çıkış*	*Giriş*	*Çıkış*
Evsel atıksu	*180*	*3*	*0,82*	*0,98*
Kağıt ve kağıt hamuru	*187*	*50*	*0,68*	*0,77*
Ambalaj kağıdı	*150-300*	*37-48*	*0,48-0,68*	*0,7-1,1*
Ağartılmış kağıt	*250*	*30*	*0,83-1,98*	*0,86-1,0*
İlaç üretimi	*4.500*	*380*	*1,65-2,15*	*0,75-0,83*
Sentetik elyaf üretimi	*5.400*	*585*	*1,88-3,25*	*1,04-2,65*

[a] *Son araştırmalar a faktörü değerinin daha düşük ve değişken olabileceğini göstermiştir.*

3.6.2.5.Havalandırma Havuzlarında Karıştırma İçin Enerji İhtiyacı

Etkin bir karıştırma için havalandırma tankının şekli ve boyutları önemlidir. Havalandırma tankları kare veya dikdörtgen planlı olabilir. Havalandırma tankında birden fazla havalandırıcı bulunabilir. Mekanik yüzeysel havalandırıcılar durumunda havalandırma tankının derinlik ve genişliği havalandırıcı boyutuna bağlıdır (tipik değerler Tablo 3.19'da verilmiştir). Batmış tip karıştırıcılılar için derinlik 10,7 m'ye kadar çıkabilir.

Tablo 3.19. Mekanik yüzeysel havalandırıcılar için tipik havalandırma tankı boyutları [1]

Havalandırıcı gücü, KW	*Tank boyutu, m*	
	Derinlik	*Genişlik*
7,5	*3,0-3,7*	*9,1-12,2*
14,9	*3,7-4,3*	*10,7-15,2*
22,4	*4,0-4,6*	*12,2-18,3*
29,8	*3,7-5,2*	*13,7-19,8*
37,2	*4,6-5,5*	*13,7-22,9*
55,9	*4,6-6,1*	*15,2-25,9*
74,6	*4,6-6,1*	*18,3-27,4*

İri kabarcıklı difüzörlü havalandırma sistemlerinin yeterli karışımı da garanti edilebilmesi için hava ihtiyacı, 1 m^3 tank hacmi için 20-30 L/dk. (spiral döner havalandırma düzeneği için), ince kabarcıklılar için 7-10 L/dk olabilir [13]. Difüzörlerin havalandırma tankının dibine ızgara düzeniyle üniform olarak dizildiği havalandırma sistemlerinde havalandırma hızı 1 m^3 tank hacmi için 10-15 L/dk olarak önerilmektedir.

Mekanik havalandırıcılarla tam karışımın sağlanabilmesi için enerji ihtiyacı, havalandırıcı tasarımı ve tank şekline bağlı olarak 19-39 W/m^3 aralığındadır. Evsel atıksular için havalandırmalı lagün tasarımında karıştırma için gerekli enerji ihtiyacının kontrol edilmesi çok önemlidir. Zira çoğu durumda, büyük hacimler için belirleyici faktör minimum karıştırma enerjisidir (~1~1,5 W/m^3).

KAYNAKLAR

[1] Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[2] Qasim, S. R. (1985). Wastewater Treatment Plants, Treatment, Design, and Operation. CBS Publishing Japan Ltd.

[3] EPA, (2003). Wastewater Technology Fact Sheet, Screening and Grit Removal, 832-F -03-011.

[4] Eckenfelder (1989). Industrial Water Pollution Control, ,McGraw-Hill International Editions.

[5] Water Environment Federation (1996). Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice No. 11, Chapter 19.

[6] Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers (1991). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Manual of Practice No.8, Chapter 10.

[7] Biwater Industries & Services (1993). Water Industries Manual. Walker & Connell Ltd.

[8] Morrissey and Harleman (1992). Retrofitting Conventional Primary Treatment Plants for Chemically Enhanced Primary Treatment in The USA. In R. Klutie and H. Hahn, editors, Chemical Water and Wastewater Treatment II, 5th Gothenburg Symposium. Springer Verlag, Berlin.

[9] Libhaber, Orozco-Jaramillo (2012). Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater, for Decisionm Makers and Practicing Engineers, Chapter 9. IWA Publishing.

[10] Pont-a-Mousson (1992). A Comprehensive Ductile Iron Pipeline System.

[11] Muslu, Y. (1989). Terfi Merkezleri ve İsale Hatları. İstanbul Teknik Üniversite Matbaası

[12] Topacık ve Koyuncu (2006). Arıtma Tesislerinin Hidroliği, Su Vakfı.

[13] USPA (1989), Design Manual- Fine Pore Aeration Systems, Center for Environmental Research, Cincinnati, Ohio.

[14] Environmental Dynamics Inc. (2003). Energy Consumption and Typical Performance of Various Types of Aeration Equipment,

AMBARLI İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ

4. BİYOLOJİK ARITMA

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk,* [1]*Yrd. Doç.Dr. M. Ekrem Karpuzcu ve* [1]*Dr. Hale Özgün*

4.1. Biyolojik Arıtmanın Amacı

Hızlı nüfus artışı ve endüstrileşme sonucunda oluşan atıksular doğanın özümleme kapasitesini aşmış ve alıcı ortamları kirlenme tehlikesi ile karşı karşıya bırakmıştır. Doğadaki ekolojik dengeyi olumsuz yönde etkileyebilecek ve diğer faydalı kullanımlarını engelleyecek bu durumun önüne geçebilmek için atıksuları uzaklaştırmadan önce arıtma zorunluluğu doğmuştur. Atıksu karakterizasyonu, kaynağına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterir ve bu farklılıklara göre arıtma yöntemleri de değişir. Örneğin; organik kirleticilerin uzaklaştırılması için en etkin yöntemin biyolojik arıtma olduğu söylenebilir.

Biyolojik arıtma; atıksuda bulunan organik kirleticilerin, mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılmak suretiyle atıksudan uzaklaştırılmaları esasına dayanmaktadır. Biyokimyasal süreçlerin sonunda, ayrışabilen organik madde elektron verip yükseltgenerek (oksitlenme), kararlı son ürün olan karbondioksit (CO_2) ve suya (H_2O) dönüşmektedir. Dolayısıyla ayrışabilen organik maddelerin bir kısmı biyokütleye, diğer kısmı ise enerjiye çevrilmektedir. Birçok durumda ikinci kademe prosesler olarak tanımlanan biyolojik prosesler, fiziksel ve kimyasal proseslerle birlikte kullanılabilir.

Evsel atıksularda biyolojik arıtmanın amaçları; atıksuda yer alan partiküler ve çözünmüş haldeki biyolojik olarak ayrışabilir maddelerin kabul edilebilir son ürünlere dönüşümünü sağlamak, askıda ve çökelemeyen kolloidal haldeki katı maddeleri biyolojik floklara veya biyofilme dönüştürmek, azot ve fosfor gibi besi maddelerinin giderimini sağlamak ve bazı durumlarda spesifik iz elementleri gidermek olarak sıralanabilir. Endüstriyel atıksular için biyolojik arıtma organik ve inorganik bileşiklerin giderimi amacıyla kullanılabilir. Endüstriyel atıksularda yer alan bazı bileşikler mikroorganizmalar üzerinde toksik etki oluşturacağı için endüstriyel atıksularda çoğu zaman ön arıtma gerekli olabilir. Tarımsal sulama sonucu oluşan atıksularda ise biyolojik arıtma genellikle besi maddelerinin giderimi amacıyla kullanılmaktadır.

4.2. Atıksu Arıtımında Mikroorganizmaların Rolü

Atıksuda partiküler ve çözünmüş halde bulunan organik maddelerin giderimi ve stabilizasyonu başta bakteriler olmak üzere çeşitli mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak gerçekleştirilir. Mikroorganizmalar, kolloidal ve çözünmüş organik maddeleri çeşitli son ürünlere ve çamura (biyokütle) dönüştürmektedir. Çamur özgül ağırlığı suya göre daha yüksek olduğu için çamur arıtılmış sudan çökerek ayrılabilmektedir. Çamurun düzenli aralıklarla sistemden atılmaması durumunda atıksu arıtımında problemlerle karşılaşılabilir. Mikroorganizmalar atıksu arıtımında azot ve fosfor gideriminde de önemli rol oynamaktadır. Belirli spesifik bakteriler amonyağın nitrit ve nitrata dönüştürülmesini sağlayabilmekte iken, bazı farklı bakteriler ise okside olmuş olan azot bileşenlerini gaz haldeki azot formuna indirgeyebilmektedirler. Fosfor gideriminde ise, biyolojik prosesler bakteri bünyesinde inorganik fosfor depolanmasını sağlayacak şekilde rol almaktadırlar. Arıtma sistemlerindeki mikroorganizmalar, çevre koşullarına adaptasyonlarına bağlı olarak seçilirler.

4.2.1. Mikroorganizmaların Sınıflandırılması

Biyolojik arıtmada mikroorganizmalar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

- Prokaryotik
- Ökaryotik

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Prokaryotik gruba (öbakteri ve arkeobakteri) örnek olarak bakteriler verilebilir. Ökaryotik grup ise; mantar ve protozoaları içerir.

1.1.1.1.Bakteri

Arıtma sistemlerinde çalışan mikroorganizmaların çoğu bakterilerdir. Bakteriler tek hücreli prokaryotik organizmalardır. Atıksu arıtma ünitelerinde karbon, azot, fosfor ve kükürt bileşiklerinin giderilmesinde kullanılırlar. Bakteri hücrelerinin büyüklüğü 0,5-3 µm aralığındadır. Bakteriler şekillerine göre farklı isimler alırlar.

Bakteriler %80 su ve %20 kuru maddeden oluşmaktadır. Kuru maddenin de %90'ı organik ve %10'u inorganiktir. Bakteri hücresinde bulunan elementlere ait tipik değerler Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1. Bakteri hücresinde bulunan elementlere ait tipik değerler [1]

Elementler	***Kuru madde yüzdesi%***	
	Aralık	***Tipik değerler***
Karbon	*45-55*	*50*
Oksijen	*16-22*	*20*
Azot	*12-16*	*14*
Hidrojen	*7-10*	*8*
Fosfor	*1-5*	*3*
Kükürt	*0,8-1,5*	*1*
Potasyum	*0,8-1,5*	*1*
Sodyum	*0,5-2*	*1*
Kalsiyum	*0,4-0,7*	*0.5*
Magnezyum	*0,4-0,7*	*0.5*
Klorür	*0,4-0,7*	*0.5*
Demir	*0,1-0,4*	*0.2*
Diğer İz Elementler	*0,2-0,5*	*0.3*

1.1.1.2.Mantar

Mantarlar çözünmüş organik maddeleri bakteriler ile rekabet ortamı içerisinde kullanırlar. Mantar düşük pH'ı tolere edebildiği için, endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılırlar.

1.1.1.3.Protozoa

Protozoalar çözünmüş ve partiküler substratı birlikte kullanabilirler. Düşük organik yükleme hızında işletilen aktif çamur sistemlerinde yaygın olarak görülürler. Protozoa bakteriler üzerinden çoğalır. Çamurun çökelme özelliklerini etkiler.

1.1.2. Mikrobiyal Metabolizmanın Tanımı

Metabolizma canlı hücrenin içinde gerçekleşen tüm biyokimyasal prosesleri kapsamaktadır. Mikroorganizmaların biyokimyasal aktivitelerinin tanımlanması, biyolojik arıtma sistemlerinin tasarımı veya sistem seçiminde rol oynayan önemli bir faktördür. Farklı mikroorganizmalar oksijen, nitrit, nitrat, demir (III), sülfat, organik bileşikler ve karbondioksit olmak üzere farklı elektron alıcıları kullanabilmektedir.

Mikroorganizmalar; üremelerini ve diğer fonksiyonlarını devam ettirebilmek için enerji kaynağına, yeni hücre sentezi için karbona ve azot, fosfor, kükürt, potasyum, kalsiyum ve magnezyum gibi inorganik elementlere ihtiyaç duyarlar. Mikrobiyal faaliyetler için gerekli olan karbon ve enerji kaynakları genellikle substrat olarak tanımlanmaktadır. Enerji ve başlıca karbon kaynağı metabolik sınıflandırmada dikkate alınan iki önemli faktördür. Bu bölümde

atıksu arıtımında mikroorganizmaların besin ve moleküler oksijen ihtiyacına bağlı metabolik sınıflandırılması yapılacaktır.

4.2.2.1.Mikroorganizmaların Karbon ve Enerji Kaynağı

Mikroorganizmaların büyümeleri için gerekli olan karbon kaynakları organik madde ve karbondioksittir. Hücre sentezinde organik karbon kaynağı kullanan organizmalar heterotrof, yalnızca karbondioksit kullanan organizmalar ise ototrof olarak adlandırılır. Karbondioksitin organik hücre dokusuna dönüşümü, net enerji girdisi gerektiren anabolik bir prosestir. Bu nedenle ototroflar, hücre sentezi için heterotroflara göre daha fazla enerji harcadıklarından daha düşük büyüme hızlarına sahiptir.

Hücre sentezi için gerekli enerji; ışık veya kimyasal enerjidir. Işığı enerji kaynağı olarak kullanan organizmalar fototrof olarak adlandırılır. Fototroflar, heterotrof (bazı sülfür bakterileri) veya ototrof (alg ve fotosentetik bakteri) olabilirler. Enerjilerini kimyasal reaksiyonlardan karşılayan organizmalar kemotrof olarak adlandırılırlar. Kemotroflar da, fototroflara benzer şekilde heterotrof (protozoa, mantar ve bakterilerin çoğu) veya ototrof (nitrifikasyon bakterisi) olabilirler.

Kemootototroflar, indirgenmiş amonyak, nitrit ve sülfit gibi inorganik bileşiklerin oksidasyonundan oluşan enerjiyi kullanırlar. Kemoheterotroflar ise organik bileşiklerin oksidasyonu sonucu açığa çıkan enerjiyi kullanırlar. Mikroorganizmaların metabolik sınıflandırılması Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2. Karbon ve enerji kaynaklarına göre mikroorganizmaların metabolik sınıflandırması [1]

Sınıflandırma	*Karbon Kaynağı*	*Enerji Kaynağı*
Ototroflar:		
Fotoototroflar	*CO_2*	*Işık*
Kemoototroflar	*CO_2*	*İnorganik yükseltgeme-indirgeme reaksiyonu*
Heterotroflar:		
Fotoheterotroflar	*Organik karbon*	*Işık*
Kemoheterotroflar	*Organik karbon*	*Organik yükseltgeme-indirgeme reaksiyonu*

4.2.2.2.Mikroorganizmaların Besi Maddesi İhtiyacı

Karbon ve enerji kaynaklarının yanı sıra besi maddeleri de, hücre sentezi ve büyümesinde kısıtlayıcı rol oynayabilirler. Mikroorganizmanın ihtiyaç duyduğu başlıca inorganik besi maddeleri; N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na ve Cl olarak sıralanabilir. İkinci derecede önemli besi maddeleri ise; Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V ve W olarak verilebilir.

İnorganik besi maddelerine ilave olarak bazı organizmalar için organik besi maddeleri de gerekli olmaktadır. Büyüme faktörü olarak bilinen bu organik besi maddelerine olan ihtiyaç mikroorganizma türüne göre değişmekle birlikte, bu maddeler üç temel grupta sınıflandırılabilir.

- Aminoasitler
- Azot esaslı maddeler (örneğin; pürinler ve pirimidinler)
- Vitaminler

4.3. Mikrobiyal Proseslerin Kinetiği

Biyolojik arıtma sistemlerinin performansının kontrolü, biyolojik reaktör içerisinde gerçekleşen reaksiyonların kinetik olarak tanımlanmasının tam ve doğru olarak yapılmasını gerektirir. Reaktör kinetiği, sistemin temel bileşenleri olan substrat ve biyokütle için sistem içerisindeki kütle dengelerinin oluşturulmasını, kütle dengesi açısından reaksiyon kinetiği ve reaktör hidroliğinin bileşik etkisinin değerlendirilmesini içermektedir. Mikroorganizmaların

büyümesi için uygun çevresel şartlar; pH ve sıcaklık kontrolü, besi maddesi ilavesi, oksijen ilavesi veya ortamdan uzaklaştırılması ve uygun karıştırma sağlanarak elde edilir. Bu çevre şartlarının kontrolü, mikroorganizmaların büyümesi için gerekli uygun ortamı sağlar.

4.3.1. Reaksiyon Kinetiği

Reaksiyon kinetiği mikrobiyal çoğalma ve ölüm olmak üzere iki temel prosesi içermektedir. Mikroorganizmalar, büyüme ortamına konulduklarında ortamdaki besin kaynaklarını (C, N, O, H, P, S, mineral vd.) tüketerek büyürler. Kesikli olarak beslenen bir reaktörde mikrobiyal büyümede (mikrobiyal çoğalma ve ölüm) dört dönem gözlenir (Şekil 4.1)

Şekil 4.1. Tipik mikrobiyal büyüme eğrisi (1. Alışma Evresi, 2. Çoğalma Evresi, 3. Denge Evresi, 4. İçsel Solunum Evresi)

1. Alışma Evresi: Mikroorganizmaların yeni çevre koşullarına alışmaları için geçirdikleri bekleme dönemidir. Bu dönemde, besin kaynaklarının bileşimine ve çevresel şartlara göre mikroorganizmaların iç yapısında bazı değişiklikler olur. Mikroorganizmaların yeni çevreye uyum sağlamaları ve daha sonra bölünmeleri için belirli bir zaman gerekecektir.
2. Üstel (Logaritmik) Çoğalma Evresi: Ortama uyum sağlayan mikroorganizmalar, bu dönemde maksimum hızla büyürler. Çoğalma hızının maksimum sabite ulaştığı seviyedir.
3. Denge Evresi: Bu dönemde hücre konsantrasyonu sabit kalır. Net büyüme hızının sıfır olduğu bu dönemde, büyüme hızı ölüm hızına eşittir. Net büyüme sıfır olmakla birlikte, hücreler metabolik olarak aktiftirler ve ikincil ürünleri üretirler.
4. İçsel Solunum Evresi: Bu dönemde bakteri ölüm hızı yeni hücre üreme hızının üzerindedir ve hücre konsantrasyonu zamanla düşer. Ölüm hızı çevre şartları ve canlı popülasyonunun fonksiyonudur. Substratın bitimine bağlı olarak mikrobiyal ölüm hakim olur.

4.3.2. Prosesler

4.3.2.1.Mikrobiyal Çoğalma

Kesikli ve sürekli beslenen sistemlerde mikrobiyal çoğalma hızı Denklem (4.1) ile ifade edilir.

$$r_g = \mu X \tag{4.1}$$

Burada;

r_g : mikrobiyal çoğalma hızı (M/ L^3T)
μ : spesifik çoğalma hızı (1/T)
X : biyokütle konsantrasyonu (M/ L^3)

Kesikli olarak beslenen sistemlerde, mikrobiyal çoğalma hızı, dX/dt = r_g olduğundan, bu tür reaktörler için Denklem (4.2) yazılabilir.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \tag{4.2}$$

Spesifik (özgül) çoğalma hızı, reaktördeki hız kısıtlayıcı substrat konsantrasyonu ile ilişkilidir. Kesikli sistemlerde büyüme için gerekli olan substrattan yalnızca birisinin limitli olması durumunda önce konsantrasyon düşer ve büyüme durur. Sürekli beslemeli sistemlerde, büyüme limitlidir. Deneysel olarak limitli substrat etkisi en yaygın olarak "MONOD" tarafından teklif edilen doygunluk (Satürasyon) tipi bir reaksiyon ifadesi (Denklem (4.3)) ile belirlenir.

$$\mu = \mu_{maks}\left[\frac{S}{K_s + S}\right] \tag{4.3}$$

μ : spesifik (özgül) çoğalma hızı (1/T)
S : çoğalmayı sınırlayan substrat konsantrasyonu (M/ L^3)
K_s : yarı doygunluk sabiti (maksimum çoğalma hızının yarısındaki substrat konsantrasyonu) (M/ L^3)
μ_{maks} : maksimum spesifik çoğalma hızı (1/T)

μ değeri Denklem (4.1)'de yerine konulacak olursa, büyüme hızı Denklem (4.4) ile ifade edilebilir.

$$r_g = \frac{\mu_{maks} XS}{K_s + S} \tag{4.4}$$

Substrat konsantrasyonunun mikrobiyal çoğalma hızına etkisini gösteren grafik Şekil 4.2'de verilmektedir.

Şekil 4.2. Substrat konsantrasyonunun spesifik çoğalma hızına etkisi

Kesikli ve sürekli sistemlerde, substratın bir kısmı yeni hücrelere dönüştürülürken, bir kısmı da inorganik ve organik son ürünlere oksitlenir. Substrat giderim hızı ile mikrobiyal çoğalma hızı arasındaki ilişki Denklem (4.5) ile ifade edilir.

$$r_g = -Y r_{Su} \tag{4.5}$$

r_g : mikrobiyal çoğalma hızı (M/ L^3T)
Y : biyokütle dönüşüm oranı katsayısı (M/ M)
r_{Su} : substrat giderim hızı (M/ L^3T)

Denklem (4.4)'teki eşitlikte r_g değeri, Denklem (4.5)'teki eşitlikte yerine yazılırsa mikrobiyal çoğalma ve substrat giderim hızı arasındaki ilişkiyi gösteren Denklem (4.6) elde edilir.

$$r_{Su} = -\frac{\mu_{maks} XS}{Y(K_s + S)} \tag{4.6}$$

Denklem (4.6)'da (μ_{maks}/Y) teriminin yerine Denklem (4.7)'de yer alan k terimi kullanılabilir. Bu terim, maksimum spesifik substrat giderim hızını ifade eder. Tipik olarak $BOİ_u$ (≈KOİ) esasına göre k=8 $gün^{-1}$ olabilir.

$$r_{Su} = -\frac{kXS}{(K_s + S)} \tag{4.7}$$

Biyolojik oksidasyon proseslerinde, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderim mekanizması ile ilgili birkaç model önerilmiştir. Bütün modellerin gösterdiği ortak bir sonuç vardır. Monod tipi spesifik çoğalma ifadesinde, substrat konsantrasyonu çok yüksek seviyelerde olunca, μ değeri μ_{maks} değerine eşit olur. Dolayısıyla; yüksek BOİ konsantrasyonlarında BOİ giderim hızı sabit kalmaktadır. Bu ifadenin matematiksel olarak anlamı ise Monod eşitliğinin sıfırıncı derece olarak yazılmasına karşılık gelir. Arıtma kinetiği, K_s ve S 'in göreceli değerlerinden etkilenir. Eşitlikte iki sınır şartı belirlenebilir.

1. Eğer S >>K_s ise; K_S,S'in yanında ihmal edilebilir (Denklem (4.8)).

$$r_{Su} \cong -kX \tag{4.8}$$

Bu durumda substrat giderim hızı, substrat konsantrasyonundan bağımsızdır. Substrat giderim hızı, sistemdeki mevcut biyokütle konsantrasyonuna bağlıdır.

2. Eğer S <<K_s ise; eşitliğin paydasındaki S ihmal edilir ve eşitlik birinci dereceden bir reaksiyonu ifade eder (Denklem (4.9)).

$$r_{Su} \cong -kX\left(\frac{S}{K_s}\right) \cong -k^1XS \tag{4.9}$$

k^1 : özgül substrat giderim hızı (L^3/MT)

4.3.2.2.Mikrobiyal Ölüm

Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik sistemlerde, mikroorganizmalar sürekli olarak çoğalma fazında değildir. Mikrobiyal ölüm gibi diğer faktörler de hesaplamalar sırasında dikkate alınmalıdır. Mikrobiyal ölüm prosesi biyokütle kayıplarını tanımlamak için kullanılır. Mikrobiyal ölüm prosesi, mikroorganizmanın çoğalma özelliklerini geri dönüşsüz olarak kaybetmesidir. Hücre kütlesindeki azalmanın ortamdaki mevcut mikroorganizma konsantrasyonu ile orantılı olduğu düşünülür. Literatürde bu azalma içsel solunum olarak tanımlanır ve Denklem (4.10)'da olduğu gibi formüle edilir.

$$r_d = -k_dX \tag{4.10}$$

r_d : mikrobiyal ölüm hızı (M/ L^3T)
k_d : ölüm katsayısı (Gözlemlenen tipik k_d değerleri 0,07-0,1 gün^{-1}'dir.) (1/T)
X : biyokütle konsantrasyonu (M/ L^3)

Mikrobiyal çoğalma hızı denklemi (Denklem (4.4)), mikrobiyal ölüm hızına ait denklemle (Denklem (4.10)) birleştirilirse net mikrobiyal büyüme hızı (Denklem (4.11)) elde edilir.

$$r_g' = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} - k_dX \tag{4.11}$$

Denklem (4.5) Denklem (4.11) ile birleştirildiğinde; Denklem (4.12) elde edilir.

$$r_g' = -Yr_{Su} - k_dX \tag{4.12}$$

r_g' : net mikrobiyal çoğalma hızı (M/ L^3T)

Net spesifik mikrobiyal çoğalma hızı Denklem (4.13) ile hesaplanır.

$$\mu' = \mu_m \frac{S}{K_S + S} - k_d \tag{4.13}$$

μ' : net spesifik mikrobiyal çoğalma hızı (1/T)

r_g' ve r_s arasındaki oran net dönüşüm oranını verir (Denklem (4.14)).

$$\frac{r_g'}{r_{Su}} = Y_{NH} \tag{4.14}$$

Y_{NH} : net dönüşüm oranı

Atıksu arıtımında kullanılan tipik kinetik katsayı değerleri Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.3. Atıksu arıtımında kullanılan tipik kinetik katsayı değerleri [2]

Atıksu Türü	*Parametre*	*Verim*	k_d	μ_{maks} (gün^{-1})	K_S (mg/L)	k (gün^{-1})	k^1
Evsel atıksu	*$BOİ_u$*	*0,57*	*0,052*	*0,67*	*54*	*-*	*0,0234*
Evsel atıksu	*KOİ*	*0,4*	*0,09*	*≈3,2*	*60*	*8*	*-*
Evsel atıksu	*$BOİ_5$*	*0,37*	*0,098*	*-*	*45*	*8,35*	*-*
Evsel atıksu	*$BOİ_5$*	*0,73*	*0,075*	*-*	*-*	*-*	*0,017-0,03*
Petrokimyasal	*$BOİ_5$*	*0,31-0,72*	*0,05-0,18*	*-*	*-*	*-*	*0,003-0,012*

4.4. Çevre Koşullarının Biyolojik Reaksiyona Etkisi

Çevre koşullarının (sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, çözünmüş karbondioksit, redoks potansiyeli, toksisite vd.) mikroorganizmalar üzerinde etkileri oldukça önemlidir. Mikroorganizmaların metabolizmaları (özellikle çoğalma faaliyetleri) kendilerini çevreleyen fiziksel ortamın özelliklerine göre büyük ölçüde değişir.

4.4.1. Sıcaklık

Mikroorganizmaların metabolik faaliyetlerinin tümü kimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. Kimyasal tepkimeler gibi, mikroorganizma tepkimeleri de sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık yalnız metabolik faaliyetleri etkilemekle kalmaz; biyolojik çamurun çökelme özelliği, gaz transfer hızı gibi faktörleri de etkiler. Sıcaklığın biyolojik proseslerde reaksiyon hızı üzerindeki etkisi Denklem (4.15) ile ifade edilebilir.

$$r_T = r_{20}\, \theta^{T-20} \tag{4.15}$$

r_T : T ºC'deki reaksiyon hızı
r_{20} : 20 ºC'deki reaksiyon hızı
θ : sıcaklık aktivite katsayısı
T : sıcaklık

Farklı biyolojik sistemler için θ değerleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te verilmektedir.

Tablo 4.4. Farklı biyolojik sistemler için sıcaklık aktivite katsayıları [1]

Sistemler	*θ değeri*	
	Aralık	*Tipik*
Aktif Çamur	*1,00-1,04*	*1,02*
Havalandırmalı Lagün	*1,06-1,12*	*1,08*
Damlatmalı Filtre	*1,02-1,14*	*1,08*

Tablo 4.5. Evsel ve endüstriyel atıksular için sıcaklık aktivite katsayıları [2]

Sistem ve Atıksu Türleri	*θ değeri*
Aktif Çamur (Evsel atıksu)	
>0,6 kg BOİ/kg AKM	*1,0-1,01*
<0,6 kg BOİ/kg AKM	*1,01-1,04*
Aktif Çamur (Endüstriyel Atıksu Arıtımı)	*1,04-1,10*
Havalandırmalı Lagünler, Stabilizasyon Havuzları	
Evsel Atıksu	*1,035*
En düstriyel Atıksu	*1,035-1,10*

Sıcaklık aralıklarına göre mikroorganizmalar üç gruba ayrılırlar.

- Sakrofilik: Düşük sıcaklıkta (T < 20ºC) büyürler.
- Mezofilik: Orta sıcaklıkta (20ºC < T < 50ºC) büyürler.
- Termofilik: Yüksek sıcaklıkta (T > 50ºC) büyürler.

4.4.2. pH

Hidrojen iyonu (H^+) konsantrasyonu (pH), mikroorganizmaların aktivitelerini ve büyümelerini önemli ölçüde etkiler. Bu özellik hidrojen iyonunun enzim faaliyetine etkisi ile açıklanabilmektedir. Her mikroorganizmanın maksimum aktivite gösterdiği bir optimum pH aralığı vardır. Genellikle bakteriler pH 3-8, mantarlar pH 3-6, küfler pH 3-7, bitki hücreleri pH=6,5-7,5 aralığında optimum aktivite gösterirler. Mikroorganizmaların aktivitelerini maksimize edebilmek için ortamın pH'ı asit veya baz ilavesi ile kontrol edilebilir.

Ortamın pH'ı da aynı zamanda mikroorganizmaların aktiviteleri ile değişmektedir. Örneğin; amonyum (NH_4^+) azot kaynağı olarak kullanıldığında, ortama H^+ verildiğinden pH düşer. Çünkü nitrifikasyon sırasında amonyum azotu (NH_4^+) nitrata (NO_3^-) dönüşerek ortama H^+ iyonları vermektedir. NO_3^- iyonları azot kaynağı olarak kullanıldığında ise denitrifikasyon oluşur. Burada NO_3^-, azot (N_2) gazına dönüştüğü için ortamdan H^+ uzaklaşır ve pH yükselir.

4.4.3. Çözünmüş Oksijen

Çözünmüş oksijen (ÇO), aerobik arıtma sistemlerinde oldukça önemli bir parametredir. Suda çözünürlüğü az olan (ÇO =7-8 mg/L, 25 ^oC, 1 atm.) oksijenin sürekli sağlanması ve oksijen sınırlamasının önüne geçilebilmesi için oksijen transfer hızının oksijen kullanma hızından daha büyük olması gerekir. Kritik oksijen konsantrasyonu, bakteri ve mantarlar için doygunluk konsantrasyonunun %5-10'u arasında iken (1-2 mg/L), küfler için ise doygunluk konsantrasyonunun %10-50'si arasındadır (1-5 mg/L). Ortamda oksijen sınırlamasını gidermek için saf oksijen kullanılabileceği gibi, sistem yüksek basınç altında (2-3 atm) da çalıştırılabilir.

4.4.4. Çözünmüş Karbondioksit

Çözünmüş karbondioksit ($ÇCO_2$) de mikroorganizmaların aktivitelerini etkilemektedir. Yüksek $ÇCO_2$ konsantrasyonu toksik, düşük $ÇCO_2$ konsantrasyonu ise sınırlayıcı etki yapar. Bazı mikroorganizmalar (ototroflar) karbondioksiti karbon kaynağı olarak kullanırlar.

4.4.5. İyon Konsantrasyonu

Ortamın iyonik kuvveti (iyon konsantrasyonu) de organizmaların metabolik faaliyetlerini, O_2/CO_2'in çözünürlüğünü ve iyonların hücre içine ve dışına transferini etkileyen önemli bir faktördür.

4.5. Biyolojik Arıtma Sistemlerinde Mikrobiyal Proses Kinetiklerinin Uygulanması

Biyolojik arıtma proseslerinden önce mikrobiyal proses kinetiklerinin biyolojik arıtma sistemlerinde uygulanma esaslarından bahsedilecektir. Bunun amacı; mikroorganizma ve

substrat dengesini oluşturabilmek ve arıtılmış suda mikroorganizma ve substrat konsantrasyonlarını tahmin edebilmektir. Burada; geri devirsiz tam karışımlı aerobik reaktörler için kütle dengeleri oluşturulacak ve arıtılmış suda biyokütle ve substrat konsantrasyonları belirlenecektir.

4.5.1. Mikroorganizma ve Substrat Kütle Dengesi

Biyokütle için kütle dengesi Denklem (4.16), (4.17) ve (4.18) ile ifade edilir.

1. Genel tanım:

Sistemde biyokütle büyüme hızı	=	Sisteme birim zamanda giren biyokütle miktarı	-	Sistemden birim zamanda çıkan biyokütle miktarı	+	Sistemde net çoğalan biyokütle miktarı	(4.16)

2. Basitleştirilmiş tanım:

Birikim	=	Giriş	-	Çıkış	+	Net Çoğalma	(4.17)

3. Sembolik gösterim:

$$\frac{dX}{dt}V_r = QX_0 - QX + V_r r_g' \tag{4.18}$$

dX/dt : reaktörde biyokütle konsantrasyonunun değişim hızı (M/ L^3T)
V_r : reaktör hacmi (L^3)
Q : debi (L^3/T)
X_o : giriş akımındaki biyokütle konsantrasyonu (M/ L^3)
X : reaktördeki biyokütle konsantrasyonu (M/ L^3)
r_g' : net biyokütle çoğalma hızı (M/ L^3T)

Eğer Denklem (4.11) "r_g'" yerine yazılırsa Denklem (4.19) elde edilir.

$$\frac{dX}{dt}V_r = QX_0 - QX + V_r\left[\frac{\mu_m XS}{K_s + S} - k_d X\right] \tag{4.19}$$

S : reaktör çıkışında substrat konsantrasyonu (M/ L^3)

Çıkış akımında biyokütle konsantrasyonu ihmal edilir ve kararlı şartlar sağlanır (dX/dt = 0) ise, Denklem (4.19) sadeleştirilerek Denklem (4.20) yazılabilir.

$$\frac{Q}{V_r} = \frac{1}{\theta} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d \tag{4.20}$$

θ : hidrolik bekletme süresi (T)

$1/\theta$ net spesifik çoğalma hızına karşılık gelir. $1/\theta$ aynı zamanda $1/\theta_ç$'ye de karşılık gelir. Bu durumda çamur yaşı eşitliği de Denklem (4.21) ile ifade edilir.

$$\theta_Ç = \frac{V_r}{Q} \tag{4.21}$$

Substrat için kütle dengesi biyokütle kütle dengesine benzer şekilde yazılacak olursa, Denklem (4.22) elde edilir.

$$\frac{dS}{dt}V_r = QS_0 - QS + V_r\left[\frac{kXS}{K_s + S}\right] \tag{4.22}$$

Kararlı halde substrat için kütle dengesi yazıldığında; (dS/dt = 0) olduğundan Denklem (4.22), Denklem (4.23) olacak şekilde ifade edilir.

$$(S_0 - S) - \theta\left[\frac{kXS}{K_s + S}\right] = 0 \tag{4.23}$$

Burada $\theta = V_r/Q$'dur.

4.5.2. Arıtılmış Atıksuda Biyokütle ve Substrat Konsantrasyonları

Kararlı halde biyokütle konsantrasyonu Denklem (4.24) ile ifade edilir.

$$X = \frac{\mu_m(S_0 - S)}{k(1 + k_d\theta)} = \frac{Y(S_0 - S)}{(1 + k_d\theta)} \tag{4.24}$$

Benzer şekilde; çıkış substrat konsantrasyonu da Denklem (4.25) ile ifade edilir.

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1} \tag{4.25}$$

Bu şekilde, kinetik katsayılarda bilinirse, Şekil 4.3'ten çıkış suyundaki substrat konsantrasyonu tahmin edilebilecektir. Buradaki önemli nokta, Denklem (4.25) ile tahmin edilen çıkış substrat (BOİ$_5$, KOİ) konsantrasyonunun, çözünmüş formda olması nedeniyle, giriş atıksuyunda bulunabilecek askıda katı maddelerin dikkate alınmamasıdır. Dolayısıyla; biyolojik arıtma sisteminden gerçekte çıkan substrat ve askıda katı madde konsantrasyonları çökeltim tankı verimliliğine bağlıdır.

Gözlenen verim, $Y_{göz}$, Denklem (4.26) ile ifade edilmektedir.

$$Y_{göz} = \frac{Y}{1 + k_d\theta_c} \tag{4.26}$$

Şekil 4.3. Geri devirsiz tam karışımlı reaktörde, çıkış suyu substrat konsantrasyonunun ve giderim veriminin çamur yaşına göre değişimi [1]

4.6. Biyolojik Arıtma Prosesleri

4.6.1. Atıksu Arıtımında Kullanılan Biyolojik Proses Türleri

Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik prosesler farklı şekilde sınıflandırılabilir (Tablo 4.6). Biyolojik arıtmada beş önemli grup bulunmaktadır. Bunlar; aerobik prosesler, anoksik prosesler, anaerobik prosesler, birleşik aerobik, anoksik ve anaerobik prosesler ve doğal arıtma

sistemleri olarak sıralanabilirler. Her bir proses mikroorganizmaların konumuna göre askıda büyüyen, yüzeyde büyüyen (biyofilm) ve ikisinin birlikte uygulandığı kombine sistemler (askıda ve yüzeyde büyüyen prosesler) olmak üzere alt sınıflara ayrılabilir. Birden fazla prosesin art arda kullanıldığı ardışık sistemler de mevcuttur. Bu prosesler farklı uygulamalarla atıksu arıtımında kullanılabilmektedir. En sık kullanılan biyolojik prosesler aşağıda sıralanmaktadır.

- Aktif çamur prosesleri
- Damlatmalı filtreler
- Döner biyodiskler
- Havalandırmalı lagünler
- Stabilizasyon havuzları

Aktif çamur prosesleri veya onun modifikasyonları daha çok büyük tesislerde, stabilizasyon havuzları ise küçük tesislerde kullanılmaktadır. Bu proseslerin optimum şartlarda tasarlanması ve işletilmesi bu prosesleri gerçekleştiren mikroorganizma türlerinin bilinmesi, spesifik reaksiyonların tanımlanması, performansı etkileyebilecek çevresel faktörlerin değerlendirilmesi, besi maddesi ihtiyaçlarının ve reaksiyon kinetiklerinin tanımlanması ile gerçekleştirilebilir.

4.6.1.1.Askıda Büyüyen Sistemler

Askıda büyüyen sistemler; arıtmayı yapan bakterilerin askıda bulunduğu sistemlerdir. Askıda büyüyen sistemlere örnek olarak aktif çamur sistemi ve çeşitleri verilebilir. Askıda büyüyen sistemler, aktif çamur havuzu içindeki biyokütlenin havalandırma veya mekanik karıştırma ile askıda tutulması ve atıksu ile homojen karıştırılarak uygun koşullarda istenilen reaksiyonların oluşturulması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla, genellikle difüzörler veya yüzeysel havalandırıcıların kullanımı oksijen transferi ve tam karışımın sağlanması açısından yeterli olmaktadır. Havalandırma havuzuna oksijen transferi günlük ve mevsimlik ihtiyacı karşılayacak şekilde yapılmalıdır.

Tam karışımlı veya piston akımlı reaktör olarak projelendirilebilen aktif çamur havuzlarında atıksu, havalandırma havuzundan sonra son çökeltim havuzuna yönlendirilir. Son çökeltim tanklarında yerçekimi etkisi ile arıtılmış su biyokütleden ayrılarak sonraki arıtma ünitelerine (dezenfeksiyon, filtrasyon vb.) iletilir veya deşarj edilir. Aktif çamur sistemlerinde sadece organik maddenin ve amonyum azotunun giderimi (nitrat azotuna çevrilmesi) sağlanır.

Askıda çoğalan aktif çamur sistemlerinde organik madde giderimi ve nitrifikasyon prosesi, sistemin çamur yaşına bağlıdır. Organik madde giderimi yapan heterotrofik bakteriler, nitrifikasyonu sağlayan ototrofik bakterilere göre daha az hassastır. Dolayısıyla; normal şartlarda, nitrifikasyonun sağlandığı koşullarda organik madde giderimi de sağlanmaktadır. Öncelikle, nitrifikasyon prosesi için gerekli olan (havalı) çamur yaşı soğuk hava şartları göz önüne alınarak hesaplanmalı ve reaktör hacmi buna göre belirlenmelidir. Pratikte nitrifikasyon karbonlu organik maddenin giderilmesi için kullanılan reaktörde gerçekleştirilebileceği gibi, ayrı bir reaktörde de sağlanabilmektedir. Nitrifikasyon prosesinde 1 gram amonyum azotunun (NH_4^+-N) oksitlenmesi sonucu 7,14 gram $CaCO_3$ alkalinitesi tüketilmektedir. Dolayısıyla nitrifikasyon prosesi için atıksudaki alkalinitenin kontrol edilmesi gerekmektedir. Çamur yaşının belirli seviyede seçilmesi ile ($\theta_c \leq 10$ gün) sadece organik karbon giderimi de sağlanabilir.

Tablo 4.6. Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik prosesler [1]

Proses Tipi	*Proses Adı*	*Kullanım Amacı*
Aerobik Prosesler		
Askıda Büyüyen	*Aktif Çamur Prosesleri*	*BOİ Giderimi ve Nitrifikasyon*
	Konvansiyonel (Piston Akımlı)	
	Tam Karışımlı	
	Kademeli Havalandırmalı	
	Saf Oksijenli	
	Ardışık Kesikli Reaktör	
	Uz un havalandırmalı	
	Oksidasyon hendeği	
	Derin Şaft Aktif Çamur Sistemi	
Yüzeyde Büyüyen	*Damlatmalı Filtre*	*BOİ Giderimi ve Nitrifikasyon*
	Düşük Hızlı	
	Yüksek Hızlı	
	Döner Biyodisk	*BOİ Giderimi ve Nitrifikasyon*
Hibrit Prosesler	*Damlatmalı Filtre/Aktif Çamur*	*BOİ Giderimi ve Nitrifikasyon*
Anoksik Prosesler		
Askıda Büyüyen	*Askıda Büyüyen Denitrifikasyon*	*Denitrifikasyon*
Yüzeyde Büyüyen	*Yüzeyde Büyüyen Denitrifikasyon Filtresi*	*Denitrifikasyon*
Anaerobik Prosesler		
Askıda Büyüyen	*Anaerobik Çürütme*	*Atık Stabilizasyonu ve Patojen Giderimi*
	Standart Hızlı, Tek Kademeli	
	Yüksek Hızlı, Tek Kademeli	
	İki Kademeli	
	Anaerobik Kontakt Prosesler	*BOİ Giderimi*
Yüzeyde Büyüyen	*Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör*	*BOİ Giderimi*
	Anaerobik Filtre	*BOİ Giderimi* *Atık Stabilizasyonu* *Denitrifikasyon*
	Genleşmiş Yataklı Reaktör	*BOİ Giderimi* *Atık Stabilizasyonu*
Birleşik Aerobik, Anaerobik ve Anoksik Prosesler		
Askıda Büyüyen	*Tek veya Çok Aşamalı Çeşitli Özel Prosesler*	*BOİ Giderimi* *Nitrifikasyon* *Denitrifikasyon* *Fosfor Giderimi*
Hibrit Prosesler	*Tek veya Çok Aşamalı Prosesler*	*BOİ Giderimi* *Nitrifikasyon* *Denitrifikasyon* *Fosfor Giderimi*
Doğal Arıtma Sistemleri	*Havalandırmalı Lagünler*	*BOİ Giderimi* *Nitrifikasyon*
	Olgunlaşma Havuzları	*BOİ Giderimi* *Nitrifikasyon*
	Fakültatif Havuzlar	*BOİ Giderimi*
	Anaerobik Lagünler	*BOİ Giderimi* *(Atık Stabilizasyonu)*

4.6.1.2.Yüzeyde Büyüyen Sistemler

Yüzeyde büyüyen sistemler ise; arıtmayı yapan bakterilerin sabit bir yüzey üzerine tutunarak büyüdüğü sistemlerdir. Bunların başlıca örnekleri; damlatmalı filtreler, döner biyolojik disk (biyodisk) ve dolgulu reaktörlerdir (Şekil 4.4).

(a) Damlatmalı filtre (b) Döner biyodisk

Şekil 4.4. Mikroorganizmaların yüzeyde tutunduğu damlatmalı filtre ve döner biyodisk sistemlerinin şematik gösterimi [1]

4.6.2. Biyolojik Arıtma Proseslerinin Uygulama Alanları

Biyolojik arıtma proseslerinin temel uygulama alanları aşağıda sıralanmaktadır.

- Atıksuda özellikle BOİ, TOK (toplam organik karbon) veya KOİ olarak ölçülen organik maddelerin giderimi
- Nitrifikasyon
- Denitrifikasyon
- Fosfor giderimi
- Atık stabilizasyonu

Bu kitapta nitrifikasyon, denitrifikasyon ve fosfor giderimi ileri atıksu arıtımı, atık stabilizasyonu da Bölüm 7'de detaylı olarak açıklanacaktır.

4.7. Aerobik Prosesler

4.7.1. Askıda Büyüyen Aerobik Arıtma Sistemleri

4.7.1.1.Aktif Çamur Prosesi

Biyolojik arıtmada kullanılan en yaygın yöntem aktif çamur sistemleridir. Aktif çamur prosesi, İngiltere'de 1914'te Arden ve Lockett tarafından geliştirilmiştir. Bu prosesin çeşitleri geliştirilerek kullanılmaktadır. Bu sistem organik kirliliğin, askıda tutulan mikroorganizmalar (heterotrofik bakteriler) yardımıyla giderildiği bir arıtma metodudur.

Deşarj standartlarına bağlı olarak aktif çamur sistemleri karbonlu organik madde giderimi ve nitrifikasyon için uygun reaktör konfigürasyonları ile etkin olarak çalıştırılabilir. Son çökeltim tankında çökelen çamur aktif çamur havuzuna geri devrettirilmek sureti ile uygun biyokütle konsantrasyonu sağlanmış olur. Öngörülen biyokütle miktarından fazlası ise fazla çamur olarak sistemden atılır.

Son çökeltim havuzları biyolojik arıtmadan sonra arıtılmış atıksuyu biyokütleden yerçekimi etkisi ile fiziksel olarak ayıran dairesel ya da dikdörtgen planlı havuzlardır. Dairesel havuzlarda biyokütle atıksu karışımı besleme şekli olarak merkezden ya da çevreden yapılmakta, arıtılan su radyal doğrultuda hareket etmektedir. Dikdörtgen planlı havuzlarda ise yatay hareket ederek çökeltim tankından çıkmaktadır. Giriş yapısı ve çamur toplama sisteminin tasarımı çökeltim tankındaki laminer akım koşullarını ve çamurun çökelme özelliğini bozmayacak şekilde

yapılmalıdır. Ayrıca, giriş yapısı ve köprünün hızı, karışımın enerjisini kırıcı düzenekler ile donatılmalı ve gerekli hız tahkikleri yapılmalıdır.

Çökeltilmiş su, son çökeltim havuzlarından savaklar yardımı ile toplanmaktadır. Birim savak yükleri hesaplanarak, toplam savak uzunluğu ve savak sayısına karar verilmektedir. Gerekli görüldüğü takdirde tek ve çift taraflı savaklar teşkil edilmektedir. Savaklar genellikle, dikdörtgen veya üçgen tipli olarak seçilmektedir. Savak yapıları minimum ve maksimum yükleri geçirecek şekilde planlanmalıdır.

Yüzeydeki köpük ve tabandaki biyolojik çamur birikintilerinin uzaklaştırılması için uygun bir yüzey ve taban sıyırma tertibatı bulunmalıdır. Tabandan çamur toplama işlemi köprüye bağlı sıyırıcı ya da pompa ile emme tipli olarak projelendirilir. Çamur haznesinin büyüklüğü çamurun özelliklerine ve çamur boşaltma aralıklarına uygun olmalıdır. Köprüye bağlı sıyırıcı olan sistemlerde havuz tabanı uygun teşkil edilmelidir. Emme tipli sıyırma tertibatında son çökeltim tankının tabanı düz olmalıdır. Son çökeltim tankındaki kenar su derinliğinin en az 3 m civarında olması öngörülmektedir.

Proses Tasarım Yaklaşımları

Aktif çamur prosesinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken kriterler aşağıda sıralanmaktadır.

- Reaktör tipinin seçimi
- Yükleme kriterleri
- Çamur üretimi
- Oksijen ihtiyacı ve transferi
- Besi maddesi ihtiyacı
- Filamentli bakterilerin kontrolü
- Çıkış suyunun özellikleri (deşarj standartları)

(a) Reaktör Tipinin Seçimi

Herhangi bir biyolojik prosesin tasarımında en önemli adımlardan biri kullanılacak reaktör veya reaktörlerin seçimidir. İşletmeyi etkileyen faktörler aşağıda sıralanmaktadır.

- Arıtma prosesine hakim olan reaksiyon kinetiği
- Oksijen transfer ihtiyacı
- Arıtılacak atıksuyun özellikleri
- Çevresel koşullar
- İlk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri

Bu faktörlerin önemi her uygulama için değişecektir. İşletmeyi etkileyen faktörlerin aktif çamur prosesi için önemi aşağıda açıklanmaktadır.

Birinci faktör; reaksiyon kinetiğinin reaktör seçimi üzerinde etkisidir. Reaktörler tam karışımlı veya piston akımlı olabilir. Her iki tip reaktör için de pratik açıdan bakıldığında hidrolik bekletme süreleri hemen hemen aynıdır.

İkinci önemli faktör ise oksijen transfer ihtiyacıdır. Konvansiyonel piston akımlı biyolojik arıtma sistemlerinde, reaktör sonunda ihtiyacı karşılayacak oksijen konsantrasyonlarına ulaşmanın imkansız olduğu anlaşılmıştır. Bu durumda aktif çamur proseslerinde çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Bunlar; kademeli havalandırma yapılan prosesler, kademeli beslemeli prosesler, atıksuyun reaktör boyunca dağıtıldığı prosesler ve tam karışımlı proseslerdir. Havalandırma reaktörün her yerinde aynıdır ve gerekli oksijen ihtiyacı veya daha fazlası sağlanır.

Üçüncü faktör, arıtılacak atıksuyun özellikleridir. Örneğin; sisteme giren atıksu tam karışımlı reaktörde takriben eşit olarak dağılır. Piston akımlı reaktörlere kıyasla tam karışımlı reaktörlerde mikroorganizmalar şok yüklemelere daha kolay karşı koyabilir.

Dördüncü faktör, çevresel koşullardır. Çevresel koşullar arasında; sıcaklık, pH ve alkalinite en önemlileridir. Atıksudaki sıcaklık değişimi doğrudan biyolojik reaksiyon hızını etkilemektedir. Örneğin; sıcaklıktaki 10ºC'lik azalma reaksiyon hızını yarı yarıya düşürür. Atıksu sıcaklığında önemli bir değişim bekleniyorsa, seri halde tam karışımlı veya piston akımlı reaktörler kullanmak etkili olacaktır. Alkalinite ve pH özellikle nitrifikasyon proseslerinde oldukça önemlidir. Düşük pH nitrifikasyon bakterilerinin büyümesini engeller. Düşük alkaliniteye sahip atıksular az da olsa bir tampon kapasitesine sahiptir ve pH, bakteri solunumu sonucu ortama verilen CO_2 nedeniyle düşer.

Beşinci faktör, ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleridir ve bunlar reaktör tipi ve büyüklüğü seçimi açısından son derece önemlidir.

(b) Yükleme Kriterleri

Aktif çamur prosesinin kontrolü ve tasarımında uzun yıllar deneysel ve rasyonel parametreler kullanılmıştır. En çok kullanılan iki parametre, besi-mikroorganizma oranı (F/M) ve çamur yaşı (θ_c)'dır.

F/M'nin tipik literatür değeri 0,05-1 aralığında değişir. Yüksek kalite çıkış suyu, iyi çökelme özelliğine sahip çamur ve kararlı bir sistem elde edebilmek için genellikle 3-15 gün aralığında çamur yaşı uygulanır. Havalandırma tankında tipik hidrolik bekletme süresi 4-8 saat arasında değişmektedir. Günlük BOİ yükleme hızı da 0,3–3 kg/m^3.gün aralığındadır.

(c) Çamur Üretimi

Atılacak çamur miktarını belirlemek ve çamur yoğunlaştırıcı tasarımını yapabilmek için günlük oluşan çamur miktarını belirlemek gereklidir.

(d) Oksijen İhtiyacı ve Transferi

Sistemin oksijen transfer verimi biliniyorsa verilmesi gereken hava miktarı da belirlenir. Verilen hava; atıksuda BOİ arıtımını, çamurun içsel solunumunu, ortam için gerekli karışımı ve havalandırma tankında minimum çözünmüş oksijen konsantrasyonunun 1-2 mg/L olmasını sağlayabilmelidir.

F/M>0,3 ise; hava gereksinimi, iri kabarcıklı difüzör kullanıldığında 30-55 m^3/kg giderilen BOİ, ince kabarcıklı difüzör kullanıldığında 24-36 m^3/kg giderilen BOİ'dir. Düşük F/M oranlarında içsel solunum, nitrifikasyon ve uzun havalandırma süresinden dolayı hava ihtiyacı arttığından önerilen değer 75-115 m^3/kg giderilen BOİ'dir. Aktif çamur proseslerinde hava ihtiyacı 93,5 m^3/kg BOİ$_5$, uzun havalandırmalı sistemlerde ise 125 m^3/kg BOİ$_5$'tir (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. F/M ve proses tipine bağlı olarak hava ihtiyacı [1]

	Gerekli Hava (m^3/kg BOİ$_5$)
F/ M>0,3	
İri kabarcıklı difüzör	*30-55*
İnce kabarcıklı difüzör	*24-36*
F/ M<0,3	*75-115*
Aktif Çamur	*93,5*
Uz un Havalandırma	*125*

(e) Besi Maddesi İhtiyacı

Azot ve fosfor besi maddesi olup, atıksuda yüksek konsantrasyonda bulunmaları biyolojik reaksiyon için inhibisyona, düşük konsantrasyonda bulunmaları ise sınırlamalara yol açar.

Hücre bileşimi $C_5H_7NO_2$ olarak alınırsa, ağırlığının %12,4'ü kadar azot gerekecektir. Bu değer tipik değer olup, çevre şartları ve çamur yaşına bağlı olarak hücredeki azot ve fosfor dağılımı değişebilmektedir. Birçok biyolojik sistem için gerekli diğer besi maddeleri Tablo 4.8'de verilmektedir.

Tablo 4.8. Mikroorganizma için gerekli inorganik iyonlar [1]

Yüksek Miktarlar	*Eser Miktarlar*
Sodyum	*Demir*
Potasyum	*Bakır*
Kalsiyum	*Mangan*
Fosfat	*Bor*
Klorür	*Molibden (Bazı protista ve hayvanlar için)*
Sülfat	*Vanadyum (Bazı protista ve hayvanlar için)*
Bikarbonat	*Kobalt (Bazı protista ve hayvanlar için)*
	İyot (Bazı hayvanlar için)
	Selenyum (Bazı hayvanlar için)

Tablo 4.9'da *E. Coli*'nin inorganik kompozisyonu verilmektedir. Büyüme için gerekli eser elementler yaklaşık olarak buradan hesaplanabilir. Toplam besi miktarı üreyen net mikroorganizma miktarı ile ilgilidir ve besi maddesi gereksinimi çamur yaşının uzun olması ile azalacaktır.

Tablo 4.9. E. Coli'nin inorganik bileşimi [1]

Elementler	*% Kuru Hücre Ağırlığı*
Potasyum	*1,5*
Kalsiyum	*1,4*
Sodyum	*1,3*
Magnezyum	*0,54*
Klorür	*0,41*
Demir	*0,2*
Manganez	*0,01*
Bakır	*0,01*
Alüminyum	*0,01*
Çinko	*0,01*

(f) Filamentli Bakterilerin Kontrolü

Aktif çamur proseslerinde filamentli bakterilerin büyümesi çok sık rastlanan bir işletme problemidir. Sistemde filamentli bakterilerin bulunması çamurun çökelme özelliğini zayıflatır ve kabarma problemine yol açar. Tek kademeli tam karışımlı reaktörler düşük substrat seviyelerinden dolayı filamentli bakterilerin büyümelerine çok uygundurlar. Bazı piston akımlı reaktörlerde de benzer problemlerle karşılaşılmaktadır. Son araştırmalar filamentli bakterilerin büyümesini engelleyen yöntemleri bulmak ve pratik kontrol metotları oluşturmak üzerine yoğunlaşmıştır. Filamentli bakterilerin kontrol ve önlenmesi için bir yaklaşım, ham su ile aktif çamur geri devrinin karıştığı ilk temas bölgesi için ayrı bölüm veya selektör kullanmaktır. S elektör; tam karışımlı veya piston akımlı reaktörlerde, ayrı bir tank veya portatif bir bölme olarak yer alabilir.

Selektörün kullanılma amacı biyolojik prosesin yüksek F/M oranının bulunduğu ilk safhasında çözünmüş oksijen konsantrasyonunu kontrol ederek flok formundaki biyokütlenin büyümesini

sağlamaktır. Yüksek substrat oranı nedeniyle çözünmüş organik madde hızlı bir şekilde flok formundaki biyokütle tarafından adsorplanır. Çözünmüş organik maddelerin ortamdan hızla adsorplanması sayesinde, ortamdaki filamentli bakteriler için daha az kullanılabilir substrat kalmış olur. Bu yöntem ile etkili sonuçlar alınmıştır. Yeterli bir karışım için havalandırma sağlanmalı veya mekanik karıştırıcılar kullanılmalıdır.

Selektördeki temas süresi oldukça az olup, genellikle 10 ile 30 dakika arasındadır. Tasarım parametrelerinin belirlenmesi için pilot çalışmaların yapılması tavsiye edilmektedir. Selektörün çok küçük olması durumunda, önemli miktarda çözünmüş substrat havalandırma tankına geçebileceği gibi, çok büyük olması durumunda da seyrelmeyle düşük F/M oranı oluşumu söz konusu olur.

(g) Çıkış Suyunun Özellikleri

Çıkış suyunun özellikleri arasında en önemli parametre organik madde içeriğidir. Biyolojik arıtma prosesinin çıkışında organik madde içeriği aşağıdaki üç bileşenden oluşmaktadır.

- Çözünmüş organik maddeler
  - Biyolojik arıtmadan kaçan organik maddeler
  - Atığın biyolojik olarak parçalanması sırasında oluşan ara ürünler
  - Hücresel bileşimler (mikroorganizma ölümü sonucu)
- Askıda organik maddeler
  - Arıtma sırasında oluşan ve son çökeltim tankından kaçan biyokütle
  - Arıtmadan ve çökeltim tankından kaçan giriş atıksuyundaki kolloidal organik katı maddeler
- Biyolojik olarak parçalanamayan organik maddeler
  - Orijinal olarak ham atıksuda bulunan maddeler
  - Biyolojik parçalanma ürünleri

<u>Proses Analizi:</u>

Bütün aerobik atıksu arıtma proseslerinde atıklar (a) sentez ve (b) oksidasyon yolu ile yok olurlar. Diğer bir deyişle; organik maddelerin bir kısmı yeni hücrelere dönüşürken (sentez), geri kalan kısmı gerekli enerjiyi üretmek için oksidasyona tabi tutulurlar. Organik maddeler yok olmaya başlayınca biyolojik hücrelerin bir kısmı gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla kendi kendini oksitleyebilir (içsel solunum).

Aerobik biyolojik oksidasyon reaksiyonları genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Organik madde (BOİ, KOİ)+O_2+N+P → Hücre+CO_2+H_2O+biyolojik olarak ayrışamayan çözünebilir maddeler

Hücre+O_2 → CO_2+H_2O+N+P+biyolojik olarak ayrışamayan hücresel kalıntılar

Biyolojik olarak ayrışma tüm aerobik biyolojik arıtma sistemlerinde yer almaktadır. Biyolojik reaksiyon üç adımda gösterilmektedir.

1. Adım: Biyokütlenin üretimi ve organik maddenin oksidasyonu

$$8(CH_2O) + NH_3 + 3O_2 \longrightarrow C_5H_7NO_2 + 3O_2 + 6H_2O + \text{Enerji}$$

2. Adım: Biyokütlenin solunumu

$$C_5H_7NO_2 + 5\,O_2 \longrightarrow 5CO_2 + NH_3 + H_2O + \text{Enerji}$$

3. Adım: Nitrifikasyon

$$NH_3 + 2O_2 \longrightarrow HNO_3 + H_2O + \text{Enerji}$$

Tam Karışımlı Geri Devirli Reaktör: Tam karışımlı ve geri devirli sistem Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Reaktör girişinde mikroorganizma olmadığı farz edilmektedir. Sistemi takiben çökeltim havuzu bulunmaktadır. Çökeltim havuzunda biyokütle sistemden ayrılmakta ve geri devir ile tekrar sisteme geri döndürülmektedir. Burada katılar için çökeltim ünitesi de olduğu için, kinetik modeli geliştirme aşamasında iki yaklaşım kullanılmalıdır.

- Biyolojik arıtma tarafından atık stabilizasyonu yalnızca reaktörde meydana gelmektedir. (Bazı sistemlerde çökeltim ünitesinde de atık stabilizasyonu vardır).
- Tüm sistem için, çamur yaşı hesabında yalnızca reaktör hacmi kullanılır.

Çökeltim tankının, havalandırma tankındaki katı atık seviyesini belirli aralıkta tutmak için kullanılan bir hazne vazifesi gördüğü kabul edilir. Örneğin; saf-oksijenli bir aktif çamur sisteminde, sistemdeki toplam askıda katı maddenin %50'sinin çökeltme tankında tutulduğu bulunmuştur. Bu durumda; sistem için ortalama hidrolik bekletme süresi (θ_s) Denklem (4.27) ile ifade edilebilir.

$$\theta_s = \frac{V_t}{Q} = \frac{V_r + V_s}{Q} \tag{4.1}$$

V_t : reaktör ve çökeltim tankı hacmi toplamı (L^3)
Q : atıksu giriş debisi (L^3/T)
V_r : reaktör hacmi (L^3)
V_s : çökeltim tankı hacmi (L^3)

Reaktör için ortalama hidrolik bekletme süresi (θ) Denklem (4.28) ile hesaplanır.

$$\theta = \frac{V_r}{Q} \tag{4.2}$$

Sistem için çamur yaşı (θ_c), reaktördeki çamur miktarının sistemden her gün atılan çamur miktarına bölünmesiyle ifade edilir (Şekil 4.5). Çamur yaşı aşağıdaki Denklem (4.29) ve Denklem (4.30) ile ifade edilebilir.

1. Havalandırma havuzu (tankı) hacmine göre tanımlama:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{(Q_W X_W + Q_e X_e)} \tag{4.3}$$

θ_c : çamur yaşı (T)
V_r : havalandırma havuzu hacmi (L^3)
X : havalandırma havuzundaki uçucu askıda katı madde konsantrasyonu (M/L^3)
Q_W : sistemden atılan çamur debisi (L^3/T)
X_W : atık çamurdaki uçucu askıda katı madde konsantrasyonu (M/L^3)
Q_e : çökeltim tankı çıkış suyu debisi (L^3/T)
X_e : çökeltim tankı çıkış suyunda uçucu askıda katı madde konsantrasyonu (M/L^3)

2. Toplam sistem hacmine göre tanımlama:

$$\theta_{ct} = \frac{X_t V_t}{Q_W X_W + Q_e X_e} \tag{4.4}$$

θ_{ct} : bütün sisteme bağlı olarak hesaplanan çamur yaşı (T)
X_t : sistemde toplam uçucu askıda katı madde konsantrasyonu (havalandırma havuzu, son çökeltim havuzu ve geri devir hattındaki çamuru içerir.)

θ_c veya θ_{ct}'den hangisinin kullanılacağı, havalandırma tankındaki veya sistemin tamamındaki çamur konsantrasyonuna bağlıdır.Yüksek konsantrasyonda çamur, çökeltim tankı ve geri devir

hattında kalıyor ise θ_{ct}'nin kullanımı uygundur. Bu durumda aerobik veya anaerobik ortamda içsel solunum ihmal edilmiş olur.

Tasarım çalışmasında Denklem (4.29) esas alınır. Bu denkleme göre tüm substratın havalandırma havuzunda giderildiği kabul edilir. Sistemdeki toplam çamurun büyük bir kısmı çökeltim tankı ve geri devir hattında bulunur. Denklem (4.30) atılacak çamur miktarının hesaplanmasında kullanılır. Çökeltim tankındaki çamur miktarı, çamur kütlesinin %KM oranı ve geri devir hattındaki çamur konsantrasyonu kullanılarak hesaplanabilir.

Çamur yaşı proses kontrolünde kullanılıyorsa, havalandırma tankından atılacak çamur debisi çıkıştaki AKM ihmal edilerek Denklem (4.31) ve Denklem (4.32) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q_c = \frac{V_r}{Q_W} \tag{4.31}$$

$$Q_W \approx \frac{V_r}{\theta_c} \tag{4.32}$$

Q_w : havalandırma tankından atılan çamur debisi (L^3/T)

Şekil 4.5. Tam karışımlı ve geri devirli aktif çamur sistemi (Çamur reaktör içinden atılmaktadır.)

Fazla çamurun geri devir hattından atılması durumunda, Q_c Denklem (4.33) ile hesaplanır (Şekil 4.6).

$$Q_c = \frac{V_r X}{Q_W^1 X_r + Q_e X_e} \tag{4.33}$$

X_r : geri devir hattındaki çamur konsantrasyonu (M/L^3)
Q_w^I : geri devir hattından atılan çamur debisi (L^3/T)

Çökeltim tankı çıkışındaki katı madde konsantrasyonu çok düşükse, Denklem (4.33) kısaltılarak Denklem (4.34) ve Denklem (4.35) olarak ifade edilir.

$$Q_c \approx \frac{V_r X}{Q_W^1 X_r} \tag{4.34}$$

$$Q_W^1 \approx \frac{V_r X}{\theta_c X_r} \tag{4.35}$$

Tüm sistemde biyokütle için kütle dengesi Denklem (4.36) ile ifade edilir.

$$\frac{dX}{dt} V_r = Q X_0 - (Q_W X + Q_e X_e) + V_r(r_g') \tag{4.36}$$

Denklem (4.12), net mikrobiyal büyüme yerine konulur, çıkıştaki biyokütle konsantrasyonu sıfır kabul edilir ve kararlı durum (dX/dt = 0) alınırsa; Denklem (4.37) elde edilir.

$$\frac{Q_W X + Q_e X_e}{V_r X} = -Y\frac{r_{Su}}{X} - k_d \tag{4.37}$$

Denklem (4.37)'ün sol tarafı $1/Q_c$ olduğundan, Denklem (4.37) Denklem (4.38) olacak şekilde tekrar yazılabilir.

$$\frac{1}{\theta_c} = -Y\frac{r_{Su}}{X} - k_d \tag{4.38}$$

Substrat giderim hızı Denklem (4.39) ile ifade edilir.

$$r_{Su} = -\frac{Q}{V_r}(S_0 - S) = -\frac{S_0 - S}{\theta} \tag{4.39}$$

$(S_0 - S)$: giderilen substrat konsantrasyonu (M/ L^3)
S_0 : giriş atıksuyundaki substrat konsantrasyonu (M/ L^3)
S : çıkış atıksuyundaki substrat konsantrasyonu (M/ L^3)
θ : hidrolik bekletme süresi (T)

Şekil 4.6. Tam karışımlı ve geri devirli aktif çamur sistemi (Çamur geri devir hattından atılmaktadır.)

Denklem (4.38) ve Denklem (4.39) birleştirilirse, biyokütle konsantrasyonu Denklem (4.40) ile ifade edilir.

$$X = \frac{\theta_c}{\theta}\frac{Y(S_0 - S)}{(1 + k_d\theta_c)} \tag{4.40}$$

Substrat için yazılan kütle dengesinden elde edilen çıkış suyundaki substrat konsantrasyonu Denklem (4.41) ile ifade edilir.

$$S = \frac{K_s(1 + \theta_c k_d)}{\theta_c(Yk - k_d) - 1} \tag{4.41}$$

$Y_{göz.}$ Denklem (4.42) ile ifade edilir.

$$Y_{göz} = \frac{Y}{1 + k_d\theta_c \; veya \; \theta_{ct}} \tag{4.42}$$

Proses Tasarımı:

Sistemdeki değişimlerin etkilerini tahmin etme sürecinde Denklem (4.40) ve Denklem (4.41)'in kullanımı faydalı olacaktır. Bunun yanı sıra farklı diğer proses tasarım eşitlikleri de geliştirilmiştir. Bunlar özgül substrat kullanım hızı, ortalama çamur yaşı ve F/M oranını içerir. F/M, spesifik substrat giderim hızı ile doğrudan ilgili olup (Denklem (4.43)), pratikte en çok kullanılan tasarım ve kontrol parametresidir. Denklem (4.38)'deki ($-r_{su}/X$), spesifik substrat giderim hızı (U) olarak bilinmektedir.

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\theta X} \tag{4.43}$$

F/M : besi-mikroorganizma oranı (1/T)
S_0 : giriş atıksuyundaki BOİ veya KOİ konsantrasyonu (M/ L^3)
θ : hidrolik bekletme süresi = V/ Q (T)
V : havalandırma havuzunun hacmi (T^3)
Q : atıksu debisi (L^3/T)
X : havalandırma havuzundaki uçucu askıda katı madde konsantrasyonu (M/ L^3)

Spesifik substrat giderim hızı (U) ve F/M proses verimliliği (E) ile ilgilidir (Denklem (4.44)).

$$U = \frac{(F/M)E}{100} \tag{4.44}$$

E : proses verimi (%)

Proses verimi (E) Denklem (4.45) ile ifade edilir.

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100 \tag{4.45}$$

E : proses verimi (%)
So : giriş substrat konsantrasyonu (M/ L^3)
S : çıkış substrat konsantrasyonu (M/ L^3)

Verim yerine (4.45) ve F/M yerine Denklem (4.43) konulursa Denklem (4.44) Denklem (4.46) olacak şekilde yazılır.

$$U = -\frac{r_{Su}}{X} = \frac{S_0 - S}{\theta X} = \frac{Q}{V_r}\frac{S_0 - S}{X} \tag{4.46}$$

S : çıkış atıksuyunda BOİ veya KOİ konsantrasyonu (M/ L^3)

Çamur yaşı (θ_C), besi-mikroorganizma oranı (F/M) ve spesifik substrat giderim hızı (U) arasındaki bağıntı; Denklem (4.38)'de (-rsu/X) yerine U konulduğunda Denklem (4.47) ile ifade edilebilir.

$$\frac{1}{\theta_C} = Y\frac{F}{M}\frac{E}{100} - k_d = YU - k_d \tag{4.47}$$

Y : verim katsayısı (M/ M)
E : proses verimi (%)
k_d : ölüm katsayısı (1/T)

Denklem (4.47)'de görüldüğü üzere; net spesifik çoğalma hızı ($1/\theta_c$) ile spesifik substrat giderim hızı doğrudan birbirleriyle ilişkilidir. U'yu belirlemek için substrat giderimini ve biyokütle miktarını bilmek gerekir.

Teorik oksijen ihtiyacı; atığın BOİ'sine ve sistemden günde atılan çamur miktarına göre belirlenir. Tüm BOİ son ürüne dönüşüyorsa toplam oksijen ihtiyacı, uygun dönüşüm faktörü kullanılarak $BOİ_U$'ya dönüşen $BOİ_5$'ten hesaplanabilir. Atığın bir kısmının sistemden atılacak çamura dönüştüğü bilinmektedir. Bu nedenle, atılan çamurun $BOİ_L$'si toplamdan çıkarılır ise kalan miktar sisteme verilmesi gereken oksijen miktarını gösterir. Aşağıda verilen reaksiyonda görüleceği üzere çamurun 1 molünün $BOİ_U$'su (≈KOİ) hücre konsantrasyonunun 1,42'sine eşittir.

$C_5H_7NO_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 2H_2O + NH_3$ + enerji

113	5 (32)
hücre	
1	1,42

Bu nedenle, aktif çamur sistemi için atıksudaki organik maddenin giderimi için gereken teorik oksijen ihtiyacı Denklem (4.48) ile hesaplanabilir.

kg O_2/gün = (kullanılan $BOİ_L$ nin top. kütlesi, kg/gün) – 1,42 (atılan çamur miktarı, kg/gün)

$$\frac{kg\ O_2}{gün} = \frac{Q(S_0 - S)\left(10^3 \frac{g}{kg}\right)^{-1}}{f} - 1{,}42(P_X) \tag{4.48}$$

f : $BOİ_5$'ten $BOİ_L$'ye dönüşüm faktörü

Nitrifikasyon reaksiyonunun da sistemde gerçekleşmesi durumunda, toplam oksijen ihtiyacı Denklem (4.49)'da gösterildiği gibi karbon gideriminde kullanılan oksijen ile azot dönüşümü (amonyaktan nitrata) için gereken oksijen ihtiyacının toplamı olarak belirlenir.

$$\frac{kg\ O_2}{gün} = \frac{Q(S_0 - S)\left(10^3 \frac{g}{kg}\right)^{-1}}{f} - 1{,}42(P_X) + 4{,}57Q(N_0 - N)(10^3\ g/kg)^{-1} \tag{4.49}$$

N_o : giriş atıksuyundaki TKN (M/ L^3)
N : çıkış suyundaki TKN (M/ L^3)
4,57 : TKN'nin tam oksidasyonunda gereken oksijen ihtiyacı için dönüşüm faktörü

Son çökeltim havuzları için ana tasarım parametreleri, bekletme süresi (t), katı madde yükü (q_M), yüzeysel hidrolik yük (q_H) ve kenar su derinliğidir (H_S). Bu parametrelerden katı madde yükü havalandırma havuzundan son çökeltim tankına gelen (atıksu ve çamur geri devir debileri ile birlikte) toplam katı madde yükünün havuzun etkin yüzey alanına bölünmesi ile bulunmaktadır. Yüzeysel hidrolik yük ise havuzun yüzeyinden savaklanan arıtılmış su debisinin havuzun yüzey alanına bölünmesi ile bulunmaktadır. Son çökeltim tankının tasarım kriterlerinin maksimum debi koşullarında da kontrol edilmesi gereklidir. Biyolojik fazla çamur, geri devir akımından (ya da biyolojik reaktörden) düzenli olarak atılmalı ve çamur işleme ünitelerine hemen ulaştırılmalıdır. Son çökeltim havuzu boyutlandırma kriterleri aşağıda özetlenmiştir.

- Yüzey yükü: < 0,6-0,7 m^3/m^2.sa
- Bekletme süresi: 2-4 sa
- Derinlik: 2,5-5 m
- Katı madde yükü: < 3-6 kg AKM/m^2.sa
- Arıtma sistemi tasarımında çeşitli modelleme çalışmaları da yapılmaktadır [3], [4].

Proses Kontrolü:

Aktif çamur proseslerinin kontrolü farklı işletme şartları altında yüksek arıtma verimlerine ulaşabilmek açısından önemlidir. Proses kontrolünde kullanılan temel faktörler aşağıda sıralanmaktadır.

- F/M oranı ve çamur yaşını belirlemek
- Havalandırma tankında istenen çözünmüş oksijen seviyesini sağlamak
- Çamur geri devrini düzenlemek
- Atık çamuru kontrol etmek

Daha önce yükleme kriterleri konusunda da bahsedildiği gibi; aktif çamur prosesinde kullanılan en önemli parametreler F/M oranı ve ortalama çamur yaşıdır. Havalandırma havuzundaki biyokütle konsantrasyonu da kontrol parametresi olarak kullanılmaktadır. Belirli bir askıda katı madde konsantrasyonunu sağlamak için çamur geri devrini, atılacak çamur içinde Θ_c'yi kontrol etmek önemlidir. Oksijen tüketim hızı da, aktif çamur sisteminin kontrolü ve izlenmesinde kullanılan önemli parametrelerden biridir.

(a) Çamur Yaşının Kontrolü

θ_c'nin biyolojik arıtmada kontrol parametresi olarak kullanım amacı; biyokütle büyüme hızını ve atıksu arıtma performansını kontrol etmek ve sistemden atılacak günlük çamur miktarını belirlemektir. Örneğin; θ_c'nin 10 gün olması durumunda, sistemden günlük atılması gereken çamur miktarı, sistemdeki toplam mikroorganizma miktarının %10'u kadar olacaktır.

(b) Çözünmüş Oksijen Kontrolü

Aktif çamur sistemi havalandırma tankındaki teorik oksijen miktarı; mikroorganizma faaliyetleri, organik maddenin oksidasyonu ve sistemi belirli bir çözünmüş oksijen konsantrasyonunda tutmak için gerekli olan oksijen miktarların toplamına eşittir. Oksijenin mikroorganizma büyümesini sınırladığı durumda, filamentli bakteriler baskın duruma geçerek, aktif çamurun kalitesini ve çökelebilme özelliğini azaltır. Pratik olarak, havalandırma tankında çözünmüş oksijen konsantrasyonu 1,5-4 mg/L aralığında tutulmalıdır. Ancak genel olarak 2 mg/L yeterli olmaktadır. 4 mg/L'nin üzerindeki değerler işletme şartlarını önemli ölçüde iyileştirmez. Ayrıca, havalandırma maliyetini ciddi seviyelerde arttırır.

(c) Çamur Geri Devrinin Kontrolü

Biyolojik sistemlerde çamur geri devrinin amacı, istenen arıtma derecesine ulaşabilmek için havalandırma tankında yeterli çamur konsantrasyonunu sağlayabilmektir. Ayrıca çıkış suyunda çamur kaçışını önlemek önemlidir. Katılar çökeltim tankının tabanında çamur örtüsü oluştururlar. Çamur örtüsünün kalınlığı zamana göre değişir. Çamur pompalama kapasitesinin yetersiz olması durumunda pik akışlarda tankın derinliği kadar kalınlığa ulaşabilir. Büyük sistemler için çamur pompalama kapasitesi atıksu debisinin %50 ile %100'ü aralığında değişmekte olup, küçük sistemler için ise bu değer atıksu debisinin %150'si civarındadır.

İstenen çamur geri devir hızının hesaplanmasında farklı teknikler kullanılabilmektedir. Buna göre kontrol stratejisi havalandırma tankında belirli bir askıda katı madde konsantrasyonu sağlamayı veya son çökeltim tankında çamur örtüsü derinliğini belirtilen düzeyde tutmayı esas almak olmalıdır. En sık kullanılan teknikler aşağıda sıralanmaktadır.

- Çökelebilme özelliği
- Çamurun seviye kontrolü
- Son çökeltim tankında kütle dengesi
- Havalandırma tankında kütle dengesi
- Çamur kalitesi

Son çökeltim ve havalandırma tankında kütle dengeleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Şekil 4.7. Çamur geri devir kontrolü için askıda katı madde kütle dengesi: (a) Çökeltim tankında kütle dengesi, (b) Havalandırma tankında kütle dengesi [1]

Çökeltim tankında çamur örtüsünün sabit kaldığı farz edilir ve çıkış suyunda katı madde konsantrasyonu ihmal edilirse, çökeltim tankında kütle dengesi Denklem (4.50) ve Denklem (4.51) ile ifade edilebilir.

Birikim = Giriş Akımı – Çıkış Akımı (4.50)

$$0 = X(Q + Q_r) - X_r Q_r + X_r Q_W^1 \quad (4.51)$$

X : havalandırma havuzundaki askıda katı madde konsantrasyonu (M/ L^3)
Q : giriş debisi (L^3/T)
Q_r : çamur geri devir debisi (L^3/T)
X_r : geri devir akımında askıda katı madde konsantrasyonu (M/ L^3)
Q_w^t : atık çamur debisi (L^3/T)

Çamur geri devir debisi Denklem (4.52) ile ifade edilir.

$$Q_r = \frac{XQ - X_r Q_W^1}{X_r - X} \quad (4.52)$$

Yüksek organik yüklemelerde bu yaklaşım yanlış olabilir. Havalandırma tankına katı madde, çamur geri devri ve ham atıksu beslemesi ile girer. Ancak girişteki katı madde konsantrasyonu ihmal edilirse, havalandırma tankı çevresinde kütle dengesi Denklem (4.53) ve Denklem (4.54)'te olduğu gibi ifade edilebilir.

Birikim = Giriş Akımı – Çıkış Akımı (4.53)

$$0 = X_r Q_r + X(Q + Q_r) \quad (4.54)$$

Q_r için Denklem (4.54) çözülürse; Denklem (4.55) elde edilir.

$$Q_r = Q\frac{X}{X_r - X} \tag{4.55}$$

(d) Çamur Atma Kontrolü

Sistem içinde belirli F/M oranını veya çamur yaşını saplayabilmek için oluşan fazla çamurun sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Tam karışımlı reaktörde, fazla çamurun sistemden atılması reaktörden veya geri devir hattından yapılabilir. En pratik yol, daha konsantre olduğu ve küçük hacimde çamur atmak gerektirdiği için çamur geri devir hattından çamurun uzaklaştırılmasıdır. Atık çamur ön çökeltim havuzuna, yoğunlaştırıcıya veya çürütücüye deşarj edilir.

Çamur atma debisini belirlemek için havalandırma tankı ve geri devir hattındaki katı madde konsantrasyonunun bilinmesi gerekmektedir.

Oluşan çamur miktarı Denklem (4.56) ile belirlenmektedir.

$$P_X = Y_{göz}Q(S_0 - S)(10^3\ g/kg)^{-1} \tag{4.56}$$

P_x : atılan fazla çamur miktarı (M/ T)
$Y_{göz}$: gözlenen verim (M/ M)

F/M oranı proses kontrolünde esas alınmış ise, geri devir hattından çamur uzaklaştırma debisi Denklem (4.57) kullanılarak hesaplanır.

$$P_x = Q_W X_r \tag{4.57}$$

P_x : atık çamur miktarı (M/ T)
Q_w : atık çamur debisi (L^3/T)
X_r : geri devir hattındaki katı madde konsantrasyonu (M/ L^3)

Bu durumda, çamur geri devir hattındaki katı madde konsantrasyonunun (X_r) bilinmesi gerekmektedir.

<u>Proses Verimliliği ve Stabilitesi:</u>

Proses kinetiklerinin sistem verimi ve atık stabilizasyonu üzerindeki etkisi bu bölümde detaylı olarak verilecektir. Net spesifik çoğalma hızı ($1/\theta_c$) ve spesifik substrat giderim hızı doğrudan birbirleriyle ilişkilidir. Her iki eşitliğin birleştirilmesi sonucunda Denklem (4.58) ve Denklem (4.59) elde edilir.

$$U = \frac{kS}{K_s + S} \tag{4.58}$$

$$S = \frac{UK_s}{k - U} \tag{4.59}$$

Organik atıklar için, verilen biyolojik ortam ve çevresel şartlar altında, kinetik katsayılar, Y, k, K_s ve k_d sabittir. Katsayıların verilen değerleri için, reaktör çıkış konsantrasyonu, θ_c veya U'nun doğrudan fonksiyonudur. Tam karışımlı ve geri devirli sistemlerde arıtma verimi ve çıkış akımındaki substrat konsantrasyonunun çamur yaşıyla değişimi daha önce Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, çıkış akımında substrat konsantrasyonu ve arıtma verimi doğrudan θ_c ile ilişkilidir.

Şekil 4.3 incelendiğinde; θ_c'nin belirli değerlerinde atık arıtımının olmadığı görülmektedir. θ_c'nin bu kritik değerine minimum çamur yaşı ($\theta_c{}^M$) denir. Fiziksel olarak $\theta_c{}^M$, çamurun

sistemden atılma hızının üreme hızından daha fazla olması anlamına gelmektedir. Minimum çamur yaşı Denklem (4.6) ve Denklem (4.37)'den türetilen Denklem (4.60) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\frac{1}{\theta_c^M} = Y\frac{kS_0}{K_s + S_0} - k_d \tag{4.60}$$

Atıksu arıtımında birçok durumda, S_o, K_s'den çok büyük olduğundan, Denklem (4.47) tekrar Denklem (4.61) olarak yazılabilir.

$$\frac{1}{\theta_c^M} \approx Yk - k_d \tag{4.61}$$

${\theta_c}^M$'yi hesaplamak için gereken tipik katsayılar Tablo 4.10'da verilmektedir.

Biyolojik arıtma sistemlerinin tasarımında θ_c ${\theta_c}^M$'ye eşit alınmaz. Genellikle tasarım ve işletme çalışmalarında θ_c ${\theta_c}^M$'nin 2 ile 20 katı arasında bir değer alınır. Gerçekte, θ_c'nin ${\theta_c}^M$'ye oranı proses emniyet katsayısı (SF) olarak kabul edilir (Denklem (4.62)).

$$SF = \frac{\theta_c}{\theta_c^M} \tag{4.62}$$

Tablo 4.10. Aktif çamur prosesi için tipik kinetik katsayılar [1]

Katsayılar	***Birim***	***Değerler***	
		Aralık	***Tipik***
k	*gün*$^{-1}$	*2-10*	*5*
K_S	*mg BOİ*$_5$*/L*	*25-100*	*60*
	mg KOİ/L	*15-70*	*40*
Y	*mg UAKM/mg BOİ*$_5$	*0,4-0,8*	*0,6*
	mg UAKM/mg KOİ	*0,25-0,4*	*0,4*
k_d	*gün*$^{-1}$	*0,04-0,075*	*0,06*

Aktif Çamur Prosesi Modifikasyonları:

Aktif çamur prosesi, aerobik biyolojik arıtma sistemleri arasında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu sistem 1912-1914 yıllarında geliştirilmiş ve karmaşık biyolojik mekanizması nedeni ile araştırmacıların diğer proseslere göre daha fazla ilgisini çekmiştir. Bu nedenle; aktif çamur prosesinin yıllar içerisinde birçok modifikasyonu geliştirilmiştir.

Aktif çamur sistemlerinin çeşitli konfigürasyonları Şekil 4.8'da verilmektedir. Karbon giderimi yapan farklı aktif çamur prosesleri için tasarım parametreleri Tablo 4.11'de verilmektedir. Sistem, birinci kademe arıtmada, ızgara, kum tutucu ve ön çökeltim ünitelerinden oluşmaktadır. Evsel atıksularda birinci kademe arıtma ile atıksudaki BOİ'nin %30-35'i giderilmektedir.

Ön çökeltimi takiben ikinci kademe arıtma başlamaktadır. İkinci kademe arıtma, biyolojik havalandırma prosesini içermektedir. Bu işlem sırasında çözünmüş organik madde, çökelebilen biyokütle haline dönüştürülür ve son çökeltim tankında çamur olarak tutulur. Daha önceden havalandırılmış olan bu çamura aktif çamur adı verilir. Aktif çamurun bir bölümü havalandırma tankına geri devrettirilir. Geride kalan kısmı ise çoğalan çamura karşı gelen çamur olup, sistemden dışarı atılarak birinci kademe arıtma sırasında ön çökeltimden çıkan çamurla karıştırılır. Karışık çamur daha sonra yoğunlaştırılır ve bunu takiben stabilizasyon sağlamak amacıyla çamur çürütücüye gönderilir. Aktif çamur prosesi ile %90'ın üzerinde BOİ giderim verimi sağlanır.

(a) Klasik (konvansiyonel) aktif çamur sistemi

(b) Piston akımlı aktif çamur sistemi

(c) Kademeli beslemeli aktif çamur sistemi

(d) Temas stabilizasyonlu aktif çamur sistemi

(d) Uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi

(e) Oksidasyon Hendeği

Şekil 4.8. Aktif çamur sistemlerinin çeşitli konfigürasyonları

Tablo 4.11. Aktif çamur prosesleri için tasarım parametreleri [1]

Proses Türü	*θ_c (gün)*	*F/M (kg BOİ/kg TAKM gün)*	*(kg BOİ/m^3.gün)*	*TAKM (mg/L)*	*V/ Q (saat)*	*Q_r/Q*
Klasik	*5-15*	*0,2-0,4*	*0,32-0,64*	*1500-3000*	*4-8*	*0,25-0,75*
Tam Karışımlı	*5-15*	*0,2-0,6*	*0,8-1,92*	*2500-4000*	*3-5*	*0,25-1*
Kademeli Besleme	*5-15*	*0,2-0,4*	*0,64-0,96*	*2000-3500*	*3-5*	*0,25-0,75*
Değiştirilmiş Havalandırmalı	*0,2-0,5*	*1,5-5,0*	*1,2-2,4*	*200-1000*	*1,5-3*	*0,05-0,25*
Temas Stabilizasyonu	*5-15*	*0,2-0,6*	*0,96-1,2*	*(1000-3000)[1] (4000-10000)[2]*	*(0,5-1)[1] (3-6)[2]*	*0,5-1,5*
Uz un Havalandırmalı	*20-30*	*0,05-0,15*	*0,16-0,4*	*3000-6000*	*18-36*	*0,5-1,5*
Yüksek-Hızlı Havalandırma	*5-10*	*0,4-1,5*	*1,6-16*	*4000-10000*	*2-4*	*1-5*
Kraus Prosesi	*5-15*	*0,3-0,8*	*0,64-1,6*	*2000-3000*	*4-8*	*0,5-1*
Saf Oksijenli	*3-10*	*0,25-1,0*	*1,6-3,2*	*2000-5000*	*1-3*	*0,25-0,5*
Oksidasyon Hendeği	*10-30*	*0,05-0,3*	*0,08-0,48*	*3000-6000*	*8-36*	*0,75-1,5*
AKR	*[3]*	*0,05-0,3*	*0,08-0,24*	*(1500-5000)*	*12-50*	*[3]*
Derin Şaft Reaktörü	*[4]*	*0,5-5*	*[4]*	*[4]*	*0,5-5*	*[4]*
Tek Kademeli Nitrifikasyon	*8-20*	*0,1-0,25*	*0,08-0,32*	*2000-3500*	*6-15*	*0,5-1,5*
İki Kademeli Nitrifikasyon	*15-100*	*0,05-0,2*	*0,05-0,144*	*2000-3500*	*3-6*	*0,5-2,0*

[1] Temas biriminde, [2] Temas stabilizasyon birimi, [3] Uygulanamaz. [4] Bilgi yok.

(a) Uzun Havalandırmalı Aktif Çamur Sistemleri

Uzun havalandırmalı aktif çamur prosesi, yaygın olarak kullanılan bir aktif çamur sistemidir. Klasik aktif çamur sistemlerinin değiştirilmiş bir şeklidir. Bu prosesin Avrupa'da Pasver tipi oksidasyon hendekleri ve Amerika'da paket tesisler şeklinde çeşitli uygulamaları vardır. Uzun havalandırmalı sistemlerde ön çökeltim havuzu ve çamur çürütücüler yoktur. Bu nedenle, bu tip tesislerin inşaatı ve işletmesi konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre çok daha kolaydır. Uzun havalandırmalı aktif çamur prosesinde; ham atıksu ızgara ve kum tutuculardan sonra doğrudan havalandırma havuzuna verilir (Şekil 4.9). Atıksu havalandırma havuzunda uzun süre kalır. Bu sistemin enerji tüketimi fazla olsa da, işletme kolaylıkları yüksek enerji bedelini dengelemektedir. Konvansiyonel aktif çamur sistemine göre bir diğer avantajı da %97-98 mertebesinde BOİ giderim verim kapasitesidir. Atıksu üçüncü kademe arıtımdan sonra tekrar kullanılacaksa, bu proses özellikle tercih edilen bir prosestir.

Şekil 4.9. Uzun havalandırmalı sistemin akım diyagramı

Bu sistemde, çamur yükü çok düşük tutulduğundan mikroorganizmalar, çoğalma eğrisinde ölme fazında faaliyet gösterirler. Uzun süreli bir havalandırma uygulandığı için çamur yaşı yüksek olup daha stabil bir çamur elde edilmektedir. Sistemde oluşan fazla çamur, doğrudan

çamur kurutma yataklarına veya mekanik su alma tesislerine verilebilir. Küçük (paket) arıtma sistemleri ve oksidasyon havuzları, uzun havalandırmalı aktif çamur sistemleri tarzında çalışmaktadır. Boyutlandırma kriterleri aşağıda sıralanmaktadır.

- F/M: 0,05 – 0,15 kg $BOİ_5$/kg UAKM.gün
- Hacimsel yükleme : <0,35 kg $BOİ_5/m^3$.gün
- Çamur konsantrasyonu : 3-6 g UAKM/L
- Bekleme süresi: yaklaşık olarak 24 saat (uzun havalandırma)
- Çamur yaşı: 20-30 gün
- O_2 gereksinimi: yaklaşık olarak 1,8 O_2/kg giderilen BOI_5
- Karıştırıcı gücü:
  - 30 ile 40W/m³ (türbin tipi yüzey havalandırıcıları için)
  - 3 ile 10 W/m³ (karıştırıcılar için)
  - 10-20 W/m³ (ince kabarcıklı havalandırma sistemleri için)

(b) Oksidasyon Hendeği

Oksidasyon hendekleri dairesel ya da oval şekilli hendekler olup mekanik yöntemlerle (rotor ya da yüzey havalandırıcı) havalandırılırlar. Izgaradan geçirilerek veya çökeltilerek katılardan arındırılmış atıksu, hendek içinde 0,3-0,4 m/s yatay hızla hareket ederken havalandırılmaktadır. Oksidasyon hendekleri, genellikle uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi özelliğindedir. Hendek çıkışında diğer biyolojik sistemlerde olduğu gibi, çökeltim tankı ile katıların (çamurun) çökelmesi sağlanmaktadır (Şekil 4.10). Düşük atıksu debileri (küçük ve orta nüfuslu yerleşimler) için uygun olup, diğer sistemlere kıyasla daha az teknoloji gerektiren ve fazla işletme becerisi gerektirmeyen sistemlerdir. Boyutlandırma kriterleri aşağıda sıralanmaktadır.

- Bekleme süresi: Yaklaşık olarak 24 saat
- Çamur yaşı: 20 gün
- Çamur konsantrasyonu: 2-5 g UAKM/L
- Yatay Akış hızı: 0,3-0,4 m/s

Şekil 4.10. Oksidasyon hendeği

(c) Ardışık Kesikli Reaktörler

Ardışık kesikli reaktörler (AKR), özellikle küçük ve orta nüfuslu yerleşim yerlerinde yaygın olarak kullanılan aktif çamur sistemleridir. Atıksu miktarına bağlı olarak ardışık kesikli reaktörlerde tek veya birden çok reaktör paralel olarak kullanılabilir. Ardışık kesikli reaktörler; doldurma, havalandırma/karıştırma, çökeltim, boşaltma ve dinlendirme fazlarından oluşmaktadır. Bu fazların sürelerinin toplamı çevrim süresini vermektedir. Fazların süreleri ayarlanarak organik karbon, biyolojik azot ve fosfor giderimi sağlanabilir. Doldurma/karıştırma ve havalandırma fazlarının (sürelerinin) farklı şekillerde uygulanması ile etkin organik karbon ve biyolojik nütrient giderimi sağlanabilmektedir. Örneğin, organik karbon kaynağı sağlamak için doldurma süresi havalandırma/karıştırma fazı boyunca sürdürülebilir. Fazlardan boş faz, paralel çalıştırılan AKR sistemlerinin faz sürelerinin ayarlanması ve fazla çamur atılması işlemleri için kullanılmaktadır.

AKR sistemlerinde reaktörün başlangıç ve doldurma hacmi arasındaki oran ayarlanarak nitrat geri devri yapılmış olur. Reaktörde havasız koşulların oluşabilmesi için nitratın olmaması gerekmektedir. Biyolojik fosfor giderimine yönelik olarak havasız koşulları sağlayacak işletme koşullarına (nitrat geri devrinin azaltılması, atıksudaki uçucu yağ asidi potansiyelinin kullanılması, uygun karıştırma süreleri vb.) ihtiyaç duyulmaktadır.

(d) Membran Biyoreaktörler

Membran biyoreaktörler (MBR), klasik aktif çamur sistemlerinin geliştirilmiş şekli olup, biyolojik reaktör ile membran teknolojisinin birleştirilmiş halidir. Biyolojik arıtmadan sonra, çökeltim havuzu yerine ultrafiltrasyon (UF) veya mikrofiltrasyon (MF) membranları kullanılarak, katı/sıvı ayırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Membran biyoreaktörlerde elde edilen süzüntü suyu, askıdaki katı maddeler, bakteri ve virüslerden arındırılmış, yeniden kullanılabilecek mertebede temiz sulardır. Membran biyoreaktörlerin iki değişik tertip tarzı vardır. Bunlardan birincisinde, ayrışma ve ayırma işlemi aynı tankta, ikincisinde ise ayrı tanklarda gerçekleşmektedir. Şekil 4.11(a)'da görüldüğü üzere, iki işlemin aynı tankta gerçekleştiği birleşik sistemde, plaka ve çerçeve veya boşluklu elyaf membranlar kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, süzüntü akımı vakum ile çekilmektedir. Ayrık sistemde, tübular, spiral sargılı veya boşluklu elyaf membranlar kullanılmaktadır. Biyolojik sistemden çıkan su bir pompa ile membranlara gönderilmektedir. Membranda akım ikiye ayrılmakta, süzüntü kısım uzaklaştırılmakta, konsantre akım ise biyolojik reaktöre geri devir ettirilmektedir (Şekil 4.11(b)). Evsel atıksuların arıtımında son yıllarda, birleşik sistem MBR sistemleri yaygın hale gelmiştir. Ayrık sistem ise daha çok endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılmaktadır.

Şekil 4.11. Membran biyoreaktörlerde uygulanan farklı tertip tarzları [1]

MBR'ler özellikle düşük debili otel ve tatil köyü gibi yerleşim yerleri için çok uygun sistemlerdir. Evsel atıksuların geri kazanılmasında yaygın kullanımı söz konusu olduğu gibi endüstriyel atıksuların arıtılmasında da birçok alanda kullanılmaktadır. Son zamanlarda büyük kapasiteli tesislerde de kullanılmaya başlanmıştır.

MBR'lerin en önemli özelliği, yüksek organik yükleme hızlarını (10 kg KOİ/m^3.gün'e kadar) karşılayabilmeleridir. Membranın tipine bağlı olarak, havalandırma havuzunda biyokütle miktarı 40000 mg/L mertebesine çıkabilmektedir. Bu nedenle, MBR'lerde havalandırma havuzunun hacmi ile oluşan çamur miktarı çok azalır. Biyokütleye dönüşüm oranı, klasik aktif çamur sistemlerinde 0,5 kg AKM/kg $KOİ_{giderilen}$ mertebesinde iken, MBR'lerde bu değer 0,05-0,2 kg AKM/kg $KOİ_{giderilen}$ civarındadır.

MBR prosesinin optimum şekilde tasarlanması oldukça komplekstir. Fakat membranlarda yüksek performans ve az miktarda çamur oluşumu gibi birçok avantajda göz önünde tutulmalıdır. MBR'lerin esas avantajı, yüksek biyokütle konsantrasyonunda sistemi çalıştırabilme imkanı sağlamasıdır. Bu nedenle, hacimsel yükü arttırmakta mümkündür.

Yüksek biyokütle konsantrasyonu da oksijen transferi ve çamur viskozitesini, dolayısıyla enerji masraflarını etkilemektedir.

Membran seçimini etkileyen en önemli faktör membranın akısıdır. Diğer önemli bir faktör de membranın maliyetidir. Atıksu tipine bağlı olarak, membran seçimi değişebilir. A rıtılacak atıksu geri kazanılacaksa, daha iyi kalitede su üreten membranlar seçilebilir. Ayrıca, membranların tıkanma eğilimi az olmalı (hidrofilik) ve kolay temizlenebilmelidir.

MBR sistemlerinin boyutlandırılmasında kullanılan en önemli parametre akıdır. Boyutlandırmada, boşluklu elyaf membranlar için akı değeri 10-25 L/m^2.sa (ortalama 13 L/m^2.sa), levha halindeki membranlar için ise 10-30 L/m^2.sa (ortalama 17 L/m^{2}sa) alınabilmektedir. Oksijen transfer katsayısı, biyokütle konsantrasyonu arttıkça azalmakta, enerji ihtiyacı ise artmaktadır. Enerji ihtiyacı olarak boşluklu elyaf membranlar için 0,7-1,0 kWsa/m^3, levha halindeki membranlar için ise 0,7-0,8 kWsa/m^3 değerleri alınabilmektedir. Enerji ihtiyacı, 15000 mg/L biyokütle konsantrasyonuna kadar sabit kalmakta, 15000 mg/L'nin üzerindeki biyokütle konsantrasyonlarında ise artmaktadır. MBR sistemlerinde gerekli membran alanını bulmak için akı değeri seçilmekte ve debi, seçilen bu akı değerine bölünmektedir.

MBR sistemlerinde, azot giderimi de yapılabilmektedir. Aerobik reaktör öncesinde, anoksik bölme ilave edilebilmektedir. Anoksik bölme olmasa dahi, aerobik reaktörde yüksek biyokütle konsantrasyonlarından dolayı belirli yerlerde anoksik bölmeler oluşabilmekte ve klasik aktif çamur sistemlerine göre daha yüksek azot giderim verimleri sağlanabilmektedir.

4.7.2. Yüzeyde Büyüyen (Biyofilm) Aerobik Sistemler

4.7.2.1.Damlatmalı Filtreler

Damlatmalı filtreler atıksuların, değişik dolgu malzemeleri üzerinde dağıtılarak aşağıya doğru süzdürülmeleri prensibi ile çalışmaktadır. Dolgu malzemesi üzerinde biyofilm tabakası oluşmakta ve mikroorganizma oksijen ihtiyacını havadan almaktadır. Bu birim, içinde 0,1-10 cm büyüklüğünde dolgu malzemesi (kırma taş, plastik, sert kömür, özel dolgu maddeleri vs.) bulunan bir tanktan oluşur. Filtre malzemesi derinliği, taş dolgu malzemeli filtrelerde 1,8-2,4 m, plastik dolgu malzemeli filtrelerde ise 3,0-12,2 m aralığında alınabilir.

Bu tanka üst kısımdan birinci kademe arıtmaya tabi tutulmuş atıksu belirli bir debi ile verilir. Bu işlem genellikle tankın merkezi etrafında yavaşça hareket eden delikli bir borudan oluşan düzenekle (atıksu dağıtım sistemi) sağlanır. Bu şekilde filtreye verilen atıksu filtre dolgu malzemesinin üzerinden süzülerek akmakta, bu arada, filtre yatağındaki boşlukların tamamı atıksu ile dolmadığından aerobik şartlar devam etmektedir. Atıksu filtre yatağından geçerken, dolgu malzemesi üzerinde bakteriler bir biyofilm tabakası oluşturmaktadır. Taşların üzerinde ince bir tabaka meydana getiren bakteriler atıksudaki organik kirleticileri önce adsorplamakta ve daha sonra biyolojik arıtma reaksiyonu meydana gelmektedir. Böylece, mikroorganizmaların dolgu malzemesi üzerinde bir tabaka halinde birikmeleri, organik maddelerle beslenmeleri ve hava geçişi ile oksijen transferi sağlamaları mümkün olmaktadır. Biyofilm tabakası zamanla kalınlaşmakta, oksijen ve organik maddeler tabakanın iç kısımlarına ulaşamamaktadır. Filtre dolgu maddesi yüzeyine yakın bu kesimde anaerobik şartlar oluşmakta, burada oluşan gazların yardımı ve sıvı hareketinden oluşan kesme kuvveti ile biyofilm dolgu malzemesinden ayrılıp çıkış suyu ile birlikte sistemden dışarı atılmaktadır. Temizlenmiş taşın üzerinde kısa bir zaman içerisinde yeniden biyofilm tabakası oluşmakta ve döngü bu şekilde devam etmektedir. Çıkış suyundaki biyofilm parçacıkları son çökeltim havuzlarında çökeltilerek sudan ayrılır. Çökeltim tankı çıkışından belirli oranda su damlatmalı filtreye, gerekli hidrolik yükü sağlamak üzere geri devrettirilir.

Damlatmalı filtrelerin boyutlandırılması; yüzeysel hidrolik yük (m^3/m^2.gün), hacimsel organik yükleme (kg $BOİ_5/m^3$.gün) ve geri devir oranı esas alınarak yapılır. Filtrenin yıkanmasını sağlamak ve minimum debilerde gerekli akışı sağlamak üzere geri devir düzenekleri teşkil edilmelidir. Damlatmalı filtreler, yüzeysel hidrolik yük; hacimsel ve organik yükün büyüklüğüne göre düşük, orta ve yüksek hızlı olmak üzere üç tipte olabilmektedir.

Tablo 4.12'de damlatmalı filtrelerle ilgili projelendirme kriterleri verilmektedir. Düşük hızlı filtrelerin işletilmeleri daha kolay olup, genellikle küçük nüfuslu yerleşim yerleri için kullanılırlar. Bu tip filtreler, taş ve çakıl gibi doğal malzemelerle kolayca yapılabilirler. Gerekli ekipman, sadece bir dozlama sifonu ve dağıtıcıdır. Filtre ortamı, 2-3 m derinliktedir. Filtre girişi ve çıkışı arasında 2,5-3,5 m'lik bir yük kaybı olur. Genellikle geri devirsiz olarak düzenlenirler. Bu nedenle bu tip filtrelerde pompa gerekmemektedir. Arazi ihtiyacı, 0,5-0,7 m^2/kişi arasında değişir. Uygulanan organik madde ve azot yükleme hızlarına bağlı olarak karbonlu organik madde giderimi ve nitrifikasyon sağlanabilir [5]. Yaz ve kış koşullarında optimum oksidasyonu sağlayacak havalandırma sistemi (havalandırma delikleri ve kanalları) teşkil edilmelidir.

Tablo 4.12. Evsel atıksuların damlatmalı filtrelerle arıtımında tasarım kriterleri [2]

Parametre	***Düşük Hızlı Filtreler***	***Yüksek Hızlı Filtreler (Taş Ortam)***	***Yüksek Hızlı Filtreler (Plastik Ortam)***	***Kaba Filtreler***
Hidrolik Yük (m^3/m^2.gün)	*1-4*	*10-30[1]*	*40-90[1]*	*60-180[1]*
Organik Yük (kg BOİ/m^2.gün)	*0,1-0,3*	*0,3-1,2[2]*	*1,2-3[2]*	*2-6[2]*
Geri Devir Oranı	*-*	*0,5-3*	*1-4*	*1-4*
Derinlik	*1,8-3*	*1-3*	*4-12*	*4-12*
Filtre Ortamı	*Taş, Çakıl*	*Taş, Çakıl*	*Plastik*	*Plastik*
BOİ Giderim Verimi (%)	*80-85*	*65-85*	*65-85*	*40-65*
Nitrifikasyon	*İyi*	*Sınırlı*	*Sınırlı*	*-*

[1] *geri devir dahil*
[2] *geri devir dahil değil*

Yüksek hızlı filtrelerde BOİ giderim verimi; BOİ yüklemesine ve geri devir oranına bağlı olarak %65-85 arasında değişir. Bu tip filtrelerdeki nitrifikasyon da, sisteme verilen BOİ yüküne bağlıdır. Taş dolgulu filtre derinliği, nitrifikasyon açısından önemlidir. Evsel atıksular için 2'nin üzerindeki geri devir oranları ekonomik olarak uygun değildir. Damlatmalı filtrelerin en büyük üstünlüğü; organik yükteki büyük değişimlerin arıtma verimini ciddi seviyelerde etkilememesidir. Arıtılmış çıkış suyunun belirli oranlarda geri devir ile tekrar sisteme verilmesi arıtma verimini arttırır. Damlatmalı filtre ve aktif çamur sistemlerinin karşılaştırması Tablo 4.13'te verilmektedir.

Tablo 4.13. Damlatmalı filtre ve aktif çamur sistemlerinin karşılaştırılması [6]

Parametre	***Damlatmalı Filtre***	***Aktif Çamur***
Yatırım Maliyeti	*Yüksek*	*Düşük*
İşletme Maliyeti	*Düşük*	*Yüksek*
Alan İhtiyacı	*Fazla*	*Az*
Havalandırma	*Yeterli olmayabilir*	*Yeterli*
Sıcaklık Kontrolü	*Zor*	*Kolay*
Şok Yüklemelere Duyarlılık	*Az duyarlı*	*Çok duyarlı*
Çıkış Suyu Kalitesi	*Yüksek*	*Düşük*
BOİ Giderimi (%)	*80-90*	*80-90*
Hidrolik Bekletme Süresi		
Düşük Hız	*6-40 saat*	*4-10 saat*
Yüksek Hız	*0,5-4 saat*	
Koku	*Fazla*	*Az*

Kırma Taş Dolgulu Damlatmalı Filtreler:

Damlatmalı filtre kesiti Şekil 4.12'te verilmektedir. Sistemin başlıca bileşenleri, döner dağıtıcı, drenaj sistemi ve filtre malzemesidir. Atıksu, bir pompa ile dağıtıcının bağlı bulunduğu düşey boruya gönderilir. Dağıtıcıyı oluşturan borular üzerinde açılmış deliklerden çıkan su jetleri, impuls teoreminden doğan reaksiyon kuvvetleriyle, dağıtıcının dönmesini sağlar. Bu şekilde atıksu kırma taş üzerine eşit olarak dağılmış olur. Çıkış kanalı ve havalandırma bacaları, filtre içinde iyi bir hava akımı meydana getirecek şekilde oluşturulur (Şekil 4.13). Filtreden çıkan su biyolojik verimi arttırmak için geri devrettirilerek tekrar filtreden geçirilebilir.

Şekil 4.12. Damlatmalı filtre kesiti [7]

Şekil 4.13. Damlatmalı filtre kesiti ve tabandaki drenaj sisteminin detayları [7]

Filtre malzemesinin; dayanıklı, suda erimez ve ufalanamaz cinsten olması gereklidir. Bu nedenle; en çok kırma taş ve benzeri malzemeler kullanılır. Tercih edilen tane çapı 10 cm'dir. Daha küçük çaplı taşlar, biyofilm oluşumu için daha büyük bir yüzey alanı sağlasa da, taneler

arasındaki boşluklar tıkanma eğilimini arttırır ve hava ve su geçişini sınırlandırır. Filtre yüksekliği 1,5 m ile 2,1 m arasında değişir. Filtrenin daha yüksek yapılması durumda BOİ giderim veriminde düşük seviyelerde artış gözlenir [7]. Tipik bir damlatmalı filtre sistemi akım diyagramı Şekil 4.14'te verilmektedir.

Şekil 4.14. Damlatmalı filtre sisteminin akım diyagramı

Sentetik Dolgulu Damlatmalı Filtreler (Biyolojik Kuleler):

Son yıllarda damlatmalı filtreler için farklı sentetik dolgu malzemeleri üretilmiştir. Kırma taşa göre bu malzemelerin esas üstünlüğü, özgül yüzeylerinin fazla olmasıdır. Böylece oksijen sağlayan hava boşlukları tıkanmadan, daha fazla miktarda biyofilm üreyebilmektedir. Diğer üstünlükleri ise; suyun daha iyi dağılmasını sağlayan üniform bir filtre ortamı oluşturmaları, hafif olmaları nedeniyle daha büyük bir kimyasal dirence sahip olmaları ve yüksek organik madde içeriği olan ve çökelmemiş atıksuları arıtabilmeleridir. Plastik filtre blokları, *Flocor* gibi bazı ticari isimler altında piyasada satılmaktadır. (Şekil 4.15). Bunlar 0,6 m genişlik ve kalınlıkta, 1,2 m uzunlukta modüller halinde olup, oluklu levhaların yan yana getirilmesinden meydana gelmektedir. Özgül yüzey alanı 29 m^2/m^3'tür.

Çürümeye karşı dayanıklı kızılçamdan yapılmış filtre malzemeleri de bulunmaktadır. Bu tip filtre malzemeleri kızılçam çıtalarının yatay olarak 1,2∗1,2 m^2'lik çerçeveler haline getirilmesinden meydana gelmiştir (Şekil 4.15). Kızılçamdan yapılmış bu filtre malzemesinin özgül yüzey alanı 14 m^2/m^3'tür. Plastik paketlerin oluklu yüzeyleri ve kızılçamın pürüzlü yüzeyleri, biyolojik filmin tutulmasını kolaylaştırır.

Şekil 4.15. Biyolojik kulelerin dolgu malzemeleri: Polivinilklorürden yapılmış *Flocor* paketleri; *Del-Pak* dolgu malzemesi [7]

Şekil 4.16'de modüllerin toplu şekli ve sabit ağızlıktan suyun filtre üzerine dağıtılma şekli gösterilmektedir. Sentetik malzemeli filtrelerin yapılmasıyla, endüstriyel ve evsel atıksuların arıtılmasında biyolojik filtrasyonun uygulama alanı genişlemiştir. Genel olarak kırma taş filtreler gıda endüstrisinden gelen çok konsantre atıksuların arıtımı için uygun değildir. Ancak çok kademeli biyolojik kuleler bu atıksular için kullanılabilmektedir.

Şekil 4.17'deki akım diyagramları, biyolojik kulelerin atıksu arıtımdaki uygulama alanlarını göstermektedir. Mevcut sistemlerde işletme kolaylığı sağlamak veya arıtma verimini arttırmak için kırma taş malzemeyi sentetik malzeme ile değiştirmek mümkündür. Ancak döner dağıtıcısı olan bu sistemler, 1,5 m ile 2 m gibi küçük yatak derinliklerine sahip olduklarından optimum sonuç elde edilemez. Yükseklik 6 m ve daha fazla ise daha iyi sonuçlar elde edilir. Biyolojik kuleler, daha fazla temas süresine olanak verir ve atıksu döner dağıtıcılar yerine sabit dağıtıcılar yardımıyla sürekli olarak sisteme beslenir. Özel durumlarda, mevcut arıtma sistemlerinde, ön çökeltimden önce biyolojik bir kule inşa edilebilir. Organik yük aralığı 400-2400 g/m^{3}gün'dür. Hidrolik yük 10 m^3/m^{2}gün değerine kadar çıkabilir. Sentetik malzemeli biyolojik kuleler, işletme güçlükleri ve koku problemine karşı kırma taş filtrelere göre daha az sorun çıkarırlar.

Şekil 4.16. Dikdörtgen şeklindeki biyolojik kulenin kesiti ve sabit dağıtıcılardan filtreye su verilmesi [7]

Şekil 4.17. Biyolojik kulelerin çeşitli uygulama alanlarını gösteren akım diyagramları: (a) Mevcut filtrelerde taş malzeme yerine plastik malzeme kullanılması durumu; (b) Yüksek hızlı bir damlatmalı filtre olarak biyolojik kule kullanılması durumu; (c) Aktifleştirilmiş bir biyolojik filtrasyon sistemi: Son çökeltim havuzundan aktif çamur geri devri olması durumu; (d) Ani yük değişimlerine karşı havalandırma ile desteklenerek aktifleştirilmiş filtre kullanılması durumu [7]

4.7.2.2.Döner Biyodisk

Döner biyolojik disk (biyodisk) sistemleri, mikroorganizmaların üzerinde üremesi için uygun bir yüzeyi sağlayacak şekilde yapılmış, gelen atıksuyun muhtemel korozif özelliğinden etkilenmeyecek plastik malzemelerin diskler halinde, döner bir şaft (mil) üzerine paralel olarak yerleştirildiği veya içi dolgu malzemesi ile dolu delikli tambur şeklindeki silindirik bir yapıdan oluşmaktadır. Döner biyodiskler daha çok küçük yerleşim merkezlerinde evsel atıksuların arıtımında kullanılmakla beraber, bazı durumlarda düşük devirli endüstriyel atıksularda BOİ giderimi için de kullanılabilir. Diskler bir şaft üzerine birbirine paralel olarak yerleştirilir ve şaft bir motor yardımı ile döndürülür. Bu sistemler plastikten yapılan 2-3 m çapında ve 2-3 cm kalınlığında disklerden oluşur. Şaftın her 1 metresine 2 cm aralıklarla 20-30 adet disk yerleştirilebilir ve uzunluk 6 m'ye kadar çıkabilir. Mikroorganizmalar oksijen gereksinimini diskin dönüşü sırasında hava ile temas ederek sağlar (Şekil 4.18). Atıksu, uzun ve sığ tankların içine konur ve diskler atıksu içinde %40-50 oranında batık şekilde döndürülür (2-10

devir/dakika). Mikroorganizmalar disk üzerinde biyofilm oluşturacak şekilde büyürler. Atıksudaki organik bileşikler biyofilm içine damlatmalı filtrelerde olduğu gibi adsorplanır ve biyolojik reaksiyon meydana gelir. Kalın biyofilmler substrat difüzyon limitlerine yol açtığı için, çok ince biyofilmler ise daha az etkin oldukları için tercih edilmezler. Sistem için önerilen optimum biyofilm kalınlığı 2-3 mm'dir. Dolgulu tambur tiplerinde ise istenilen toplam dolgu malzemesi yüzeyi sağlanacak şekilde boyutlandırma yapılmaktadır. Döner disk veya tambur şaftlarının her biri ayrı bir silindir haznesine (kanala) %45'i su içinde batık olacak şekilde monte edilir. Tablo 4.14'te tipik tasarım kriterleri verilmektedir.

Döner biyodisklerin enerji gereksinimi 3 m'lik diskler için 75 W/m (30 adet∗3 m), 2 m'lik diskler için ise 50 W/m (35 adet ∗2 m)'dir. Çıkış suyunda BOİ konsantrasyonu istenilen seviyede değil ise geri devir uygulanabilir. Arıtma sonucu yaklaşık olarak 0,8-1,2 kg çamur/kg BOİ oluşur.

Şekil 4.18. Biyodisk

Tablo 4.14. Döner biyodisk için tipik tasarım kriterleri [1]

Parametre	***Arıtma Seviyesi***		
	İkinci Kademe	***Nitrifikasyon ile birlikte***	***Ayrı Nitrifikasyon***
Hidrolik Yük (m^3/m^2g)	*0,08-0,16*	*0,03-0,08*	*0,04-0,1*
Organik Yük			
kg ÇBOİ$_5$/m^2g[1]	*0,004-0,01*	*0,002-0,007*	*0,0005-0,0015*
kg TBOİ$_5$/m^2g[2]	*0,01-0,017*	*0,007-0,015*	*0,001-0,003*
Birinci Adımda Maksimum Yükleme			
kg ÇBOİ$_5$/m^2g[1]	*0,02-0,03*	*0,02-0,03*	*-*
kg TBOİ$_5$/m^2g[2]	*0,04-0,06*	*0,04-0,06*	*-*
NH_3 Yükü	*-*	*0,0007-0,0015*	*0,001-0,002*
Hidrolik Bekletme Süresi, θ (saat)	*0,7-1,5*	*1,5-4*	*1,2-2,9*
Çıkış BOİ$_5$ Konsantrasyonu (mg/L)	*15-30*	*7-15*	*7-15*
Çıkış NH_3 Konsantrasyonu (mg/L)	*-*	*<2*	*1-2*

[1] *ÇBOİ$_5$= Çözünmüş BOİ$_5$*
[2] *TBOİ$_5$= Toplam BOİ$_5$*

Disk boyutlandırmasında ilk adım, istenen seviyede biyofilm çoğalması için gerekli yüzey alanının belirlenmesidir. Biyofilm gelişme oranı, istenen BOİ giderimine bağlıdır. Tablo 4.15'te günde birim disk yüzey alanına verilebilecek BOİ yükleri gösterilmektedir.

Tablo 4.15. Dünyadaki bazı döner biyodisk tesisleri ile ilgili bilgiler [2]

Ülke	*Tesis*	*Uygulanan BOİ Yükü ($g/m^2gün$)*	*Açıklama*
İngiltere	*Tam ölçekli*	*6*	*Çıkış BOİ 20 mg/L[1] Nitrifikasyon var.*
	Pilot	*8*	*Yüksek nitrifikasyon (17-23 ° C)*
Almanya	*Tam ölçekli*	*6-10* *12-18*	*<%90 BOİ Giderimi[2]*
Hindistan	*Tam ölçekli (günde 10 saat)*	*25*	*%85-89 BOİ Giderimi (<23 ºC)*
Amerika	*Tam ölçekli*	*20*	*%85-94 BOİ Giderimi*

[1] *Yılın %95'inde elde edilen değer*
[2] *Biraz düşük verimle büyük tesislerdeki yükler uygulanabilir*

4.7.2.3.Akışkan Yataklı Reaktör

Damlatmalı filtrelerde karşılaşılan ve heterojen yapıdan kaynaklanan kontrol parametrelerini (sıcaklık, pH, ÇO, besi maddesi konsantrasyonu) ortadan kaldırmak için akışkan yataklı biyofilm reaktörler geliştirilmiştir. Bu tip reaktörlerde mikroorganizmalar destek parçacıkları içinde veya üzerinde film halinde tutulur ve atıksu biyoreaktöre alt kısımdan belirli bir akış hızıyla verilerek üstten alınır. Atıksu debisi, biyo-parçacıkları su içerisinde askıda tutacak şekilde ayarlanır (Büyük oranda su geri devri yapılır.). Katı parçacıklar; kum, antrasit, aktif karbon, plastik, seramik veya tel örgü parçacıkları olabilir. Atıksu BOİ giderimini arttırabilmek ve akışkanlığı sağlayabilmek için çok yüksek oranda geri devir ile biyoreaktöre verilebilir. Sistem tercihen sürekli çalıştırılır.

4.7.3. Askıda ve Yüzeyde Büyüyen Ardışık Sistemler

Yukarıda bahsedilen arıtma metotlarının kombinasyonlarını yapmak suretiyle çok sayıda akım şeması oluşturmak mümkündür. Özellikle mevcut arıtma tesislerinin geliştirilmesi ile biyolojik azot ve fosfor giderimi sağlayan tesisler haline dönüştürülmeleri mümkündür. Böylece tek başına yeterli arıtmayı sağlayamayan aktif çamur veya damlatmalı filtre sistemlerinde yeni konfigürasyonlar bir arada kullanılarak uygun arıtılmış su kalitesini sağlamak mümkün olabilmektedir.

4.8. Anoksik Prosesler

Heterotrofik (fakültatif) bakteriler oksijensiz ortamda ayrışabilen organik maddeyi ve bağlı oksijeni (nitrat, nitrit vb.) kullanarak organik madde oksidasyonunu gerçekleştirmektedir. Denitrifikasyon prosesi yardımıyla anoksik koşullarda nitratın azot gazına dönüştürülmesi sonucu azot giderimi gerçekleştirilmektedir. Bu kitapta denitrifikasyon Bölüm 6'da detaylı olarak açıklanacaktır.

Anoksik koşullar askıda veya yüzeyde büyüyen sistemler ile sağlanabilir. Ancak, denitrifikasyon veriminin yüksek olması, proses stabilitesi ve kontrolünün kolaylığı açısından askıda çoğalan sistemlerde kolaylıkla sağlanmaktadır. Denitrifikasyon prosesinin verimi anoksik reaktöre giren organik madde miktarı, aerobik ünitelerden geri devrettirilen nitrat miktarı ve ortamdaki çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlıdır.

4.8.1. Askıda Büyüyen Sistemlerde Denitrifikasyon

Askıda çoğalan sistemlerde denitrifikasyon, aktif çamur sistemlerinde oksijenin olmadığı havalı tanklardan geri devrettirilen nitrat yardımıyla anoksik havuzlarda gerçekleştirilir. Nitratın yanında bakteriler için gerekli organik karbon kaynağı sağlanmalıdır. Gerekli organik madde ham atıksudaki organik maddeden veya dışsal karbon kaynağından sağlanır. Biyolojik

azot giderimi için tasarlanan aktif çamur sistemlerinde ön çökeltim tanklarının verimi, organik maddenin denitrifikasyon prosesi için yeterliliği açısından kontrol edilmelidir. Denitrifikasyon hacminden önce nitrifikasyonun sağlandığı aerobik reaktör hacmi belirlenmeli ve bunu takiben arıtılmış suda deşarj edilen toplam azot konsantrasyonunu sağlayacak anoksik hacim oranına göre denitrifikasyon hacmi (V_D) seçilmelidir. Anoksik reaktörlerin boyutlandırılmasında anoksik hacim oranının, V_D/V (anoksik reaktör hacminin toplam reaktör hacmine oranı), %50 değerini aşması istenmemektedir. Nitrifikasyon prosesinde kaybedilen alkalinite denitrifikasyon ile geri kazanılmaktadır. 1,0 gram nitrat azotunun (NO_3-N) azot gazına çevrilmesinde 3,56 gram $CaCO_3$ alkalinitesi oluşmaktadır.

4.8.2. Yüzeyde Büyüyen Sistemlerde Denitrifikasyon

Yüzeyde büyüyen sistemlerde denitrifikasyon, içerisinde taş veya plastik dolgu malzemesi bulunan bir ortamda gerçekleştirilir. Dolgulu yatakta tıkanmaların engellenebilmesi için periyodik olarak geri yıkama gerekli olabilir. Askıda büyüyen sistemlerde gerçekleşen denitrifikasyonda olduğu gibi, bu işlemde de dış karbon kaynağı genellikle gereklidir. Günümüzde özellikle büyük sistemler için yüzeyde büyüyen sistemlerde etkin denitrifikasyon sağlamak oldukça zordur.

4.9. Anaerobik Prosesler

Anaerobik arıtma, organik atıkların oksijensiz ortamda biyolojik süreçlerle ayrıştırılarak metan (CH_4) ve karbondioksite (CO_2) dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu kitapta anaerobik prosesler "Atıksuların Havasız Arıtımı" bölümünde detaylı olarak açıklanacaktır.

Çoğunlukla arıtma çamurları ve yüksek konsantrasyonda organik madde içeren endüstriyel atıksular için uygulanan bu arıtma sistemi son yıllarda kentsel atıksuların arıtılmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Oluşan biyolojik çamur miktarının düşük olması, havalı sistemlere göre daha az alan kaplaması, biyoenerji eldesine imkan vermesi, mekanik ekipman maliyetinin düşük olması ve reaktörlerin beslenmediği durumlarda mikrobiyal aktivitenin uzun süre korunabilmesi anaerobik arıtma sistemlerinin üstün taraflarıdır. Ancak bu arıtma sistemleri ile tek başına alıcı ortama deşarj kriterlerinin sağlanması mümkün değildir. Bu nedenle anaerobik ve aerobik arıtmanın birlikte uygulanması daha uygundur.

Anaerobik arıtmayı gerçekleştiren mikroorganizma topluluğunun kapasitesinden yüksek oranda yararlanabilmek için reaktörde uygun çevre şartlarının sağlanması gereklidir. Bu çevre faktörlerinden en önemlisi sıcaklıktır. Anaerobik sistemler üç farklı sıcaklık sınıfına göre işletilebilir. Bunlar sakrofilik (<20°C), mezofilik (25-40°C) ve termofilik (>45°C)'tir. Anaerobik arıtma özellikle mevsimlik arıtmanın söz konusu olduğu turistik bölgelerde büyük bir potansiyele sahiptir.

Reaktörler genellikle silindirik veya yumurta kesitli olarak tasarlanır. Reaktör tipi anaerobik sistemlerde, atıksu reaktör tabanından beslenerek yukarı doğru akış sağlanır. Mikroorganizmalar reaktör tipine bağlı olarak askıda veya yüzeyde çoğalırlar. Kentsel atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan havasız arıtma tipleri anaerobik filtre ve anaerobik çamur yatağıdır. Konu ile ilgili daha geniş bilgi Bölüm 8'de verilmiştir.

4.10. Basit (Doğal) Arıtma Sistemleri

4.10.1. Havalandırmalı Lagünler

Havalandırmalı lagünler, 2,5-5 metre derinliğinde toprak yapılar olup, havalandırma dubalar veya sabit kolonlar üzerine yerleştirilen mekanik havalandırıcılar aracılığıyla yapılır. Bu havuzlar, stabilizasyon havuzlarına göre daha kısa bekletme sürelerinde işletilmekte ve daha derin tasarlanmaktadır. Bu nedenle, stabilizasyon havuzları ile karşılaştırıldığında %10-20 daha küçük hacimlere sahiptirler. Mekanik ekipman olarak, yüzeysel havalandırıcılara ihtiyaç vardır.

Havalandırmalı lagünlerin tasarımı oldukça esnektir. Bu tip lagünler basit fakültatif tipte veya çamur geri devrinin yapıldığı daha verimli ve yoğun üniteler olarak projelendirilebilirler. Her durumda inşaatları ve işletilmeleri oldukça kolaydır. Bu nedenle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaygın kullanım alanına sahiptirler.

Havalandırmalı lagünler evsel ve endüstriyel atıksuların (kağıt, gıda, petro-kimya vd.) arıtımında kullanılmaktadırlar. Havalandırmalı lagünler başlıca üç tipe ayrılırlar.

- Fakültatif
- Sürekli beslemeli havalı
- Çamur geri devirli havalı

Her üç tip havalandırmalı lagünde de biyolojik arıtma prensipleri aynıdır. Tasarım kriterleri Tablo 4.16'da verilmektedir.

Havalandırmalı lagünün esas fonksiyonu atık dönüşümüdür. Havalandırmalı lagünlerin tasarımında dikkat edilmesi gereken faktörler aşağıda sıralanmaktadır.

- BOİ giderim verimi
- Çıkış suyu özellikleri
- Oksijen ihtiyacı
- Sıcaklık etkisi
- Karıştırma için gerekli olan enerji
- Katı ayırma (çökeltim)

Havalandırmalı lagünler, tam karışımlı geri devirsiz havalandırmalı lagün olarak kabul edildiğinde, tasarımın temelini çamur yaşı oluşturur. Ortalama çamur yaşının hesaplanmasında dikkat edilecek hususlar aşağıda sıralanmaktadır.

- Mikroorganizmaların çökeltim ile kolay giderilebilmesi için flok şeklinde olması
- Ortalama çamur yaşı ile karşılaştırıldığında uygun bir emniyet katsayısının seçilmesi

Evsel atıksuyun arıtımında kullanılan havalandırmalı lagünlerde tipik çamur yaşı 3-6 gün arasında değişmektedir.

Havalandırmalı lagün çıkış suyunda önemli parametreler BOİ ve AKM konsantrasyonudur. Hidrolik bekletme süresine bağlı olarak, havalandırmalı lagünden çıkan BOİ konsantrasyonunun 1/3'ü ile yarısı biyokütle kaynaklı BOİ'dir. Çıkış suyundaki BOİ ve AKM konsantrasyonları bazen düşük miktarda alg de içerir. Bu katıların çoğu deşarjdan önce çöktürülerek ortamdan uzaklaştırılır.

Oksijen ihtiyacı aktif çamur tasarımında kullanılan yöntemlere göre belirlenmektedir. İhtiyaç duyulan oksijen miktarı, giderilen BOİ'nin 0,7 ile 1,4 katı olarak alınmaktadır.

Havalandırmalı lagünler farklı iklim şartları ve sıcaklık değişimlerinde işletilecekleri düşünülerek tasarlanırlar. Burada sıcaklık değişiminin iki önemli etkisi bulunmaktadır.

- Biyolojik aktiviteyi azaltması ve arıtma verimini düşürmesi
- Buz oluşumu

Buzlanma probleminin olduğu durumlarda lagün işletmesine olan olumsuz etki, lagünün derinliği arttırılarak veya işletme metodu değiştirilerek minimuma indirilebilir.

Birden fazla havalandırmalı lagünün olması durumunda ılıman iklimlerde lagünler paralel, kışın ise seri olarak işletilebilirler. Düşük sıcaklıklarda havuzdaki havalandırıcılar durdurulur ve lagün yüzeyinin donmasına izin verilir. Baharda ise yüzeydeki buzun erimesi ile paralel

olarak işletme şartlarına sistem tekrar alıştırılır. Bu çalıştırma şekli ile soğuk kış aylarında bile %60-70 BOİ giderim verimi sağlanabilir.

Bu havuzların boyutlandırılmasında, uygun bekletme süresi seçilerek hacim hesaplanır. Seçilen mekanik havalandırıcı için uygun su derinliği seçilerek boyutlar ve bu boyutlara göre dispersiyon katsayısı belirlenir. Dispersiyon sayısı için dispersiyon katsayısı bilinmelidir. Havuz şekline ve akıma göre dikdörtgen havuzlar için dispersiyon sayısı, D, (16,7-33)B arasında alınabilir. Havuz sıcaklığı hesaplanır ve bu sıcaklıktaki K_L değeri bulunarak, Wehner-Wilhelm denkleminden veya bu denklemin kullanılmasıyla elde edilen tablo veya grafikten çıkış konsantrasyonu belirlenir. Havalandırmalı lagünlerde havalandırıcı gücü, fakültatif olanlarda havuz hacmi başına 1,0-1,2 W/m^3 ve havalı olanlarda ise 2,75 W/m^3'ten büyük alınarak hesaplanır. Giderilen BOİ$_5$ başına havalandırıcı gücü ise 1,8-2 kW'dir. Kişi başına gerekli yüzey alanı, 1,5 ile 3 m² arasında alınabilir ve iki kademeden oluşabilir. Birincisi, havalandırma, ikincisi ise çökeltim havuzudur. Birinci havuzdaki hacim ihtiyacı, kişi başına 3 m^3 ve havuz derinliği, 2,5-3 m olabilir. Çökeltim havuzunda ise hacim ihtiyacı kişi başına 0,3-0,5 m^3 aralığındadır.

Tablo 4.16. Evsel atıksuların arıtımında kullanılan havalandırmalı lagünlerin tasarım kriterleri [2]

Özellik	***Fakültatif***	***Sürekli Beslemeli Havalı***	***Çamur Geri Devirli Havalı***
Katı Madde Kontrolü	*Yoktur (Bir kısmı çöker, diğer kısmı arıtılmış su ile çıkar.)*	*Kısmen (Katılar çökmez, arıtılmış su ile çıkar.)*	*Tam kontrol (Fazla çamur kontrollü olarak sistemden çekilir.)*
Lagündeki AKM Konsantrasyonu	*50-150*	*100-350*	*3000-5000*
UAKM/AKM (%)	*50-80*	*70-80*	*50-80*
Çamur Yaşı, θ_c (gün)	*Yüksek*	*Genellikle 5*	*Sıcak iklim: 10-20* *Ilıman iklim: 20-30* *Soğuk iklim: >30*
BOİ Giderim Hızı (20ºC'de günlük, filtrelenmiş) (kg/m^{3}gün)	*0,6-0,8*	*1-1,5*	*20-30*
Sıcaklık Katsayısı	*1,035*	*1,035*	*1.01-1.05*
Hidrolik Bekletme Süresi (gün)	*3-12*	*Genellikle 5*	*0,5-2*
BOİ Giderim Verimi (%)	*70-90*	*50-60*	*95-98*
Nitrifikasyon	*Yok*	*Uygunsuz şartlar*	*Az*
Koliform Giderim Verimi (%)	*60-99[1]*	*60-90*	*60-90*
Lagün Derinliği[2](m)	*2,5-5*	*2,5-5*	*2,5-5*
Arazi İhtiyacı (m^2/kişi)			
Sıcak İklim	*0,3-0,4*	*0,3-0,4*	*0,15-0,25[3]*
Ilıman İklim	*0,45-0,9*	*0,35-0,7*	*0,25-0,55[3]*
Güç İhtiyacı			
(kW/kişi yıl)	*12-15[4]*	*12-14*	*18-24[5]*
(hp/1000)	*2-2,5[4]*	*2-2,5*	*3-5*
Minimum Güç (kW/10^3 m^3 lagün hacmi)	*0,75-1* *(Eşit O_2 dağıtımı)*	*2,75-5* *(Katıları askıda tutmak)*	*15-18* *(Katıları askıda tutmak)*
Çamur	*Birikir ve birkaç yıl sonra uzaklaştırılır*	*Birikim olmaz. Katı maddeler arıtılmış su ile çıkar.*	*Fazla çamur günlük olarak uzaklaştırılır.*
Çıkış Yapısı	*Arıtılmış su savakla dışarı verilir.*	*Kısmi veya tam boru kullanılır.*	*Savak veya boru kullanılır.*

[1] İki veya daha fazla ünitenin seri bağlanması durumunda yüksek verim elde edilebilir. [2] Kullanılacak havalandırıcıya uygun seçilmelidir. [3] Çamur kurutma dahil. [4] Anaerobik gaz üretiminden yararlanılırsa enerji ihtiyacı azalabilir. [5] Nitrifikasyona bağlı

4.10.1.1. Fakültatif Havalandırmalı Lagünler

Fakültatif havalandırmalı lagünlerde; birim hacim başına düşen enerji yoğunluğu, gerekli oksijen miktarının suya verilmesi için yeterlidir. Fakat bu enerji girdisi, bütün katıları askıda tutmak için yeterli değildir. Bunun sonucunda, lagüne giren askıda katı maddelerin bir kısmı ve substrat giderimi sonucunda oluşan katı maddeler tabana çökerler ve tabanda anaerobik ayrışma meydana gelir (Şekil 4.19). Lagündeki aktivite kısmen aerobik, kısmen de anaerobik olduğundan bu tip lagünlere fakültatif havalandırmalı lagün denir. Ancak bazen kısaltılarak havalandırmalı lagünler olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu tip lagünler, evsel atıksularda %70-90 oranında BOİ giderim verimi sağlarlar.

Şekil 4.19. Mekanik havalandırmalı fakültatif lagün [2]

4.10.1.2. Sürekli Beslemeli Havalı Lagünler

Sürekli beslemeli havalı lagünlerde enerji yoğunluğu, sadece istenilen miktardaki oksijeni su içerisine verecek seviyede değil, aynı zamanda aktif çamur sistemlerinde olduğu gibi bütün katı maddeleri askıda tutacak seviyede olmalıdır. Bu nedenle, bu tip lagünlerde askıda katı madde çökelmesi olmaz (Şekil 4.20). Arıtma verimi çok yüksek değildir. Çıkış suyunda yüksek miktarda askıda katı madde bulunduğundan, verim yaklaşık %50-60 seviyesindedir. Daha yüksek BOİ ve katı madde giderim verimi istenilirse ilave arıtma gerekebilir.

Şekil 4.20. Sürekli beslemeli mekanik havalandırmalı lagün [2]

4.10.1.3. Çamur Geri Devirli Havalı Lagünler

Çamur geri devirli havalı lagünler uzun havalandırmalı sistemlere benzerler. Enerji girdisi oksijen ihtiyacını karşılayacak ve bütün katıları askıda tutacak yeterlilikte olmalıdır. Bu tip lagünlerde çamur geri devrinden dolayı katı madde konsantrasyonu da oldukça yüksektir. İşletmeyi kolaylaştırmak için, lagün içerisinde bir çökeltim bölgesi oluşturulabilir veya alternatif kullanım amacıyla iki paralel bölüm yapılabilir. BOİ giderim verimi yüksek olup, %95-98 aralığındadır. Sistemde aynı zamanda nitrifikasyon da gerçekleşmektedir.

4.10.2. Stabilizasyon Havuzları

Stabilizasyon havuzları, en basit ve işletilmesi kolay arıtma sistemleridir. Bu havuzlarda, enerji ve mekanik teçhizata ihtiyaç yoktur. Ayrıca yetişmiş işletme elemanına da ihtiyaç duyulmaz. Bu sistemde atıksular sığ havuzlarda uzun süre bekletilmekte ve organik maddelerin ayrışması sağlanmaktadır. Ancak yukarıda belirtilen üstünlüklerinin yanı sıra, geniş araziye ihtiyaç göstermeleri de bir mahzur olarak sayılabilir. Bu nedenle uzun hidrolik bekletme sürelerine ve dolayısıyla geniş arazilere ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem ekipmansız çalışacağından dolayı, biyolojik aktivite yavaş olur. İklim ve havuzun doğal şartları biyolojik aktiviteyi etkiler. Bu nedenle, arazinin fazla ve ucuz, iklim şartlarının uygun olması stabilizasyon havuzlarının kullanım potansiyelini arttırır. Stabilizasyon havuzları, reaksiyon kinetikleri ve akım şekilleri yönünden geri devirsiz dispersiyonlu piston akımlı reaktörlere benzemektedir. Arıtma verimi, BOİ giderimi ile birlikte besi maddeleri (N ve P) arıtımında da istenilen şartları sağlayacak şekilde tasarlanabilirler.

<u>Tasarım Parametreleri:</u>

Stabilizasyon havuzlarının boyutlandırılması farklı kademelerden oluşmaktadır. Öncelikle oksijen üretimi hesaplanır. 20°C için birinci mertebe karbonlu organik madde giderim hızı sabiti, K_p tahmin edilir, havuz sıcaklığı seçilir ve K_p'de sıcaklık düzeltmesi yapılır. Dispersiyon sayısı, D, seçilir. Gerekli verim veya S/S_o değerlerinden K_p*t hesaplanır ve bekletme süresi, t, bulunur. Daha sonra havuz hacmi hesaplanır ve boyutlar belirlenir.

Fakültatif stabilizasyon havuzları için BOİ yüklemeleri, Akdeniz Bölgesinde 150 kg BOİ/ha.gün, Ege, Marmara ve Karadeniz Bölgelerinde 100 kg BOİ/ha.gün, İç Anadolu Bölgesinde
80 kg BOİ/ha.gün ve Doğu Anadolu Bölgesinde 50 kg BOİ/ha.gün alınabilir. Fakültatif stabilizasyon havuzlarının boyutlandırılmasında iklim özellikleri (sıcaklık, güneş ışığı, bulutluluk, rüzgar vb.) ve arıtılacak atıksuyun özelliklerinin etkisinin olduğu dikkate alınmalıdır.

Çamur birikimi 0,03-0,05 m^3 çamur/kişi.yıl'dır. Bu durum göz önünde bulundurularak çamur birikimi için fazladan bir hacim dikkate alınmalıdır. Hacim hesabında, çamurların 5-10 yılda bir temizleneceği kabul edilmelidir.

Stabilizasyon havuzları, tabii zeminde inşa edilirler. Havuz tabanının su sızdırmaması, dolayısıyla yeraltı sularını kirlenmemesi için havuz tabanı geçirimsiz yapılmalıdır. Zemin sıkıştırılıp, killi toprak serilmesi gerekebilir. Havuz yan yüzleri, 2-2,5 yatay ve 1 düşey olacak şekilde şevli inşa edilir. Yan yüzler, beton veya taş ile kaplanacaksa, eğim 1-1,5 yatay ve 1 düşey alınabilir.

Stabilizasyon havuzları, birden fazla sayıda ve/veya seri halde (üç gözlü) yapılabilir. Kişi başına yüzey alanı, 10-15 m^2 olabilir. Birinci havuzun yüzey alanı kişi başına 6 m^2, ikinci ve üçüncü havuzların toplam yüzey alanı kişi başına 5 m^2 olabilir. Havuz tabanı kesinlikle çatlak ve karstik yapıda olmamalı ve gerekli geçirimsizlik sağlanmalıdır.

Herhangi bir arıtmadan geçmemiş atıksuları kabul eden havuzlara ham veya birinci kademe stabilizasyon havuzları denir. Ön çökeltimden geçmiş veya biyolojik olarak arıtılmış atıksuların geldiği havuzlara ise ikinci kademe stabilizasyon havuzları adı verilir.

Stabilizasyon havuzu sisteminden çıkan suları genelde sulama amaçlı kullanılabilir. Hassas su alanlarına deşarj için ilave N, P giderimi yapılmalıdır.

Stabilizasyon havuzu tasarımında en yaygın olarak kullanılan akım şemaları Şekil 4.21'de verilmektedir. Havuzların geometrileri farklı şekillerde olabilir. Üniteler, istenen akım rejimine bağlı olarak (piston, dispersiyonlu veya tam karışımlı) seri veya paralel bağlı yerleştirilebilirler.

Şekil 4.21. Stabilizasyon havuzları için bazı tipik akım şemaları [2]

Farklı tipteki havuzların arıtma verimleri, aşağıda verilen faktörlere göre değerlendirilir.

- BOİ giderimi
- Mikroorganizma giderimi
- Besi maddesi (N ve P) giderimi

<u>Havuz Ekosistemini Etkileyen Faktörler:</u>

Havuz projelendirilmesini etkileyen çeşitli faktörler aşağıda verilmektedir.

- Atıksu özellikleri ve değişimi
- Çevresel faktörler (Radyasyon, ışık, sıcaklık)
- Alg büyüme modeli ve bu modelin günlük ve mevsimsel değişimi
- Bakteri büyüme modelleri ve ölme hızları
- Akımın hidrolik rejimi
- Buharlaşma ve sızma
- Katı madde çökelmesi, sıvılaşma, gazlaşma, aşağıdan yukarı difüzyon ve çamur birikimi
- Ortak yüzeylerde gaz transferi

Simülasyon yapabilmek için, kütle denge denklemlerinin kullanıldığı matematiksel modellerden yararlanılır.

Havuz Türleri:

Stabilizasyon havuzlarını üç sınıfta toplamak mümkündür.

- Havalı
- Havasız
- Fakültatif

Havalı, havasız ve fakültatif stabilizasyon havuzları için tasarım parametreleri Tablo 4.17'de verilmektedir.

Tablo 4.17. Havalı, havasız ve fakültatif stabilizasyon havuzları için tasarım parametreleri [8]

Parametre	*Havalı*	*Fakültatif*	*Havasız*
Hidrolik Bekletme Süresi (gün)	*5-20*	*10-30*	*20-50*
Su Derinliği (m)	*0,3-1*	*1-2*	*2,5-5*
$BOİ_5$ Yükü (kg/ha.gün)	*40-120*	*15-120*	*200-500*
Çözünmüş $BOİ_5$ Giderimi (%)	*90-97*	*85-95*	*80-95*
Toplam $BOİ_5$ Giderimi (%)	*40-80*[1]	*70-90*	*60-90*
Alg Konsantrasyonu (mg/L)	*100-120*	*20-80*	*0-5*
Çıkış AKM Ko nsantrasyonu (mg/L)	*100-250*	*40-100*	*70-120*

[1] *Çıkışta yüksek alg konsantrasyonundan dolayı toplam $BOİ_5$ giderim verimi düşüktür.*

4.10.2.1. Havalı Stabilizasyon Havuzları

Havalı stabilizasyon havuzlarında ışık geçirimi ve fotosentezle alg oluşumunu en yüksek seviyede tutmak için derinlik yaklaşık 0,3 m veya daha az seçilmektedir. Havalı şartlar havuz derinliğinin tümünde her zaman korunur.

4.10.2.2. Havasız Stabilizasyon Havuzları

Havasız stabilizasyon havuzlarında mikrobiyolojik aktivite anaerobik ortamda gerçekleşir. Havasız stabilizasyon havuzları daha derin inşa edilirler. Anaerobik ve fakültatif mikroorganizmalar, nitrat ve sülfattaki oksijeni kullanırlar. Bu tip havuzlar yüksek organik yükleri kabul edebilirler ve alg fotosentezi olmadan çalışabilirler. Işığın geçirimi bu havuzlar için önemli olmadığından, 3-4 m derinlikler kullanılabilir. Ancak günümüzde bu havuzlar yerine daha verimli oldukları için havasız çamur yataklı reaktörler (HÇYR) veya havasız perdeli reaktörler (HPR) kullanılabilir.

4.10.2.3. Fakültatif Stabilizasyon Havuzları

Fakültatif stabilizasyon havuzları kısmen aerobik, kısmen de anaerobik olarak çalıştığından bu tip havuzlarda alg ve fakültatif mikroorganizma gelişimi olmaktadır. Derinlik genellikle 1-2 m'dir. Fakültatif stabilizasyon havuzlarında iki tabaka mevcut olup, yüzeye yakın kısımlarda alglerin faaliyeti sonucu oksijen bulunur. Bu yüzden üst tabaka havalı olup, organik maddelerin çökeldiği alt tabaka havasızdır. Gündüz güneş ışığında havuz ağırlıklı olarak aerobik koşullarda iken, gece havuz tabanındaki su anaerobik koşullara sahip olur. Tabanda biriken çamurun, çamur-su arakesit yüzeyinden itibaren birkaç mm'lik kısmı hariç geri kalan tüm kısmı havasızdır. Dünyadaki mevcut havuzların çoğu fakültatif tiptedir. Bu havuzların aerobik ve anaerobik olma dereceleri değişkendir (Şekil 4.22) [2]. Bekletme süreleri iklim durumuna göre 20 - 40 gün, hatta daha fazla alınabilir. BOİ giderim verimi; iklime, bekletme süresi ve karışım şekline bağlı olarak % 70 ile 90 arasında ve koliform giderim verimi % 60 ile 99,9 arasında değişmektedir.

Şekil 4.22. Fakültatif havuzda atıksu arıtımı [2]

4.10.3. Olgunlaşma Havuzları

Olgunlaşma havuzları, havalandırmalı lagün veya fakültatif stabilizasyon havuzu çıkış suyu kalitesinin özellikle patojenler açısından iyileştirilmesi amacıyla kullanılan havuzlardır. İkinci kademe stabilizasyon havuzlarına örnek olarak olgunlaşma havuzları verilebilir. Stabilizasyon havuzlarında veya diğer konvansiyonel arıtma tesislerinde arıtılan atıksular, daha yüksek kaliteye getirilmek üzere belirli bir süre (yaklaşık 5-7 gün) olgunlaşma havuzlarında ilave arıtmaya tabi tutulurlar. Olgunlaşma havuzları, organik yük yönünden oldukça düşük seviyede yüklenirler. Bu tip havuzlar özellikle Güney Afrika'da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Olgunlaşma havuzlarının BOİ giderim verimi çok düşüktür. Ancak azot ve fosfor giderimine katkıları büyüktür. Olgunlaşma havuzlarında dikey biyolojik ve fiziko-kimyasal tabakalaşma gözlenmemektedir. Olgunlaşma havuzunun yer aldığı tipik bir akım şeması Şekil 4.23'te verilmektedir.

Şekil 4.23. Olgunlaşma havuzunun yer aldığı tipik bir akım şeması

Olgunlaşma havuzlarındaki alg popülasyonu fakültatif havuzlara göre daha çeşitlidir. Fakültatif havuzlarda kısmen fekal bakteri giderimi gerçekleşirken, olgunlaşma havuzlarının sayısı ve boyutları çıkış suyundaki fekal bakteri miktarını belirler. Fakültatif stabilizasyon havuzu ve olgunlaşma havuzlarında fekal bakteri giderimi için başlıca faktörler; hidrolik bekletme süresi, sıcaklık, yüksek pH (>9), çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve yüksek ışık yoğunluğudur.

Hidrolik bekletme süresi ve sıcaklık, olgunlaşma havuzlarının tasarımında kullanılan iki ana parametredir. Alglerin hızlı fotosentezi nedeniyle karbondioksitin tükenmesi ve bakteriyel solunumun gerçekleşmesi sonucu karbonat ve bikarbonat iyonlarının ayrılması ile olgunlaşma havuzunda yüksek pH değerleri oluşur. 425-700 nm arasındaki ışık dalga boylarında fekal bakteri giderilebilmektedir.

Olgunlaşma havuzunun da yer aldığı bir stabilizasyon havuzu sisteminde (havasız lagün + fakültatif stabilizasyon havuzu + olgunlaşma havuzu) olgunlaşma havuzu sayısına bağlı olarak,

azot giderim verimi %80'e ulaşırken, amonyak giderim verimi %90'ın üzerinde olmaktadır. Ayrıca, bu tür bir sistemlerde %50 oranında fosfor giderimi de elde edilebilir.

Olgunlaşma havuzları fakültatif havuzlardan sığ olup, 1-1,5 m derinlikte tasarlanabilirler. Olgunlaşma havuzlarına düşük organik yüklemeler uygulanması nedeniyle derinlik boyunca yeterli havalandırma sağlanabilir. Olgunlaşma havuzlarının bekletme süresi 18-20 gün aralığında değişmekte olup, organik kirlilik yükü 15 kg $BOİ_5$/ha.gün'den küçük olmalıdır.

Olgunlaşma havuzu veya lagünlerinde çeşitli su bitkilerinin yetiştirilmesi ve/veya balık üretimi ile bu sistemlerdeki arıtma verimlerinin arttırılmasının yanında, üretilen bitkisel veya hayvansal proteinin ekonomik olarak değerlendirilme imkanı da mevcuttur. Balık havuzları olgunlaşma havuzlarının birer parçası olabileceği gibi, ayrı havuzlar olarak da tasarlanabilirler. Bu havuzlarda balık yetiştirilir. Su bitkisi havuzları, ikinci kademe havuzlardır. İçlerinde yüzer su bitkileri (Örneğin; su sümbülü) yetiştirilir. Bu bitkilerin atıksuyu daha fazla arıtma ve ağır metalleri giderme potansiyeli vardır. Bu bitkiler, sağladıkları besi maddeleri (N ve P) ve gazlar sayesinde yeni bitkilerin üremesine de katkıda bulunurlar.

4.10.4. Yapay Sulak Alanlar

Sulak alanlar, suya doygun toprak koşullarına uyum sağlamış bitki türlerini barındıran ve bu koşulları sağlamaya yetecek sıklıkta ve süreklilikte yüzey suyu ya da yeraltı suyuna doygun veya suyla kaplanmış alanlardır. Sulak alanların temel özelliği, sürekli veya dönemsel olarak taban yüzeyinde suya doygunluk veya suyla kaplı olma durumu ve bu durumu yansıtan fiziksel, kimyasal ve biyolojik unsurlara sahip olmalarıdır. Sulak alan ekosistemlerinin yüksek biyolojik aktiviteye sahip olmaları, bu sistemlerde atıksularda rastlanan birçok kirletici maddenin dönüşümünün gerçekleşmesine imkan vermektedir. Yapay sulak alanlar (YSA) ise, sulak alan ekosistemlerinin bu özelliğini öne çıkaran arıtma amaçlı tasarlanmış sistemlerdir.

Yapay sulak alanlar, evsel atıksuların birincil ve ikincil arıtımında yaygın olarak uygulama alanı bulmuştur. Yapay sulak alanlar, özellikle arazinin bol, ucuz ve işletme için kalifiye teknik personelin az olabileceği kırsal bölgelerde, yüksek maliyetli mekanik donanım gerektiren konvansiyonel arıtma sistemlerine göre daha uygun bir atıksu arıtma yöntemi olarak son yıllarda artan oranlarda kullanılmaktadır. Yapay sulak alanlar, serbest yüzey akışlı (SYA) ve yüzeyaltı akışlı (YAA) olmak üzere hidrolik ve işletme özellikleri bakımından iki farklı tipte inşa edilebilirler.

4.10.4.1. Serbest Yüzey Akışlı (SYA) Yapay Sulak Alan Sistemleri

Serbest yüzey akışlı (SYA) yapay sulak alan sistemleri atmosfere açık su yüzeyi bulunduran ve bünyesindeki sucul bitkilerle görünüm olarak doğal sulak alanlara benzeyen sistemlerdir (Şekil 4.24). Yapay sulak alanlarda en yaygın kullanılan bitkiler Şekil 4.25'da görülmektedir. Kullanılacak bitki türü, devamlı su içinde bulunmayı ve yüksek kirlilikteki atıksulara devamlı maruz kalmayı tolere edebilecek nitelikte olmalıdır. Yapay sulak alanlarda bitki yoğunluğu bitki türüne göre genelde 1-4 bitki/m^2 aralığında değişmektedir.

Atıksu sulak alan içinde ilerlerken; çökelme, biyokimyasal ayrışma, filtrasyon, adsorpsiyon prosesleri yardımıyla arıtılır. Tipik bir SYA yapay sulak alanda gerçekleşen doğal arıtma prosesleri Şekil 4.26 ve Tablo 4.18'de özetlenmektedir.

SYA sulak alanların atıksu arıtımı sağlamasının dışında, vahşi yaşam için ortam oluşturma, rekreasyon amaçlı kullanım, estetik görünüm gibi faydaları da mevcuttur.

Şekil 4.24. SYA yapay sulak alan kesiti [9]

Şekil 4.25. SYA yapay sulak alanlarda en çok kullanılan bitki türleri. (a) Bataklık sazı (*Schoenoplectus lacustris*), (b) Kamış (*Phragmites australis*), (c) Şeytan mumu (*Typha latifolia*), (d) Nilüfer (*Nymphaea alba*) (e) Çim su sümbülü (*Potamogeton gramineus*) (f) Su taşı (*Hydrocotyle vulgaris*) (g) Su sümbülü (*Eichhornia crassipes*) (h) Su mercimeği (*Lemna minor*) (i) Kıvırcık su sümbülü (*Potamogeton crispus*) (j) *Littorella uniflora* [10]

Şekil 4.26. SYA yapay sulak alanlarda gerçekleşen başlıca arıtma mekanizmaları [9]

Tablo 4.18. Atıksuda bulunan kirletici parametrelerin SYA yapay sulak alanlarda giderim mekanizmaları

Parametre	***Giderim Mekanizması***
AKM	*Çökelme, Filtrasyon*
BOİ	*Biyolojik ayrışma, Çökelme*
Azot	*Nitrifikasyon / Denitrifikasyon, Bitki tarafından kullanım*
Fosfor	*Çökelme, Adsorpsiyon, Bitki tarafından kullanım*
Patojen	*UV radyasyonu, Çökelme, Filtrasyon, Ölüm*

SYA yapay sulak alanlarda kirleticilerin giderimini sağlayan biyokimyasal prosesler, bitkilerle, biyofilm ve toprak yüzeyleriyle yakından ilişkilidir. Bir bütün olarak bu sistem, kirleticileri ve besi maddelerini dönüştüren bir "biyomakine"dir. Sistemin etkinliği sulak alanın hacminden çok, sulak alanın yüzey alanı ile birlikte artış gösterir. Örneğin; sabit su derinliğinde yüzey alanı iki katına çıkarılırsa, bekletme süresi de iki katına çıkar ve "biyomakine"nin etkinliği de iki katına çıkmış olur. Ancak sistemin yüzey alanı sabit tutulup su derinliği iki katına çıkarılırsa bekletme süresi iki katına çıkmasına rağmen "biyomakine"nin etkinliği artmayacaktır. Zira su derinliğinin artması bitki sayısını, biyofilm ve toprak yüzeyi alanını değiştirmeyecektir (Şekil 4.27). Bu sebeple kirletici giderim verimleri hesaplanırken, alansal kirlilik yükü girişi ve alansal giderim katsayıları üzerinden hesap yapılır.

Şekil 4.27. SYA yapay sulak alanlarda bekletme süresini suyu derinleştirerek arttırma ve alanı genişleterek arttırma arasındaki kavramsal fark [9]

SYA Sulak Alanlarda Askıda Katı Madde (AKM) Giderimi:

Yapay sulak alanlardaki başlıca askıda katı madde giderim mekanizmaları çökelme ve filtrasyondur (Şekil 4.28). SYA sulak alan sistemlerinde düşük su hızları sayesinde partiküler maddeler etkin bir şekilde çökelirken, çökelen partiküllerin yeniden askıdaki hale geçmesi de sınırlandırılmış olur. Yoğun bitkiye sahip sistemlerde suyun bitkilerin arasından geçerken filtre edilmesi de AKM giderimine katkı sağlar. Sulak alan giriş akımı yüksek konsantrasyonda AKM içeriyorsa, sulak alan girişinde yaklaşık 1 m derinlikli bir çökelme bölgesi oluşturmak faydalıdır (Şekil 4.24).

EPA (2000) ve Kadlec & Wallace (2009) tarafından yapılan literatür taraması ve mevcut sistemlerin incelenmesi sonucu elde edilen verilere göre, çıkış suyundaki AKM parametresinin 30 mg/L'yi geçmemesi için alansal giriş yükü 50 kg/ha.gün değerini aşmamalı, AKM parametresinin 20 mg/L'yi geçmemesi için ise alansal giriş yükü 30 kg ha^{-1} $gün^{-1}$ ile sınırlandırılmalıdır.

Şekil 4.28. SYA sulak alanlarda AKM giderimini etkileyen mekanizmalar [9]

SYA Sulak Alanlarda BOİ Giderimi

SYA sulak alanlarda BOİ giderimi biyolojik ayrışma ve çökelme prosesleri ile sağlanır. Su içerisinde askıda bulunan ve bitkiler üzerinde biyofilm tabakası oluşturan mikroorganizmalar, atıksudaki organik maddeleri biyolojik olarak ayrışır. Atıksudaki partiküler haldeki organik maddeler çökelme ile giderilirken, çözünmüş organik maddelerin bir kısmı demir, sülfür, nitrat indirgenmesi gibi çeşitli kimyasal reaksiyonlarla bozunmaya uğrar. Aerobik biyolojik ayrışma için gerekli oksijen kaynağı doğal yüzey havalandırması ile sağlanır. Bu yüzden yüksek oranda BOİ giderimi istenen sistemlerde, yoğun bitkili sulak alan hücrelerinin dışında, oksijen transferinin sağlanabilmesi açısından açık yüzey alanına sahip hücrelerin de olması istenir. Sulak alan çökeltilerinde ise oksijen bulunduran bölgeler bitkilerin rizosfer adı verilen kök bölgeleridir. Bitkiler atmosferden aldıkları oksijeni kök bölgelerine taşırlar, kök bölgelerinden de karbondioksit ve metan gazı bitki gövdesindeki özel yapılarla taşınarak atmosfere verilir, böylece gaz transferi gerçekleşmiş olur (Şekil 4.29). Kök bölgelerinden uzak kısımlarda çoğunlukla anoksik/anaerobik koşullar hakimdir.

SYA yapay sulak alanlarda BOİ giderimi yaygın olarak birinci derece kinetiği ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$J = k\,C \tag{4.63}$$

Burada,

C : BOİ konsantrasyonu (mg/L)
J : alansal BOİ giderimi (g/m^2.gün)
k : reaksiyon katsayısı (m/gün)

olarak verilmiştir.

Şekil 4.29. Sulak alanlarda bitkiler tarafından gerçekleştirilen oksijen, karbondioksit ve metan gazı transferi [10]

Sulak alan sisteminde, kirleticilerin sistemde mevcut "arka plan" konsantrasyonu da (C*) göz önüne alınmalıdır. Bu durumda Denklem (4.63) aşağıdaki hali alır.

$$J = k(C - C^*) \tag{4.64}$$

Bu klasik yaklaşım yerine, *n*-k-C* modeli olarak tanımlanan yaklaşımın sulak alanlardaki kirleticilerin ayrışmasını daha iyi temsil ettiği tespit edilmiştir Denklem (4.65).

$$\frac{C_e - C^*}{C_i - C^*} = \frac{1}{(1 + k/nq)^n} \tag{4.65}$$

Bu denklemde,

C_i : *sulak alan girişindeki BOİ, (mg L $^{-1}$)*
C_e : *sulak alan çıkışındaki BOİ konsantrasyonu, (mg L^{-1})*
C^* : *sistem içerisinde mevcut olan "arka plan" BOİ konsantrasyonu*
n : *birbirine seri bağlı hücre sayısı*
c ve q : *hidrolik yük, (cm gün^{-1})*

SYA sulak alanlarda kirletici parametrelerin tipik "arka plan" konsantrasyonları Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19. SYA sulak alanlarda kirletici parametrelerin tipik "arka plan konsantrasyonları", (C^*)

Parametre	*Konsantrasyon Aralığı (mg/L)*	*Tipik Konsantrasyon (mg/L)*
AKM	*2-5*	*3*
BOİ	*2-8*	*5*
Toplam Azot (TN)	*1-3*	*2*
Toplam Fosfor (TP)	*1-3*	*1*

Sulak alan arıtma verimleri rapor edilirken sıkça yapılan bir hata sulak alan giriş ve çıkış suyundan aynı zamanda alınan numune çiftleri üzerinden % giderim verimini hesaplamaktır. Bu şekilde hesaplanan giderim verimleri sulak alandaki taşınım gecikmesi nedeniyle temsil edici olmaz. SYA sulak alanlarda bekletme süreleri en az birkaç gün mertebesindedir ve

sistemde gözlenen gerçek bekletme süresi dağılımı ideal piston akımlı reaktör kabulü ile hesaplanan nominal bekletme süresinin 3-4 katına kadar değişir. Bu yüzden sulak alan çıkışında gözlenen su, sisteme 3 veya 4 nominal bekletme süresi önce girmiş olabilir. ***"Sinoptik hata" olarak da tarif edilen bu hataya düşmemek için anlık giriş-çıkış numune çiftleri yerine 3 veya 4 nominal bekletme süresi üzerinden alınmış ortalama konsantrasyonlara göre hesap yapılması gerekir.***

SYA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki BOİ konsantrasyonunun değişimi Şekil 4.30'de görülmektedir.

Şekil 4.30. SYA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki BOİ konsantrasyonunun değişimi (Şekildeki 383 noktanın her biri 136 sulak alandaki yıllık ortalamaları temsil etmektedir) [9]

<u>SYA Yapay Sulak Alanlarda Azot Giderimi:</u>

Sulak alanlarda azot gideriminin en önemli unsuru mikrobiyal nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesleridir. Nitrifikasyon, amonyak azotunun (NH_3-N) mikroorganizmalar tarafından nitrat azotuna (NO_3-N) oksitlenmesidir (Denlem 4.66-4.67). Bu işlem aşağıda belirtildiği üzere iki adımlıdır ve sulak alan sedimentlerinin aerobik üst tabakasında ve sulak alan bitkilerinin oksijen barındıran rizosfer bölgesinde gerçekleşir.

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ \quad (4.66)$$

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- \quad (4.67)$$

Denitrifikasyon ise fakültatif heterotrof bakteriler tarafından nitrat azotunun azot gazına indirgenmesidir (Denklem 4.68). Bu işlem sulak alan sedimentlerinin anaerobik tabakasında gerçekleşir ve işlem sırasında kolay parçalanabilir karbona ihtiyaç duyulur.

$$2NO_3^- \rightarrow 2NO_2^- \rightarrow 2NO^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (4.68)$$

Sulak alanlardaki mikrobiyal denitrifikasyon prosesinde bitkiler kolay parçalanabilir karbon kaynağı sağladıkları için önemli rol oynarlar.

Nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesleri sıcaklık değişiminden önemli ölçüde etkilenen proseslerdir. Sıcaklığın 10°C'nin altına düşmesi halinde SYA sulak alanlarda azot giderim veriminin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle soğuk iklime sahip ülkeler için dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Tasarımda Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar:

SYA sulak alanların boyutlandırılmasında hidrolojik rejime doğrudan bağlı olan bekletme süresi ve hidrolik yükleme hızı, göz önüne alınması gereken iki önemli değişkendir. Küçük yerleşim yerleri için sulak alan boyutlandırılmasında hidrolik yükleme hızının 2-5 cm/gün aralığında tutulması tavsiye edilirken, uygulamada 1-22 cm/gün aralığında değişen hidrolik yüklere sahip sistemler mevcuttur.

Sulak alanlar birbirlerine seri halde bağlanmış hücreler olarak tasarlandığı zaman, kirletici giderim verimlerinin arttığı tespit edilmiştir. Daha yüksek BOİ giderim verimi ve özellikle azot giderim verimi de hedefleniyorsa, birbirine bağlı seri hücrelerden ilki yoğun bitkili (yüzey alanının ~ %80'ini kaplayacak şekilde) ve sığ su derinliğine sahip (0,6-0,8 m) olmalıdır. Toprak derinliği seçilen bitkilerin kök derinliğine göre 0,3-0,8 m aralığında değişir. Kumlu lem gibi orta bünyeli ve organik madde içeriği yüksek olan topraklar, bitkilerin büyümesi açısından en uygun toprak türüdür. Sistemde su tutulabilmesi ve yeraltı suyu kirliliği oluşmaması açısından toprak geçirgenliği 10^{-6} cm/s değerini aşmamalıdır. Yoğun bitkili hücreyi takip eden hücre açık alanlı ve daha derin (su derinliği 1,0-1,2 m) olarak tasarlanmalıdır. Bu tasarım havadan oksijen transferinin daha etkin bir şekilde gerçekleşmesi ve nitrifikasyon için gereklidir. Bu hücreden hemen sonra ilk hücreye benzer şekilde yoğun bitkili bir hücre daha yerleştirilmelidir. Bu hücrede denitrifikasyon ile azot giderimi gerçekleşecektir. Şekil 4.31'de her bir hücrede hangi kirleticilerin gideriminin beklendiği görülmektedir.

Seri bağlı şekildeki hücrelerin birbirine paralel iki sistem olarak işletilmesi tavsiye edilen ve çoğunlukla uygulanan bir tasarım kriteridir. Böylece gerektiği zaman paralel sistemlerden biri devre dışı bırakılarak bakıma alınabilecektir. Tasarlanan her bir hücre, aylık maksimum debide en az 2 günlük bekletme süresine sahip olacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Eğer giriş suyunda yüksek katı madde konsantrasyonu bekleniyorsa, tıkanmaları engellemek için sulak alan girişinde bir çökelme bölümü oluşturularak katı madde giderimi sağlanabilir. Hidrolik verimliliğin arttırılması ve sistemin piston akımlı reaktör modeline yakınsaması açısından uzunluk/genişlik (L :W) oranı 3'ten az olmamalıdır. L:W oranının çok yüksek olması ise özellikle yoğun bitkili hücrelerde hidrolik yük kayıplarını fazla miktarda arttıracağı için istenen bir durum değildir. Bu yüzden L:W oranının 5 civarında tutulması tavsiye edilmektedir. EPA tarafından verilen tasarım kriterleri Tablo 4.20'de özetlenmiştir [3].

Şekil 4.31. Seri bağlı üç hücreden oluşan SYA sulak alan sisteminde her bir bölgede gerçekleşmesi beklenen kirletici gideriminin genel gösterimi [3]

Tablo 4.20. SYA sulak alanlar için tavsiye edilen tasarım kriterleri [3]

Parametre	***Tasarım Kriteri***
Maksimum BOİ yükü	*BOİ < 20 mg/L hedefi için 45 kg/ha.gün* *BOİ < 30 mg/L hedefi için 60 kg/ha.gün*
Maksimum AKM yükü	*AKM < 20 mg/L hedefi için 30 kg/ha.gün* *AKM < 30 mg/L hedefi için 50 kg/ha.gün*
Maksimum TN yükü	*TN < 10 mg/L hedefi için 5 kg/ha.gün*
Maksimum TP yükü	*TP < 1,5 mg/L hedefi için 0,5 kg/ha.gün*
Su derinliği	*Yoğun bitkili hücrelerde: 0,6 – 0,9 m* *Açık alanlı hücrelerde: 1,0 – 1,5 m* *Giriş çökelme bölgesinde (opsiyonlu): 1,0 m*
Toprak derinliği	*Seçilen bitkilerin kök derinliğine göre, 0,3-0,8 m*
Yoğun bitkili hücrelerde minimum bekletme süresi (HRT)	*2 gün*
Açık alanlı hücrelerde maksimum bekletme süresi (HRT)	*2 - 3 gün*
Hidrolik yük (q)	*2- 5 cm/gün*
Uzunluk: Genişlik oranı (L: W)	*3:1 - 5:1*
Tasarım Porozitesi	*Çok yoğun bitkili alanlar için 0,65* *Seyrek bitkili alanlar için 0,75* *Açık su alanları için 1,0*

İşletme Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar:

SYA yapay sulak alanlar fazla bakım gerektirmeyen ve işletmesi kolay olan sistemler olmalarına rağmen, işletme aşamasında bazı kritik hususlara dikkat edilmesi gerekir. Sulak alandaki su seviyesi belirli aralıklarla kontrol edilmelidir. Giriş çıkış borularındaki tıkanmalar, sızma, toprak seddelerde hasar gibi sebeplerle su seviyelerinde anormal değişimler gözlendiğinde, gerekli tedbirler alınmalı ve sorunun kaynağı tespit edilerek ortadan kaldırılmalıdır. Giriş ve çıkış borularındaki tıkanmaları önlemek için haftalık kontroller yapılmalı ve gerekli yerler temizlenmelidir. Sistemin arıtma performansı giriş ve çıkış suyundan düzenli aralıklarla alınan numuneler ile izlenmelidir. Fosfor için başlıca giderim mekanizması adsorpsiyon ve çökelme olduğu için, adsorpsiyon bölgeleri doygunluğa ulaştıktan sonra (giriş yüküne bağlı olarak 1 - 5 yıl) fosfor giderim veriminin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. ***Bu durumda özellikle yüksek oranda fosfor gideriminin beklendiği sistemlerde, toprağın fosfor ile doygunluğa ulaştıktan sonra değiştirilmesi ve yeniden bitki ekimi yapılması gerekir.***

Özellikle sistemin işletmeye alındığı ilk yıllarda bitkilerin gelişimi takip edilmeli ve gerekli bitki takviyeleri yapılmalıdır. Diğer bitkilerin gelişimini olumsuz etkileyen yabancı ve istenmeyen türler geliştiği takdirde bunlar sistemden uzaklaştırılmalıdır. Toprak seddeler (şevler) özellikle kazıcı kemirgenlere karşı korunmalı ve gerekirse taş malzeme ile kaplanarak stabiliteleri sağlanmalıdır. Çevrede otlayan hayvanlar varsa sulak alanın etrafı çitlerle çevrilerek bitkiler korumaya alınmalıdır. SYA sulak alanlar açık su yüzeyine sahip oldukları için sivrisinek problemine yol açabilirler. Bunun önlenmesi için sivrisinek larvaları ile beslenen sivrisinek balığı (*Gambusia affinis*) ile kontrol yöntemi daha önce başarıyla uygulanmıştır. Ancak çok yoğun bitkili sulak alan hücrelerinde sivrisinek balığının hareket kabiliyeti kısıtlandığından bu kontrol yönteminin etkinliği azalmaktadır. Sivrisinek çoğalma mevsiminde, paralel olarak tasarlanmış sulak alan hücreleri sırayla bakıma alınıp boşaltılarak sistem sivrisinek larvalarından tamamen temizlenebilir. Bunların yanı sıra özellikle yaz aylarında koku oluşması halinde, çıkış suyu geri devri ile sistemdeki çözünmüş oksijen miktarı arttırılarak problem azaltılabilir.

4.10.4.2. Yüzeyaltı Akışlı (YAA) Yapay Sulak Alan Sistemleri

Yüzeyaltı akışlı yapay sulak alan sistemlerini serbest yüzey akışlı sistemlerden ayıran en temel özellik atmosfere açık su yüzeyine sahip olmamalarıdır. Bu tür YSA'lar açık su yüzeyine sahip olmadıklarından vahşi yaşam için alan oluşturma veya rekreasyon amaçlı kullanım özelliğine sahip değildirler. Ayrıca dolgu malzemesinin tıkanma problemi işletme zorluğuna yol açabilir. Ancak koku ve sivrisinek problemi olmaması, soğuktan etkilenmemesi ve daha az araziye ihtiyaç duyması bakımından serbest yüzey akışlı sistemlere göre üstünlükleri de vardır. Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemleri daha çok Amerika'da uygulanırken, yüzeyaltı akışlı sulak alan sistemleri Avrupa'da daha yaygın olarak uygulama alanı bulmuştur. YAA sulak alan sistemleri hidrolik özelliklerine göre yatay akışlı ve dikey akışlı olarak iki gruba ayrılır.

Yatay Yüzeyaltı Akışlı (YYAA) Yapay Sulak Alan Sistemleri:

Yatay yüzey altı akışlı sistemlerde su, çakıl veya kırma taştan oluşan dolgu malzemesi ile doldurulmuş bir çukur veya su yatağına akıtılır ve yatay düzlemde çıkış bölgesine doğru hareket eder. Üst kısımda ince bir toprak tabakası ve buraya ekilmiş bitkiler bulunur. Tipik bir YYAA sulak alan hücresine ait kesit Şekil 4.32'te görülmektedir. Dolgu malzemesi; (1) bitki köklerinin tutunması için destek sağlar, (2) suyun sistem içinde düzgün bir şekilde akışını sağlar, (3) mikroorganizmaların biyofilm tabakası oluşturmaları için yüzey oluşturur, (4) katı maddelerin süzülmesi ve tutulmasını sağlar.

Şekil 4.32. YYAA yapay sulak alan kesiti [9]

YYAA sulak alan sistemleri tasarlanırken sistemin dört bölgeden oluşacağı öngörülür (Şekil 4.33). Birinci kısım giriş bölgesi, son kısım ise çıkış bölgesidir. Giriş ve çıkış bölgelerinde tıkanmaları minimize etmek için dolgu malzemesinin 40-80 mm aralığında olması istenir. Giriş ve çıkış bölgeleri arasında iki adet arıtma bölgesi bulunur. Uzunluğun %30'luk kısmını içine alan birinci arıtma bölgesinde hidrolik iletkenlikte büyük bir azalma yaşanacağı öngörülür Bu bölgede hidrolik iletkenlik katsayısı, K, temiz durumdaki iletkenliğin %1'i olarak kabul edilir. İkinci arıtma bölgesi geriye kalan %70'lik uzunluğu kapsar ve buradaki hidrolik iletkenlik katsayısı temiz durumdakinin %10'u olarak kabul edilir.

Şekil 4.33. YYAA yapay sulak alanlarda giriş-çıkış ve arıtma bölgeleri [3]

(a) YYAA Sulak Alanlarda Askıda Katı Madde (AKM) Giderimi

YYAA sulak alan sistemlerinde AKM giderim mekanizması esas olarak SYA sulak alanlardakine benzerdir. Çökelme ve filtrasyon AKM giderim mekanizması olarak öne çıkar. Düşük hızlar ve dolgu malzemesinin geniş yüzey alanı sebebiyle yüksek AKM giderme verimleri elde edilebilir. Özellikle giriş bölgesine yakın kısımlarda katı maddeler çökelir. Dolgu malzemesi arasındaki boşluklar zamanla azaldıkça hidrolik iletkenlik de azalmaya başlar. Zamanında önlem alınmazsa yüzeyi su basar ve sistem çalışamaz hale gelebilir. Şekil 4.34'te YYAA sulak alan sistemlerinde tıkanma aşamaları görülmektedir. Üst tabakaya ekilen

bitkilerin kökleri buralarda akışı büyük ölçüde bloke eder. Atıksu ile gelen organik madde yükü özellikle giriş bölgelerinde daha yoğun mikrobiyal biyofilm oluşumuna yol açar. Biyofilm oluşumu da dolgu malzemesi arasındaki boşlukların azalmasına yol açarak tıkanmaya katkıda bulunur. YYAA sulak alan sistemlerinde çıkış suyunda AKM parametresinin 20 mg/L'yi geçmemesi için alansal yük 6 g m^{-2} $gün^{-1}$ ile sınırlandırılmalıdır.

Şekil 4.34. YAA sulak alanlarda çakıl yatakta tıkanma aşamaları [9]

(b) YYAA Sulak Alanlarda BOİ Giderimi

YYAA sulak alanlarda BOİ giderimi çökelme ve biyolojik ayrışma mekanizmaları ile sağlanır. Biyolojik ayrışma dolgu malzemesi yüzeylerinde oluşan biyofilm tabakalarında gerçekleşir. Özellikle BOİ yükünün fazla olduğu YYAA sistemlerde oksijen çoğu zaman aerobik prosesler için yeterli olmaz ve anaerobik ayrışma gerçekleşir. Aerobik şartları oluşturmak için kesikli beslenen dikey akışlı sistemlerin de kullanılmasıyla hibrit sistemler oluşturulabilir. Dikey yüzeyaltı akışlı sulak alan sistemleri (DYYA) bir sonraki bölümde ele alınacaktır. Akış yönündeki BOİ profili bir önceki kısımda tanımlanan *n*-k-C* modeli ile temsil edilebilir. Ancak *n*, k ve C* parametrelerinin değerleri sistemden sisteme fazla değişkenlik gösterdiğinden bu parametreler için genel geçer değerler vermek mümkün olmamaktadır. YYAA sulak alan

sistemlerinde çıkış suyunda BOİ parametresinin 20 mg/L'yi geçmemesi için alansal giriş yükünün 1,6 g m^{-2} $gün^{-1}$ ile sınırlandırılması tavsiye edilmektedir. YYAA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki BOİ konsantrasyonunun değişimi Şekil 4.35'da görülmektedir.

Şekil 4.35. YYAA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki BOİ konsantrasyonunun değişimi. (202 adet her bir nokta farklı bir YYAA sulak alanı temsil etmektedir.) [9]

(c) YYAA Sulak Alanlarda Azot Giderimi

YYAA sulak alanlarda azot giderimi büyük ölçüde bitki alımına bağlıdır. Bu sistemlerde çoğunlukla anaerobik şartlar baskın olduğu için nitrifikasyon çok sınırlı kalmaktadır. Bu yüzden biyolojik azot giderimi gerçekleşmesi beklenmez. Bitki alımı da sisteme giren azot yüklerine göre son derece sınırlıdır. Sucul bitkiler için bünyelerine azot alma kapasiteleri 12-120 g N /m^2.yıl olarak verilmiştir. Şekil 4.36'de görülen sınırlı azot giderimi de yukarıda bahsedilen durumu desteklemektedir. Bu faktörler gözönüne alındığında, etkin azot giderimi için aerobik şartların oluştuğu dikey akışlı sistemlerin yatay akışlı sistemlerle birlikte hibrit sistemler olarak kullanılması tavsiye edilmektedir.

Şekil 4.36. YYAA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki TN konsantrasyonunun değişimi (Veriler 112 farklı sulak alandan alınmıştır.) [9]

(d) YYAA Sulak Alanlarda Fosfor Giderimi

YYAA sulak alan sistemlerinde fosfor giderimi adsorpsiyon ve bitki bünyesine alım ile sınırlıdır. Sucul bitkiler için bitki bünyesine fosfor alımı 1,9-18 g P /m^2.yıl aralığında verilmiştir. Kısa vadede sınırlı miktarda fosfor giderimi mümkün olsa da, zamanla dolgu malzemesinin adsorpsiyon kapasitesi azalacağından, uzun vadede fosfor giderimi için bu sistemler tavsiye edilmemektedir. EPA tarafından YYAA sistemleri için verilen tasarım kriterleri Tablo 4.21'de özetlenmiştir [3].

Tablo 4.21. YYAA sulak alanlar için tavsiye edilen tasarım kriterleri [3]

Parametre	***Tasarım Kriteri***
Maksimum BOİ yükü	*BOİ < 20 mg/L hedefi için 1,6 g/m^2.gün* *BOİ < 30 mg/L hedefi için 6 g/m^2.gün*
Maksimum AKM yükü	*Ön çökeltim tavsiye edilir. Ön çökeltimden sonra:* *AKM < 30 mg/L hedefi için 20 g/m^2.gün*
Maksimum TN yükü	*Azot giderimi için DYAA ile birlikte hibrit sistem oluşturulması tavsiye edilir.*
Maksimum TP yükü	*Fosfor giderimi için tavsiye edilmez.*
Su derinliği	*0,4 - 0,5 m*
Dolgu malzemesi derinliği	*0,5 - 0,6 m*
Dolgu malzemesi	*Dolgu olarak kullanılacak malzeme yıkanarak temizlenmiş olmalıdır.* *Giriş bölgesinde (ilk 2 m) dane çapı: 40-80 mm* *Arıtma bölgesinde dane çapı: 20-30 mm* *Çıkış bölgesinde (son 1 m) dane çapı: 5 -20 mm*
Taban eğimi	*0,5 – 1 %*
Hidrolik iletkenlik (K)	*Uzunluğun %30'luk ilk kısmında temiz K'nın %1'i,* *Uzunluğun %70'lik kısmında temiz K'nın %10'u olarak alınır.*

Dikey Yüzeyaltı Akışlı (DYAA) Yapay Sulak Alan Sistemleri

DYAA yapay sulak alan sistemlerini YYAA yapay sistemlerinden ayıran en temel özellik, suyun akış yönüdür. Şekil 4.37'de tipik bir DYAA kesiti verilmiştir. Bu sistemlerde sulak alan yüzeyine kesikli olarak yüksek miktarda su verilir ve geçici bir zaman boyunca yüzeyi kaplayan suyun alt yüzeye doğru süzülmesi sağlanır. Su alt tabakalara doğru doygun olmayan akış ile ilerlerken, bıraktığı boşluklar hava ile dolar ve sistemde oksijen transferi gerçekleşir. Bu özelliklerinden dolayı bu sistemlerde nitrifikasyon gerçekleşmesi mümkündür. Fakat gerekli anaerobik şartlar oluşmadığından denitrifikasyon sınırlı kalır ve bu sistemlerden tek başına biyolojik azot giderimi gerçekleşmesi beklenemez. Nitrifikasyonun gerçekleştiği DYAA sisteminin ardından denitrifikasyonun gerçekleştiği YYAA sistemi yerleştirilerek hibrit bir sistem oluşturulduğu takdirde etkin bir azot giderimi sağlanabilir. DYAA yapay sulan alan sistemlerinde YYAA yapay sulan alan sistemlerine benzer şekilde yüksek verimde AKM ve BOİ giderimi elde edilebilirken (Şekil 4.37 - Şekil 4.39), fosfor giderimi sınırlıdır ve uzun vadede fosfor giderimi beklenmemelidir.

DYAA sulak alan sistemleri YYAA sulak alan sistemlerine göre daha az alan gerektirir (DYAA: 1-3 m^2/EN; YYAA: 5-10 m^2/EN). Fakat DYAA sulak alanlarda sistemin işletilmesi daha zordur.

Şekil 4.37. DYAA yapay sulak alan kesiti [9]

Şekil 4.38. DYAA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki AKM konsantrasyonunun değişimi (Veriler 62 farklı sulak alandan alınmıştır.) [9]

Şekil 4.39. DYAA sulak alanlarda giriş yüküne bağlı olarak çıkıştaki BOİ konsantrasyonunun değişimi (Veriler 62 farklı sulak alandan alınmıştır) [9]

<u>Fransız Tipi DYAA Yapay Sulak Alan Sistemleri:</u>

Fransız tipi yapay sulak alan sistemleri DYAA yapay sulak alan sistemlerinin farklı bir versiyonu olarak Fransa'da ortaya çıkmıştır. Fransa'da 1987 yılından bu yana 2500'ün üzerinde Fransız tipi DYAA sistemi inşa edilmiştir. Bu sistemlerin en büyük üstünlüğü ön çökelmeye gerek duyulmadan ham atıksuyun sisteme verilebilmesidir. Genellikle iki kademeli olarak tasarlanan sistemler klasik sistem olarak bilinir. İkinci tip sistemler ise yüzey alanı ihtiyacını azaltmak amaçlı tasarlanan tek kademeli kompakt sistemlerdir.

(a) İki Kademeli (Klasik) Sistemler

İki kademeli sistemlerde birinci kademe birbirine paralel üç veya dört hücreden oluşurken, ikinci kademe iki veya üç hücreden meydana gelir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de iki kademeli Fransız tipi DYAA sulak alan sistemlerinin genel görünümü ve kesiti gösterilmiştir. Besleme fazında birinci kademedeki her bir hücreye atıksu verilir, bu faz 3-4 gün sürer. Daha sonra besleme fazının 2 katı kadar süre boyunca bu hücreler sırayla dinlenme fazına geçer. Beslenme ve dinlenme fazının kesikli döngüsü, filtreler üzerinde büyüyen mikroorganizmaların büyümelerinin kontrol altına alınması, aerobik şartların sağlanması ve birinci kademede biriken çamurun ayrışması açısından önem taşır. Birinci kademenin çıkış suyu daha ileri bir arıtma için ikinci kademeye verilir.

Şekil 4.40. Fransız tipi iki kademeli (klasik) DYAA sulak alan sisteminin plan görünümü [11]

Şekil 4.41. Fransız tipi iki kademeli (klasik) DYAA sulak alan sisteminin kesiti [12]

Birinci kademenin başlıca görevi askıda katı madde ve BOİ giderimi, ikinci kademenin görevi ise birinci kademede giderilememiş organik kirleticilerin giderimi ve nitrifikasyondur. Bu sistemlerde ikinci kademe sonunda çoğunlukla %90'ın üzerinde AKM ve BOİ giderim verimi elde edilmektedir. Etkin azot giderimi için, nitrifikasyonun gerçekleştiği ikinci kademenin ardından denitrifikasyonun gerçekleşebileceği bir sistem (Örneğin: YYAA yapay sulak alan) yerleştirmek gereklidir. Diğer DYAA sistemlerde olduğu gibi Fransız tipi sistemlerde de efektif bir fosfor giderimi gerçekleşmemektedir. Bu tip sistemler genelde eşdeğer nüfus (EN) hesabına göre tasarlanır. Tasarıma esas teşkil eden EN cinsinden kirlilik yüklerinin Fransa için belirlenmiş değerleri Tablo 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.22. Fransa için belirlenmiş EN kirlilik yükleri

Parametre	*Eşdeğer Nüfus Hesabında Kullanılan Yük*
Q (L/ gün.EN)	*150*
AKM (g/gün.EN)	*Birleşik sistem için: 90* *Ayrık sistem için: 60*
KOİ (g/gün.EN)	*120*
BOİ$_5$ (g/gün.EN)	*60*
TKN (g/gün.EN)	*15*
TP (g/gün.EN)	*2.2*

İlk kademenin yüzey alanı ihtiyacı 1,2-1,5 m^2/EN aralığında değişirken, ikinci kademenin yüzey alanı ihtiyacı ise 0,8-1,0 m^2/EN olarak belirlenmiştir. Birinci kademe 3-4 tabakalı çakıl malzemeden oluşurken, ikinci kademe 2-3 tabakalı kumdan oluşur. Birinci ve ikinci kademede kullanılan filtre malzemesinin özellikleri Tablo 4.23'te verilmiştir.

Tablo 4.23. Fransız tipi DYAA sulak alan sistemlerinde kullanılan filtre malzemelerinin özellikleri

	Klasik Sistem		*Kompakt Sistem*
	1. Kademe	*2. Kademe*	*Tek Kademe*
Alan İhtiyacı	*1,2-1,5 m^2/EN*	*0,8-1 m^2/EN*	*1,2-1,5 m^2/EN*
Filtre Malzemesi	*40-50 cm çakıl 2-8 mm* *15-20 cm çakıl 10-20 mm* *20 cm çakıl 20-40 mm*	*40 cm kum 0-4 mm* *15-20 cm çakıl 4-10 mm* *20 cm çakıl 10-20 mm*	*30 cm kiltaşı 2-4 mm* *20 cm çakıl 4-10 mm* *20 cm kiltaşı 0,5-4 mm* *10 cm çakıl 4-10 mm* *20 cm çakıl 10-20 mm*

Bu tip sistemlerde son derece düşük çamur oluşumu gözlenmektedir. Birinci kademede çamur birikme hızları 1-2 cm/yıl arasında değişmektedir. Buna göre, birinci kademedeki filtrelerin

üzerinde 50 cm civarında bir birikme payı bırakıldığı takdirde, biriken çamurun yaklaşık 10 yılda bir uzaklaştırılması yeterli olmaktadır. Bu durum diğer DYAA sulak alan sistemlerine göre işletme ve bakım kolaylığı açısından büyük avantaj sağlar.

(b) Kompakt Sistemler

Son yıllarda Fransız tipi DYAA sulak alan teknolojisi daha da geliştirilerek daha az yüzey alanına ihtiyaç duyan kompakt sistemler tasarlanmıştır. Kompakt sistemlerin tasarımı, klasik sistemdeki iki kademenin alt alta birleştirilmesi ve daha derin bir filtre oluşturulması prensibine dayanır. Şekil 4.42'te kompakt sistemlerin genel görünümü verilmiştir.

Şekil 4.42. Fransız tipi kompakt DYAA sisteminin genel görünümü [12]

Klasik sistemlerde iki kademenin toplam yüzey alanı 2 m^2/EN iken, kompakt sistemlerde üst tabakanın yüzey alanı 1,5 m^2/EN olacak şekilde tasarım yapılır. Bu tabakaya ilave olarak alt tabakanın yüzey alanının 1 m^2/EN olacağı düşünülürse, toplamda 2,5 m^2/EN efektif yüzey alanı elde edilmiş olur. Bu tip sistemlerde etkin bir doğal havalandırma sağlamak amacıyla dikey tabakaların arasına havalandırma boruları yerleştirilir (Şekil 4.43). Kompakt sistemlerdeki kirletici giderim verimleri iki kademeli sistemlerdeki giderim verimleri ile benzerlik gösterir.

Şekil 4.43. Fransız tipi kompakt DYAA sulak alan kesiti [13]

4.10.4.3. Sulak Alanların Maliyetleri

YAA yapay sulak alan sistemlerinin inşaat ve işletme maliyetleri SYA yapay sulak alan sistemlerine göre yaklaşık olarak %60 daha fazladır. Ancak arazi gereksinimleri daha az olduğu için buradan maliyet farkı kısmen de olsa dengelenebilmektedir. SYA ve YAA sulak alanların maliyet karşılaştırması Tablo 4.24'te görülmektedir.

Tablo 4.24. ABD'de yar alan bazı SYA ve YAA sulak alanların maliyetleri [3]

Yer	*Alan (ha)*	*Debi (m^3/s)*	*Hücre Sayısı*	*Geçirimsiz Membran*	*Maliyet ($\$/m^2$)*
		SYA Yapay Sulak Alanlar			
Arcata, CA	*3,0*	*66,2*	*3*	*Yok*	*10,12*
Gustine, CA	*9,8*	*22,8*	*24*	*Yok*	*12,27*
Ouray, CO	*0,9*	*8,7*	*4*	*Var*	*13,02*
W.J.C, MS	*20,2*	*54,8*	*7*	*Yok*	*3,44*
		YAA Yapay Sulak Alanlar			
Carville, LA	*0,3*	*3,4*	*1*	*Yok*	*52,64*
Mandeville, LA	*2,3*	*34,2*	*3*	*Yok*	*32,18*
Mesquite, NV	*1,9*	*9,1*	*12*	*Yok*	*32,83*
Sorrento, LA	*0,07*	*1,14*	*1*	*Yok*	*125,18*
Ten Stones, VT	*0,04*	*0,16*	*2*	*Var*	*89,66*

SYA ve YYAA sulak alan maliyetlerinin yüzey alanına bağlı değişimleri ise Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'da görülmektedir.

Şekil 4.44. SYA sulak alan maliyetlerinin yüzey alanına bağlı olarak değişimi (N = 84 sulak alan). M (x1000$) = $194A^{0.690}$, R^2 = 0,79 [9]

Şekil 4.45. YYAA sulak alan maliyetlerinin yüzey alanına bağlı olarak değişimi (N = 63 sulak alan). M (x1000$) = $652A^{0.704}$, R^2 = 0,75 [9]

Problemler.

Problem 4.1.

Endüstriyel atıksu arıtımı için aerobik tam karışımlı reaktör kullanılmaktadır. Aerobik reaktördeki biyokütle konsantrasyonu 2000 mg/L, biyolojik olarak ayrışabilir çözünmüş KOİ konsantrasyonu 2,4 mg/L'dir. K_s değeri 15 mg/L, k değeri 6 gün^{-1}, k_d değeri 0,10 gün^{-1}, Y değeri 0,45 olarak alınabilir. Net dönüşüm oranını belirleyiniz.

Çözüm.

$$Y_N = \frac{r_g'}{r_{Su}}$$

$$r_{Su} = -\frac{kXS}{K_s + S}$$

$$r_{Su} = \frac{6 * 2000 * 2{,}4}{15 + 2{,}4} = 1655{,}2\ \frac{g\ KO\dot{I}_{çöz}}{m^3 gün}$$

$$r_g' = Yr_{Su} - k_d X$$

$$r_g' = (0{,}45)(1655{,}2) - (0{,}10) * (2000) = 544{,}8\ g\ UAKM/m^3$$

$$Y_N = \frac{r_g'}{r_{Su}} = \frac{544.8}{1655{,}2} = 0{,}33\ \frac{g\ VSS}{g\ KO\dot{I}_{çöz}}$$

Problem 4.2.

Debisi 20000 m^3/gün olan ve ortalama 250 mg/L BOİ içeren evsel atıksu aktif çamur sisteminde arıtılacaktır. Çıkış BOİ$_5$ konsantrasyonu 20 mg/L'den düşük olacak şekilde, sıcaklığı 20ºC kabul ederek aşağıdaki şartları sağlayacak tesisi boyutlandırınız.

1. *Girişteki UAKM ihmal edilebilir.*
2. *Geri devir çamur konsantrasyonu= 10000 mg AKM/L; 8000 mg UAKM/L*
3. *Havalandırma havuzundaki uçucu askıda katı madde konsantrasyonu= 3500mg/L = 0,80∗toplam AKM*
4. *Çamur yaşı (θ_c)= 10 gün*
5. *Reaktörün hidrolik rejimi= Tam karışımlı*
6. *Kinetik katsayılar: Y = 0,65, k_d= 0,06 gün^{-1}, sıcaklık= 20ºC*
7. *Kabuller: Arıtılmış suda AKM konsantrasyonu 20 mg/L olup, bu değerin %80'i uçucu, %65'i biyolojik ayrışabilir karakterde olacaktır. Nihai BOİ'den BOİ$_5$'e dönüşüm faktörü 0,68 alınacaktır. k= 0,1 gün^{-1}'dir.*
8. *Atıksu mikroorganizma büyümesi için gerekli miktarda azot, fosfor ve diğer eser besi maddelerini içermektedir.*

Çözüm.

1. *Çıkışta çözünmüş BOİ değeri= Çözünmüş BOİ + Çıkıştaki biyokütlenin BOİ değeri*
   $20 = S + 20(0{,}65)(1{,}42)(0{,}68)$
   S = 7,4 mg/L çözünmüş BOİ$_5$
   Biyolojik arıtma verimi:
   $$E_s = \frac{250 - 7{,}4}{250} = 0{,}97$$
   Sistemin toplam verimi:
   $$E_s = \frac{250 - 20}{250} = 0{,}92$$
2. *Reaktör (havalandırma havuzu) hacminin hesaplanması:*
   $$XV = \frac{YQ\theta_c(S_0 - S)}{1 + k_d\theta_c}$$
   $$V * 3500 = \frac{0{,}65 * 20000 * 10 * (250 - 7{,}4)}{1 + 0{,}06x10}$$
   V = 5632 m^3

3. *Mikroorganizma çoğalma hızının hesaplanması:*

Gözlenen biyokütleye dönüşüm verimi:

$$Y_{göz} = \frac{Y}{(1 + k_d\theta_c)} = \frac{0,65}{1 + 0,06 * 10} = 0,406$$

Biyokütle çoğalma hızı:

$$Y_g * \theta_c(S_0 - S) = 0,406 * 20000 * (250 - 7,4) * 10^{-3} = 1970\ kg\ UKM/gün$$

4. *Reaktörden biyokütle uzaklaştırma hızının hesaplanması:*

Q_e = Q ve çıkış UKM = 20∗0,80= 16 mg/L alınarak:

Havalandırma havuzundan atılan (çekilen) çamur debisi:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_W X + Q_e X_e}$$

$$10 = \frac{5623 * 3500}{Q_W * 3500 + 20000 * 20 * 0,8}$$

$Q_w \approx$ 206 m^3/gün

Geri devir hattından uzaklaştırılan (çekilen) çamur debisi:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q'_W X + Q_e X_e}$$

$$10 = \frac{5623 * 3500}{Q'_W * 8000 + 20000 * 16}$$

$Q_w' \approx$ 206 m^3/gün

5. *Girişteki askıda katı madde konsantrasyonunu ihmal ederek reaktörde kütle dengesi hesabından geri devir oranının hesaplanması:*

X= 3500 mg/L

X_r = 8000 mg/L

$$X(Q + Q_r) = X_r(Q_r)$$

$$\frac{Q_r}{Q} = R = 0,78$$

6. *Havalandırma havuzundaki hidrolik bekletme süresinin hesaplanması:*

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{5632}{20000} = 0,28\ gün = 6,7\ saat$$

7. *Substrat kullanım hızı, F/M oranı ve hacimsel yük kontrolü:*

Özgül substrat kullanım (BOİ giderim) hızı:

$$U = \frac{S_0 - S}{\theta X}$$

F/M oranının hesaplanması:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\theta X}$$

$$U = \frac{250}{0.28 * 3500} = 0,255$$

Hacimsel yükün (LV) hesaplanması:

$$L_V = \frac{Q * S_0 * 10^{-3}}{V} \cong 0,90\ kg\ BOİ_5/m^3 gün$$

Problem 4.3.

Plastik dolgulu bir damlatmalı filtrenin çapı ve derinliği sırası ile 10 m ve 6,1 m olup, aşağıda özellikleri verilen ön çökeltim ünitesinden çıkan evsel atıksular bu sistemde arıtılmaktadır. (a) Hacimsel BOİ ve TKN yüklerini bulunuz. (b) Özgül TKN yükü ne kadardır? (c) T =20ºC'deki yaklaşık BOİ giderim verimi ne kadardır? (d)Bu şartlarda sistemde nitrifikasyon olması beklenir mi?

Ön çökeltim çıkışı özellikler:

Parametre	*Değeri*
Q (m^3/gün)	*4000*
Sıcaklık (ºC)	*15*
BOİ (mg/L)	*120*
AKM (mg/L)	*80*
TKN (mg/L)	*25*

Çözüm.

1. *Hacimsel yüklerin hesabı:*

$$V = \frac{\pi * 10^2}{4} * 6{,}1 = 479\ m^3$$

$$L_{BOİ} = \frac{Q * S_0}{V} = \frac{4000 * 0{,}120}{479} = 1\ kg\ BOİ/m^3 gün$$

$$L_{TKN} = \frac{4000 * 0{,}025}{479} = 0{,}21\ kg\ TKN/m^3 gün$$

2. *$L_{BOİ}$=1 kg BOİ/m^3gün, T =20ºC'de plastik dolgulu damlatmalı filtrenin beklenen verimi aşağıdaki grafikten ~%82 olarak bulunur.*

3. *$L_{BOİ}$= 1 kg/m^3gün>0,3 olduğundan nitrifikasyon gerçekleşemez.*
4. *Plastik dolgu malzemesi özgül yüzeyi S_a=90 m^2/m^3 alınarak özgül TKN yükü:*

$$\frac{4000 * 0{,}025}{90 * 479} = 2{,}3\ g\ TKN/m^2 g$$

Problem 4.4.

Bir kasabanın ön çökeltim uygulanmış evsel atıksuları (BOİ = 200 mg/L); iki kademeli taş dolgulu damlatmalı filtre sisteminde arıtılacaktır. Filtre çıkış suyundaki BOİ ≤ 25 mg/L olacaktır. Her iki filtrenin derinliği 1,83 m ve geri devir oranı 2 olduğuna göre gerekli filtre çaplarını bulunuz. (Debi= 7570 m^3/gün, T = 20ºC, filtre BOİ giderim verimleri E_1=E_2 alınacaktır)

Çözüm.

1. *Gerekli filtre verimlerinin hesabı:*

$$E_{top} = \frac{200 - 25}{200} = 0{,}875$$

$$E_1 + (1 - E_1) * E_2 = 0{,}875$$

$$E_1 = E_2 \cong 0{,}65$$

2. *Geri devir faktörü:*

NRC formülüne göre,

$$F = \frac{1+R}{(1+R/10)^2} = \frac{1+2}{(1+2/10)^2} = 2{,}08$$

3. *İlk filtrenin BOİ yükü:*

$$W_1 = Q\ S_0 = 7570 * 0{,}200 = 1514\ kg\ BO\dot{I}/g\ddot{u}n$$

4. *İlk filtrenin hacmi:*

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0{,}4432 * \sqrt{\frac{W_1}{V\ F}}}\ (NRC\ form\ddot{u}l\ddot{u})$$

$$0{,}65 = \frac{100}{1 + 0{,}4432 * \sqrt{\frac{1514}{V * 2{,}08}}} \rightarrow V = 476\ m^3$$

$$V = AxH \rightarrow A = \frac{476}{1{,}83} = 260\ m^2\ (D \approx 18{,}0\ m)$$

5. *İkinci kademe filtrenin BOİ yükü:*

$$W_2 = (1 - E_1) * W_1 = (1 - 0{,}65) * 1514 = 530\ kg\ BO\dot{I}/g\ddot{u}n$$

6. *İkinci filtrenin hacmi, benzer yolla:*

$V = 1345\ m^3$, $A = 735\ m^2$, $D = 31\ m$

İnşaat kolaylığı bakımından, hidrolik yük sınırı aşılmamak üzere bu tür filtrelerin eşit çaplı yapımı yoluna gidilir. Ancak bu durumda BOİ giderim verimleri eşit olmayacaktır.

Problem 4.5

Düzgün işletilmeyen bir paket arıtma sistemi çıkış suyunda 50 mg/L BOİ ve 30 mg/L AKM tespit edilmiştir. 200 m^3/gün debisine sahip sistemden sonra çıkış suyu kalitesini iyileştirmek için bir SYA sulak alan sistemi tasarlanması öngörülmüştür. Çıkış suyunda müsaade edilen BOİ ve AKM konsantrasyonları 20 mg/L olduğuna göre, bu deşarj limitlerini sağlayabilmek için gerekli olan SYA sulak alan yüzey alanını hesaplayınız.

Çözüm.

Tablo 4.20'de verilen tasarım kriterlerine göre BOİ < 20 mg/L hedefi için aşılmaması gereken maksimum alansal BOİ yükü 45 kg/ha.gün, AKM < 20 mg/L hedefi için aşılmaması gereken maksimum alansal AKM yükü ise 30 kg/ha.gün'dür.

Buna göre BOİ giriş yükü:

$$50\ mg/L * 200\ m^3/g\ddot{u}n * 1000\ L/m^3 * 1/10^6\ mg/kg = 10\ kg/g\ddot{u}n$$

BOİ için minimum SYA sulak alan yüzey alanı:

$A = 10\ kg/g\ddot{u}n/(45\ kg/ha\ g\ddot{u}n) = 0{,}22\ ha = 2200\ m^2$ *olarak hesaplanır.*

AKM giriş yükü:

$$30\ mg/L * 200\ m^3/g\ddot{u}n * 1000\ L/m^3 * 1/10^6\ mg/kg = 6\ kg/g\ddot{u}n$$

AKM için minimum SYA sulak alan yüzey alanı:

$A = 6\ kg/g\ddot{u}n/(30\ kg/ha.g\ddot{u}n) = 0{,}2\ ha = 2000\ m^2$ olarak bulunur.

BOİ giderimi içim gerekli minimum alan daha büyük olduğundan, tasarımı BOİ giderimine göre yapmak gerekir. Sulak alan sistemi, birbirine seri halde bağlanmış 3 hücre ve yine bu hücrelere paralel şekilde yerleştirilecek olan 3 hücreyle birlikte toplam 6 hücre olarak tasarlanacaktır. Seri bağlı hücrelerden ilki yoğun bitkili, daha sonra gelen açık alanlı ve en son hücre yine yoğun bitkili olacaktır. Bitkili hücrelerde su derinliği 0,6 m, açık alanlı hücrelerde ise 1,2 m seçilirse, sistemde ortalama su derinliği $h_{ort} = (0{,}6 * 2 + 1{,}2)/3 = 0{,}8\ m$ olarak hesaplanır. Bitkili hücrelerde porozite 0,75, açık alanlı hücrelerde ise 1 olarak kabul edilirse, ortalama porozite $p_{ort} = (0{,}75 * 2 + 1)/3 = 0{,}83$ olarak hesaplanır.

Ortalama debi, hesaplanan ortalama su derinliği ve ortalama porozite değerlerinden hidrolik bekletme süresi (HRT) aşağıdaki şekilde bulunur:

$$HRT = (A\ h\ p)/Q = 2200\ m^2 * 0{,}8\ m * 0{,}83 * 1\ g\ddot{u}n/200\ m^3 = 7{,}3\ g\ddot{u}n$$

Hidrolik bekletme süresinin her hücre için eşit olduğu durumda, her bir hücrede bekletme süresi $7{,}3 / 3 = 2{,}4$ *gün olarak hesaplanır. Bu değer açık alanlı hücrelerde alg patlaması olmaması için öngörülen maksimum hidrolik bekletme süresinden (3 gün) küçüktür ve uygundur.*

Açık alanlı hücrelerin toplam alanı:

$A_{açık} = 200\, m^3/gün * (1/1) * (1/1{,}2\, m) * 2{,}4 gün = 400\, m^2 (her\ biri\ \ 400/2 = 200 m^2)$

Yoğun bitkili hücrelerin toplam alanı:

$A_{bitkili} = 2200 - 400 = 1800 m^2\ (her\ biri\ \ 1800/4 = 450 m^2)$

SYA sulak alanlarda hücreler boyutlandırılırken uzunluk / genişlik oranının 3'ten büyük seçilmesi tavsiye edilir. Bu durumda açık alanlı hücreler $25\, m * 8\, m$ *boyutlarında, yoğun bitkili hücreler ise* $45\, m * 10\, m$ *boyutlarında tasarlanabilir.*

Problem 4.6

Problem 4.5'te tarif edilen SYA sulak alan sistemini Kadlec ve Wallace [9] tarafından verilen P-k-C^*metoduyla boyutlandırınız.

Çözüm.

P -k-C^* modeline göre:

$$\frac{C_e - C^*}{C_i - C^*} = \frac{1}{(1 + k/Pq)^P}$$

BOİ için ayrışma katsayısının ortalama değeri Kadlec ve Wallace (2008) tarafından k = 34 m/yıl olarak verilmiştir. Tablo 4.19'da BOİ için verilen C^*değerlerinin ise 2-8 mg/L arasında değiştiği görülmektedir. C^* için ortalama bir değer olarak 4 mg/L kabul edilir ve P=3 durumu için hesap yapılırsa, C_e= 25 mg/L, C_i= 50 mg/L için q = 0,104 m/gün olarak hesaplanır.

Buradan SYA sulak alan yüzey alanı,

$A = Q/q = 200\, m^3/gün/0{,}104\, m/gün = 1923\, m^2$ *olarak bulunur.*

Bu değer EPA metoduyla bulunan değerden (2200 m^2) biraz daha küçüktür.

Ortalama su derinlikleri ve porozite değerleri bir önceki problemde seçilen değerlerle aynı seçilirse, hidrolik bekletme süresi:

$HRT = (A\, h\, p)/Q = 1923\, m^2 * 0{,}8\, m * 0{,}83 * 1\, gün\ /\ 200\, m^3 = 6{,}4\, gün$

Hidrolik bekletme süresinin her hücre için eşit olduğu durumda, her bir hücrede bekletme süresi $6{,}4 / 3 = 2{,}1$ *gün olarak hesaplanır. Bu değer açık alanlı hücrelerde alg patlaması olmaması için öngörülen maksimum hidrolik bekletme süresinden (3 gün) küçüktür ve uygundur.*

Açık alanlı hücrelerin toplam alanı:

$A_{açık} = 200\, m^3/gün * (1/1) * (1/1{,}2\, m) * 2{,}1 gün = 350\, m^2 (her\ biri\ \ 350/2 = 175 m^2)$

Yoğun bitkili hücrelerin toplam alanı:

$A_{bitkili} = 2200 - 350 = 1850 m^2 (her\ biri\ \ 1850/4 = 463 m^2)$

Uzunluk / genişlik oranı > 3 için: Açık alanlı hücreler $30\, m * 6\, m$ *boyutlarında, yoğun bitkili hücreler ise* $40\, m * 12\, m$ *boyutlarında tasarlanabilir.*

Problem 4.7

600 mg/L BOİ ve 100 mg/L AKM içeren 30 m^3/gün debisine sahip bir atıksu deşarjının alıcı ortam için öngörülen 30 mg/L BOİ ve 30 mg/L AKM deşarj limitlerini sağlayabilmesi için bir YYAA sulak alan sistemi tasarlanacaktır. Kullanılacak filtre malzemesinin porozitesinin 0,35 olduğu kabulüyle ve su derinliği 0,4 m olacak şekilde YYAA sistemini tasarlayınız.

Çözüm.

Tablo 4.21'de verilen tasarım kriterlerine göre BOİ < 30 mg/L hedefi için aşılmaması gereken maksimum alansal BOİ yükü 6 g/m^2.gün, AKM < 30 mg/L hedefi için aşılmaması gereken maksimum alansal AKM yükü ise 20 g/ m^2.gün'dür.

Buna göre BOİ giriş yükü:

$600\, mg/L * 30\ m^3/gün * 1000\ L/m^3 * 1/1000\, g/mg = 18000\, g/gün$

Minimum YYAA sulak alan yüzey alanı,

$A = 18000\, g/gün/6\, g/m^2 gün = 3000 m^2$

AKM giriş yükü:

$100\, mg/L * 30\, m^3/gün * 1000\, L/m^3 * 1/1000\ g/mg = 3000\, g/gün$

Minimum YYAA sulak alan yüzey alanı:

$A = 3000\ g/gün/6\ g/m^2 gün = 500 m^2$

BOİ giderimi için gerekli minimum alan daha fazla olduğundan bu alana göre hesap yapılacaktır. Bu alanın %30'u birincil arıtma bölgesi, kalan %70'lik kısmı ise ikincil arıtma bölgesi olarak tasarlanacaktır.

Birincil arıtma bölgesi alanı,

$A_b = 0{,}3 * 3000 = 900\, m^2$

İkincil arıtma bölgesi alanı,

$A_i = 0{,}7 * 3000 = 2100\, m^2$

Filtre yatağı genişliği hesaplanırken Darcy Kanunu'ndan yararlanılır. Arıtma bölgesinde tavsiye edilen filtre malzemesi dane çapı 20-30 mm'dir, bu özellikteki malzeme için temiz durumdaki hidrolik iletkenlik 100 000 m/gün kabul edilebilir. Bu durumda hesaba esas teşkil eden hidrolik iletkenlik (K), Tablo 4.21'den birincil arıtma bölgesi için temiz K'nın %1'i olacaktır:

$K_b = 0{,}01 * 100\,000 = 1000\, m/gün$

Birincil arıtma bölgesindeki hidrolik yük kaybının filtre yatağı derinliğinin %10'ununu geçmemesi tavsiye edilmektedir.

Buradan, aşılmaması gereken hidrolik yük:

$0{,}1 * 0{,}4 = 0{,}04\, m$ *olarak hesaplanır. Darcy Kanunu'na göre:*

$$Q = K_b\, W\, d_w\, \frac{\Delta h_b}{L_b}$$

Bu denklemden:

$$W^2 = \frac{A_b\, Q}{K_b\, d_w\, \Delta h}$$

Burada,

- W : *Filtre yatağının genişliği (m)*
- Q : *Debi (m^3/gün)*
- A_b : *Birincil arıtma bölgesinin alanı (m^2)*
- K_b : *Birincil arıtma bölgesindeki "kirli" durumdaki hidrolik iletkenlik (m/gün)*
- d_w : *Su derinliği (m)*
- Δh_b : *Birincil arıtma bölgesindeki hidrolik yük kaybı (m)*

Verilen değerler denklemde yerine konulduğunda:

$$W^2 = \frac{900 * 30}{1000 * 0{,}4 * 0{,}04}$$

W = 41,1 m olarak hesaplanır.

Birincil arıtma bölgesinin uzunluğu:

$L_b = A_b \ / \ W \ = \ 900 \ / \ 41{,}1 \ = \ 21{,}9 \, m$

İkincil arıtma bölgesinin uzunluğu:

$Li \ = \ A_i / \ W \ = \ 2100 \ / \ 41{,}1 \ = \ 51{,}1 \, m$

Bu *uzunluklara 2 m'lik giriş çökelme zonu uzunluğu ve 1 m'lik çıkış zonu uzunluğu eklendiğinde,* toplam uzunluk *76 m olacaktır. Dolayısıyla, tasarlanan hücrenin 76 m uzunluğunda ve 42* m *genişliğinde olması uygundur.*

KAYNAKLAR

[1] Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill.

[2] Balman, A. H., Balman, V. (2002). Çevre Kirliliği Kontrolünde Atıksu Arıtımı (Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse), (Editör: Soli J. Arceivala) (Tata McGraw-Hill Publishing, New Delhi, India), Ankara, Türkiye.

[3] Orhon, D., Artan, N. (1994). Modelling of Activated Sludge Systems, Technomic Publication, Pennsylvania, USA.

[4] Grady, C. P. L. , Daigger, G.T. ,Lim, H.C. (1999). Biological Wastewater Treatment, 2. baskı, Marcel Dekker Inc., New York, USA.

[5] Vesilind, A. P. (2003). Wastewater Treatment Design, Water Environment Federation, IWA Publishing, USA.

[6] İleri, R. (2000). Çevre Biyoteknolojisi, Değişim Yayınları, Adapazarı, Türkiye.

[7] Muslu, Y. (1998). Çevre Biyoteknolojisi, 1. baskı, İTÜ, İstanbul, Türkiye.

[8] Qasim, S. R. (1999). Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operation. Lancaster, Pa. : Technomic Pub. Co.

[9] Kadlec, R. H. and Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.

[10] Vymazal J., Brix H., Cooper P. F., Green M. B., Haberl R. (1998). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. Backhuys Publishers. Leiden, Netherlands.

[11] European Commission, 2001. Extensive Wastewater Treatment Processes adapted to small and medium sized communities (500 – 5,000 PE), International Office for Water, Luxembourg.

[12] Paing, J. ve Voisin, J. (2005). Vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater and septage treatment in French rural area. Water Sci. Tehnol 51: 145-155.

[13] Troesch, S. ve Esser, D. (2012). Constructed Wetlands for the Treatment of raw Wastewater: the French Experience. Sustainable Sanitation Pratice. (12):9-15.

[14] Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (2010). Sayı: 27527, Resmi Gazete, Çevre ve Orman Bakanlığı, Türkiye.

[15] EPA, (2000). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R -99/010, Cincinnati, OH.

[16] Karpuzcu, M. E, Sedlak, D. L., Stringfellow, W.T. (2013). Biotransformation of chlorpyrifos in riparian wetlanDSİn agricultural watersheds: implications for wetland management. Journal of Hazardous Materials, 244-2, 111-120.

[17] Karpuzcu, M. E. and Stringfellow, W. T. (2012). Kinetics of nitrate removal in wetlands receiving agricultural drainage. Ecological Engineering, 42, 295-303.

[18] Mitsch, W. J. And Gosselink, J. G. (2000). Wetlands, 3rd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.

[19] Molle, P., Lienard, A., Boutin, C., Merlin, G., Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. Water Science and Technology, 51-9,11-21.

TUZLA BİYOLOJİK ve İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ

5. KÜÇÜK ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk*

5.1. Genel

Dünya genelinde nüfusun önemli bir kısmı (asgari %15-25'i) merkezi atıksu kanalizasyon şebekesi bulunmayan tekil (müstakil) ve/veya küçük yerleşimlerde (N<2000 kişi) yaşamaktadır. Bu oran Türkiye'de %23,2 civarındadır. Büyük çoğunluğu belediye sınırları dışında yer alan bu tür kırsal (küçük) yerleşimlerde sağlıklı atıksu yönetimi (kanalizasyon ve arıtma hizmetleri) çok önemli bir sorun teşkil etmektedir. Gelişmiş ülkeler dışında, atıksu kanalizasyon ve arıtma altyapısının genelde sınırlı ve yetersiz olduğu bu tür yerleşimlerde kurulu tesislerde de yetersiz tasarım, düşük inşaat kalitesi ve yetersiz işletme sorunları öne çıkmaktadır.

Küçük (kırsal) yerleşimler, genellikle aralarında önemli mesafeler bulunan az sayıda ve dağınık tekil konutlardan oluştukları için merkezi atıksu kanalizasyon, arıtma ve uzaklaştırma sistemi kurulması çok zor, pahalı ve pratik değildir. Bu bakımdan son yıllarda, söz konusu tekil ve küçük yerleşim alanlarındaki planlama, tasarım, yapım ve yönetimi giderek önemini arttıran önemli bir faaliyet kolu halini almıştır. Bu bölümde, tekil evler, küçük ev grupları, siteler, yerleşim birimleri ve ticari işletmeler için uygulanabilir yerinde atıksu arıtma sistemlerinin planlama, tasarım, yapım ve yönetim esasları üzerinde durulacaktır.

5.1.1. Küçük (Kırsal) Yerleşimlerde Atıksu Yönetim Sorunları

Türkiye'de nüfusu 1500 (maks. 2000) kişiden az küçük (kırsal, köy) yerleşim birimlerinin sayısı 18.247 olup ülke nüfusunun %6,7'sine karşılık gelmektedir. Söz konusu yerleşimler merkezi atıksu toplama ve arıtma sistemlerinin kurulumunun mantıklı ve pratik olmadığı bir dizi mali, teknik ve stratejik sorunlarla karşı karşıyadırlar. Öne çıkan temel sorunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [1]:

- Atıksuların yüzeysel sulara deşarjında, belediye (büyük) yerleşimleriyle aynı deşarj standartları geçerlidir.
- Gelir düzeyi ve nüfus yoğunluğunun düşük olması dolayısıyla kanalizasyon ve arıtma altyapısı için finansman temini imkanları kısıtlıdır.
- Nüfusun geniş bir alana yayılmış olması (birbirinden uzak tekil evler) dolayısıyla atıksu toplama (kanalizasyon) sistemi kurulum maliyeti yüksek, işletimi de sorunludur.
- Atıksu toplama, arıtma ve uzaklaştırma sistemlerinin yatırım ve işletme maliyetleri, büyük kapasiteli tesislere göre, çok yüksektir.
- Yerinde/küçük arıtma sistemlerinde, büyük tesislerdeki ölçek ekonomisinin sağladığı faydalar bulunmamaktadır. Örneğin 100 kişilik bir nüfusa hizmet veren küçük bir AAT'nin kişi başına maliyeti, 100000 kişilik bir AAT'ne göre 2-4 kez daha yüksektir.

5.1.2. Küçük Yerleşimler için Atıksu Toplama, Arıtma ve Uzaklaştırma Sistemi Seçim Stratejileri

Küçük arıtma sistemleri (genelde N≤2000 kişi) iki ana sınıf içinde incelenebilirler:

(1) Kanalizasyonsuz olanlar
(2) Kanalizasyon şebekesi bulunan yerleşimler.

Bu iki grup için kullanılacak atıksu debisi, jeolojik yapı, zemin özellikleri ve yüzeysel sulara deşarj seçeneklerine göre büyük farklılıklar gösterebilir.

---

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Atıksu kanal şebekesinin mevcut olmadığı alanlarda yerinde atıksu arıtma ve uzaklaştırma seçenekleri kullanılmak durumundadır. Kanalizasyonlu alanlarda ise yerleşim birimi atıksuları mevcut kanal şebekesi ile toplanıp arıtma tesisi sahasına iletebileceği için, küçük nüfuslu belediyelerin evsel atıksularının arıtımında kullanılan arıtma, uzaklaştırma ve yeniden kullanım teknolojilerinden yararlanılabilmektedir.

Yerinde arıtma ve uzaklaştırma seçenekleri seçiminde üç temel adımı içerek bir strateji uygulanır:

(1) Atıksu karakterizasyonu ve nüfus büyüklüğünün belirlenmesi
(2) Yer (arazi) incelemesi ve yerinde atıksu uzaklaştırma sistemi seçimi
(3) Atıksu karakteristikleri ve uzaklaştırma seçeneklerine en uygun/etkin arıtma teknolojisinin seçimi.

Hedeflenen maksada uygun bir arıtma ve uzaklaştırma sisteminde aranan öncelikli kriterler halk sağlığının korunması ve çevre kalitesinin kötüleşmesinin önlenmesidir.

5.1.3. Atıksu Miktar ve Özellikleri

Ortalama ve Pik Debiler: Arıtma tesislerinde ölçülen tipik birim atıksu debileri 150-250 L/N gün aralığında değişmektedir. Tasarıma esas ortalama atıksu debisi 170-200 L/N.gün alınabilir. Daha önce Bölüm 1'de de belirtildiği üzere, küçük yerleşimlerde debi değişkenliği, büyük yerleşimlere kıyasla çok yüksektir. Maksimum saatlik debi günlük ortalama debinin 4-8 katı değerler alabilir. Tekil binalarda maksimum gün, hafta veya aylık akım pik faktörü de, küçük yerleşimlerdekinin 1,5-4 katı değerlere ulaşabilir.

Atıksu Özellikleri: Küçük yerleşimlerde oluşan atıksuların özellikleri, meskun mahallerden gelen atıksuların tipik karakteristiklerini yansıtır. Bu tür yerleşimlerden kaynaklanan tipik genel atıksu karakteristikleri için Tablo 5.1'deki değerler esas alınabilir [1];

Tablo 5.1. Evsel atıksuların tipik özellikleri

Parametre	*Kirlilik yükü (g/N. gün)*	*Konsantrasyon (mg/L)*
TKM	*115 – 117*	*680 – 1000*
UKM	*65 – 85*	*380 – 500*
AKM	*35 – 50*	*200 – 290*
UAKM	*25 – 40*	*150 – 240*
BOI_5	*35 – 50*	*200 – 290*
KOI	*115 – 125*	*680 – 730*
TKN	*6 – 17*	*35 – 100*
TP	*1 – 4*	*6 – 24*
Toplam koliform (ad/100 mL)	$10^{11} – 4*10^{12}$	$10^{7} – 10^{9}$

Lokantalardan gelebilecek yağ-gres ile çamaşırhane kaynaklı kumaş elyaflarına karşı özel önlem (yağ tutucu, elyaf tutucu ızgara vb.) alınmalıdır.

5.1.4. Arazi İncelenmesi ve Yer Seçimi

Atıksuyun deşarj edeceği zemin ortamı, yerinde arıtma ve atıksu uzaklaştırma sisteminin en önemli unsurudur. Mevcut uygun bir zemin ortamı iyi kullanılabilirse asgari maliyetle çok iyi arıtma sağlanabilir. Zemin ortamının absorplayabileceği (sızdırabileceği) miktarın aşılması durumunda ise yerinde arıtma sistemi iyi çalışamaz. Bu yüzden saha araştırmaları yerinde arıtma sisteminin en önemli kısmıdır.

(a) Ön Araştırmalar

Saha araştırmalarının gayesi atıksuların arıtılıp uzaklaştırılması maksadıyla kullanılabilecek potansiyel sahaların özelliklerinin belirlenmesidir. İyi bir zemin araştırması ile en uygun atıksu

arıtma ve uzaklaştırma sistemi için kullanılabilecek yapılabilirliği olan seçenekler ana hatlarıyla ortaya konabilir. Bu konuda sistematik bir yaklaşım izlenmelidir. Atılması gereken ilk adım saha ile ilgili mevcut veri ve bilgilerin derlenmesidir. Sonra saha ve yakın çevresinin haritası alınır. Haritanın ölçeği, binalar, yapay oluşumlar, topografik yapı, zemin tipi, arazi kullanımı durumunu yansıtabilecek mertebede (1/5000 – 1/2000) olmalıdır. Saha ön araştırmalarında yer alması gereken bilgiler Tablo 5.2'de özetlenmiştir.

Tablo 5.2. Saha incelemesinde derlenmesi gerekli bilgiler

Başlık/Konu	***Bilgi ve Kaynaklar***
Müşteri sözleşmesi	*Sahanın yeri ve özellikleri, sahibi, mevcut arazi kullanımı ve öngörülen tesisin tipi*
Atıksu karakteristikleri	*Debi; yağ-gres içeriği, yüksek organik maddelerin varlığı*
Ön değerlendirme	*Zemin tipi, jeoloji ve topografyasının belirlenmesi. Zemin durumu, arazi kullanımı, zemin iklim verileri ve taşkın riskini anlamayı sağlayacak alansal/uydu görüntülerin elde edilmesi. Zemin özelliklerinin daha iyi tanımlanmasını sağlayacak sondaj verileri, geoteknik raporlar. Zemin absorplama (sızdırma) kapasitesiyle ilgili değerlendirmeler.*
Bilgi kaynakları	*MGM, MTA, DSİ, Belediyeler, Üniversite Araştırma Raporları ve Tezler.*

(b) Arazi (Zemin) Testleri

Arazi etütlerinde dikkate alınması gereken ana faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir: (1) görsel inceleme (2) eğim (3) zemin karakteristiklerinin tanımlanması (4) sızdırma testleri ve (5) hidrolojik özellikler. Bu faktörler aşağıda ana hatlarıyla açıklanmaktadır.

Görsel inceleme (tetkik): Görsel tetkikin gayesi, incelenen alanda potansiyel zemine sızdırma alanı olarak kullanıma uyun bir alt bölgenin mevcut olup olmadığının belirlenmesidir. Bu kapsamda arazinin topografik ve zemin yapısı (özellikleri) ile bitki türleri incelenerek not edilir. Potansiyel zemine sızdırma alt bölgesinin (lot), akarsu, gölet ve kıyılar ile binalara ve diğer yapılara olan mesafeleri harita üzerine işaretlenir. Arıtılmış atıksuların zemine sızdırabileceği, yeterli ve uygun nitelikte bir alt bölgenin tespit edilememesi durumunda diğer sahalara geçilir.

Eğim: İncelenen alanın eğim tipi ve derecesi drenaj durumunu gösterir. Büyük alanlarda, tesviye eğrilerine ihtiyaç duyulur.

Zemin Özelliklerinin Tanımlanması: Zemin özelliklerinin incelenmesi ve tanımlanabilmesi için gerekli en önemli veriler mevcut sondaj loğları ve muayene kuyularından elde edilir. Zeminin hidrolik özellikleri ve atıksuları arıtım kapasitesinin değerlendirilebilmesi için; (a) zemin bünye özellikleri, (b) zemin yapısı, (c) zemin rengi, (d) mevsimsel olarak suya doygunluğu, (e) geçirimsiz tabakların yeri, (f) killerin şişme basıncı ve (g) birim hacim ağırlığının bilinmesi gerekir.

Zemin bünye özellikleri (texture), zeminlerin boşluk büyüklüğü, dağılımı ve sürekliliğini yansıtan en önemli fiziksel özelliktir. Çapları < 2 mm olan zemin partiküllerinin rölatif oranı ile ifade edilir ve ıslak zemin başparmak ve diğer dört parmak arasında ufalanarak belirlenir. Zeminlerin dane boyutu ve bünye özelliklerine göre sınıflandırma kartı Şekil 5.1'de verilmiştir. Atıksu uzaklaştırma alanı veya yatağı olarak kullanılacak zeminlerde aranan yer seçim kriterleri de Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

Kum – çapı 2.0 ile 0.05 mm arasında
Silt – çapı 0.05 - 0.002 mm arasında
Kil – çapı 0.002'den küçük

PARTİKÜL BOYUT ARALIKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Şekil 5.1. Zemin sınıflandırma kartı (ABD Tarım Departmanı) ve partikül boyutu ölçeklerinin karşılaştırılması [1]

Tablo 5.3. Bertaraf alanları ve sızdırma yataklarının kullanımı için tipik alan kriterleri

Özellik	
Peyzaj konumu [a]	*Seviye, iyi drene edilmiş alanlar, yamaçların kretleri ve içbükey yamaçlar daha çok tercih edilir. Uygun yüzey drenajı sağlanmadığı müddetçe çöküntü, yamaç düzlemleri ve konkav yamaçlardan kaçınılmalıdır.*
Eğim [a]	*%0 ile 25 arasında. %25'i geçen eğimler kullanılabilir olmakla birlikte inşa makinalarının çalışmasını sınırlayabilir. Sızıntı yatak sistemleri %0 ila 5 arasında sınırlandırılmıştır.*
Tipik yatay ayırma mesafeleri [b]	
Su temin kuyularına	*16-33 m*
Yüzeysel sular, pınarlara	*16-33 m*
Eğimli yüzeyler, yapay şevlere	*3-6 m*
Mülkiyet sınırına	*1,5-3 m*
Yapı temellerine	*3-6 m*
Zemin	
Bünye özelliği	*Kumlu veya topraklı zeminler en uygun olanlardır. Açık gözeneklere sahip çakıllı ve taşlı zeminler ile yavaş geçirgenlikli kil zeminler ise daha az tercih edilmektedir.*
Yapı	*Güçlü granüler, bloklu veya prizmatik yapılar tercih edilirken, düz ve şekilsiz zemin yığınlarından kaçınılmalıdır.*
Renk	*Parlak üniform renkler, iyi drene olmuş ve iyi havalandırılmış zeminin göstergesidir. Mat, gri veya benekli zeminler ise sürekli veya dönemsel doygunluğu göstermekte olup, uygun değildir.*
Katman	*Belirgin dokusal ve yapısal farklılıklar gösteren zeminler, su hareketinin kısıtlanmaması bakımından dikkatlice değerlendirilmelidir.*
Doymamış (vadoz) bölge derinliği	*Bertaraf alanı ile dönemsel yüksek yeraltı su tablasının ya da ana kayanın arasında 0,6-1,2 m arasında suya doymamış (kuru) toprak bulunmalıdır.*

[a] *Eğimsiz taraftaki şev derinliğinden dolayı, sızıntı yatakları için peyzaj konumu ve eğimi daha kısıtlayıcıdır.*
[b] *Yönlendirme amacına yöneliktir. Yerel kurallara, topografyaya, zemin geçirgenliğine, yeraltı suyu eğimine, jeoloji vb. etmenlere göre gerekli güvenli mesafe, alandan alana değişir.*

Sızdırma Testi: Atıksu sızdırma alanları tasarımında zemin hidrolik iletkenliği önemli bir parametredir. Hidrolik iletkenliğin arazide tayininde en yaygın olarak kullanılan test sızdırma testidir. Uygun şartlarda gerektiği gibi yapıldığında, sızdırma testi yöntemi aşağıdaki gibi özetlenebilir [1]:

(1) Önerilen sızdırma alanında en az 3 test yapılmalıdır.
(2) Sızdırma hendeklerinin yapımının planlandığı derinliğe kadar ulaşan derinlikte 15 cm çaplı bir test kuyusu açılır, duvarlardan dökülen gevşek toprak materyal temizlenir.
(3) Kuyu tabanına 1,2-1,8 cm çaplı ~5 cm kalınlıklı çakıl tabakası konur.
(4) Kuyu 0.30 m su ile doldurulur ve su derinliği asgari 4 sa, tercihen bir gece boyunca sabit tutulacak şekilde su eklenir.
(5) Sızdırma deneyleri başlangıçtan itibaren 15-30 saatlik zaman sonra (tercihen 24 sa sonra) başlatılır. Deney öncesi kuyu duvarlarından tabandaki çakıl tabakası üzerine dökülen gevşek toprak materyal temizlenir, çakıl tabakası üzeri 15 cm su ile doldurulur.
(6) Kuyu 15 cm suyla doldurulduktan hemen sonra 30 dk'da bir seviye (düşüşleri) ölçümleri başlatılır.

Her ölçüm sonrası kuyudaki su seviyesi su eklenerek yeniden 15 cm'ye ayarlanır (yükseltilir). Test en son iki ardışık seviye düşüşü gözleninceye kadar aynı şekilde

devam ettirilir. En son seviye düşüşü esas alınarak, suya doygun zemin şartlarındaki hidrolik iletkenlik hesaplanır. Sahanın ortalama hidrolik iletkenliği, 3 ayrı sızdırma testi ile belirlenen anlamlı (temsili) değerlerin ortalaması alınarak bulunur.

(7) Kumlu zeminlerde su seviyesi 30 dk'dan kısa bir sürede ≥15 cm düşerse, seviye okumaları 1 saat süreyle 10 dk'da bir yapılır ve son 10 dk'daki seviye düşüşü, hidrolik iletkenlik hesabında esas alınır.
(8) Sızma hızı dk/cm olarak ifade edilir.
(9) Planlanan sızdırma sahasının farklı noktalarında yürütülen sızdırma testleriyle bulunan sızma hızları arasındaki fark çok büyük (>7,8 dk/cm) ise aritmetik ortalama alınamaz.

Çeşitli zemin tipleri için tahmin edilen sızma hızları Tablo 5.4'te özetlenmiştir.

Tablo 5.4. Çeşitli zemin yapıları için tahmini sızma hızları

	Sızma Testi		***Geçirgenlik***		***Sızma Hızı***	
Zemin Yapısı	***dk/cm***	***dk/in***	***cm/sa***	***in/sa***	***L/ m^2.sa***	***gal/ft^2.sa***
Kum	*<4*	*<10*	*>15*	*>6.0|*	*>150*	*>3,7*
Kum lemleri, gözenekli kil lemleri	*4-25*	*10-64*	*2,5-15*	*1,0-6,0*	*25-150*	*0,6-3,7*
Sıkıştırılmış silt lemleri, siltli kil lemi	*25-60*	*64-150*	*1-2,5*	*0,5-1,0*	*10-25*	*0,3-0,6*

Hidrolojik karakteristikler: Hidrolojik inceleme arazi etütlerinin önemli bir bileşenidir. Bu kapsamda yeraltı suyu tabakası (akifer) derinliği, yeraltı suyu akımının yönü ve hidrolik eğimi, zeminin hidrolik iletkenlik (permeabilite/geçirgenlik) katsayısı ile arazinin özümleme veya absorpsiyon kapasitesi belirlenir. Atıksu uzaklaştırma alanının özümleme kapasitesi; zeminin, ön arıtmadan geçirilerek araziye uygulanan atıksuları, yağışlı mevsimlerde YAS tabakası üzerinde ilave bir seviye yükselmesine yol açmadan güvenli bir şekilde sızdırma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Atıksu uzaklaştırma sahasının düşey ve yatay yönde sızması, suyun bitkiler tarafından kullanımı ile terleme ve buharlaştırma mekanizmalarınca kontrol edilir. Gözenekli ortamlarda yeraltı suyu akımı Darcy kanunu ile ifade edilir:

$$V = k\,j \tag{5.1}$$

Burada,

V : yeraltı suyu akımı hızını (m/gün)
k : zeminin hidrolik iletkenlik veya permeabilite katsayısını (m/gün)
J : YAS yüzeyinin hidrolik eğimini (m/m)

göstermektedir. Yeraltı suyu akımı debisi (Q, m^3/gün) ve A akıma dik alanı (m^2) göstermek üzere;

$$Q = A\,k\,j \tag{5.2}$$

eşitliğinden bulunabilir.

Atıksu Uzaklaştırma Alanı Performansı: Çürütme tankı (septik tank) veya diğer ön arıtma sistemlerinden çıkan ve uzaklaştırma alanına verilen atıksular, vadoz bölgedeki taşınım esnasında bir seri fiziko-kimyasal ve biyolojik süreçlerin etkisiyle ilave arıtmaya maruz kalır. Atıksu uzaklaştırma alanındaki gözenekli zemin ortamı, sürekli atıksu deşarjı halinde batmış anaerobik filtre, kesikli deşarj (besleme) halinde ise anaerobik – aerobik filtre gibi çalışır. Bu yüzden uzaklaştırma alanı performansı atıksu uygulama şekli ve kalitesine (kirlilik durumu) bağlıdır. Atıksuyun vadoz bölgedeki zemin ortamında arıtımı iki farklı durum için incelenebilir:

(1) çürütme tankı çıkışının sahaya cazibeyle sürekli beslenmesi, (2) atıksuyun sahaya kesikli olarak verilmesi.

Çürütme Tankı Çıkışından Cazibe ile Besleme: Çürütme tankı çıkışının uzaklaştırma alanına cazibeyle kesikli olarak verilmesi halinde vadoz bölgede genellikle anaerobik şartlar oluşur. Zemin partikülleri yüzeyi ile boşluklarında bir tür biyolojik tabaka (biyokütle) oluşur ve bu durum sızmayı azaltır ancak organik atıkların mineralizasyonunu hızlandırır.

Demir, alüminyum ve kalsiyum gibi mineraller sülfür ve fosfat bileşikleri halinde çökelir. Biyokütle ile kaplı vadoz bölgenin uzun dönemdeki hidrolik kapasitesi beslenen sıvı akımının hareketi (sızması) ile kontrol edilir. Bu durum uzun dönemde emniyetli hidrolik yükleme (besleme) hızı (LTAR) olarak da ifade edilir. LTAR değerinin 40-120 L/m^3.gün aralığında değiştiği rapor edilmektedir [1].

Kesikli besleme: Ön arıtmadan geçen atıksuların bir dozlama sifonu veya pompa vasıtası ile uzaklaştırma alanına kesikli olarak verilmesi, oldukça uygun çevresel şartların oluşmasını sağlar. Vadoz bölgede atıksu besleme anında; suyun uzaklaştırma alanına müteakip sızma dönemi sonrası zemin/sızdırma yatağı ortamında ağırlıklı olarak aerobik, yer yer anaerobik şartlar oluşur. Atıksuyun gözenekli ortamda arıtımı daha hızlı bir biçimde gerçekleşir ve biyolojik tabaka cazibeli besleme halindeki kadar sızmayı engelleyici rol oynayamaz. Bunun bir sonucu olarak uzaklaştırma alanına daha yüksek LTAR değerleri uygulanabilmektedir. Bu yüzden gerekli atıksu uzaklaştırma alanı ihtiyacı azalır ve gözenekli ortamın arıtma performansı önemli derecede iyileşir. Atıksu uzaklaştırma alanında oldukça önemli oranlarda nitrifikasyon ve denitrifikasyon da gerçekleşebilir.

Atıksu sızdırma hendekleri ve sızdırma yatakları taban ve yan yüzeylerinden sızdırılabilecek atıksu miktarlarının hesabında esas alınabilecek hidrolik yük değerleri Tablo 5.5'te verilmiştir [1].

Tablo 5.5. Atıksu sızdırma hendekleri ve sızdırma yatakları taban ve yan yüzeylerinden sızdırılabilecek atıksu miktarlarının hidrolik yük değerleri

Zemin Yapısı	*Sızdırma Testi (dk/cm)*	*Hidrolik Yükleme Hızı (L/ m^2.dk)*
Kumlu zemin	*<4*	*>48*
Kum lemleri, gözenekli silt	*4-25*	*12-48*
Sıkıştırılmış silt lemleri, siltli kil lemi	*25-60*	*5-12*

Uzaklaştırma Alanlarının Sınıflandırılması: Atıksu uzaklaştırma alanlarının beklenen performansla uzun dönemler boyunca kullanımı çeşitli doğal ve tasarlanmış şartlara bağlıdır. Konu ile ilgili olarak öne çıkan başlıca faktörler; (1) çıkış suyu kalitesi, miktarı (Q) ve uygulama şekli, (2) zemin yüzeyi eğimi, (3) alanın büyüklüğü, bina temelleri ve su kuyularına mesafe, (4) yeraltı suyu tabakası derinliği ve özümleme kapasitesi, (5) geçirimli zemin tabakası kalınlığı, (6) çatlaklı kaya formasyonlarının varlığı ve (7) iklim olarak sıralanabilir. Çoğu atıksu uzaklaştırma alanı aşağıdaki üç gruptan biri içinde yer alır:

1. Çürütme tankı veya başka tür bir ön arıtmadan geçen atıksuların üzerine uygulandığı normal saha şartları,
2. Daha iyi arıtma ve atıksu uygulama sistemleri gerektiren zor arazi şartları,
3. Özel sistemler gerektiren elverişsiz arazi şartları.

Söz konusu üç tür arazi durumu için gerekli arıtma, sahaya uygulama ve nihai uzaklaştırma ihtiyaçları Şekil 5.2'de, atıksu uzaklaştırma sahaları için gerekli şartlar ise Tablo 5.6'da özetlenmiştir [1].

Şekil 5.2. Arazi şartları için gerekli arıtma, sahaya uygulama ve nihai uzaklaştırma ihtiyaçları

Tablo 5.6. Atıksu uzaklaştırma sahaları için gerekli şartlar

Gereklilikler	***Normal Alan***	***Zor Alan***	***Elverişsiz Alan***
ABD Tarım Bakanlığınca belirtilen zemin bünye yapısı	*Kaba orta danecikli kum, ince kum, kum lemi, gözenekli silt lemi*	*Siltli kil, lem, gözenekli silt lemi, siltli kil lemi*	*Killer, kollaidal killer, genleşmiş (şişmiş) killer*
Sel (taşkın)	*Gerçekleşmez, korumalı*	*Nadir*	*Yaygın*
Eğim, %	*0-8*	*8-15*	*>15*
Ana kayaya olan derinlik, m	*>2*	*1-2*	*<1*
Bertaraf alanı altındaki YAS derinliği, m	*>2*	*1-2*	*<1*
Geçirimlilik katsayısı, cm/sa	*5-150*	*0,5-5*	*<0,5*
Su temin kuyuları, yüzeysel su kaynakları, eğimli yüzeyler, mülkiyet sınırları ve sızdırma alanı (lot) büyüklüğü	*Makul*	*Orta*	*İstenmeyen durum*

5.1.5. Yerinde Atıksu Arıtma Sistemleri

Bu bölümde, yerinde arıtma sistemlerinin ana bileşenleri verilmektedir. Söz konusu ana bileşenlere geçmeden önce çoğu küçük yerleşim, lokanta, askeri tesis vb. atıksuları için kritik önem arz eden Yağ Tutucular açıklanacaktır.

Yağ ve Gres Tutucu:

Lokanta, çamaşırhane ve benzin istasyonlarından kaynaklanan atıksular yoğun olarak yağ- gres ve deterjan içerirler. Yağ ve gresin foseptiklere girmesine izin verilmesi durumunda, bu atıklar büyük olasılıkla çıkış suyu ile birlikte alıcı toprak ortamına deşarj olacaktır. Yağ ve gres askıda katı ile beraber toprak yüzeyinde birikerek, toprağın geçirimliliğini de azaltacaktır. Yağ

tutucuda, atıksuyun soğuması dolayısıyla gresin katılaşması sağlanır, daha sonra su yüzeyinde biriken gres sıyrılarak atıksudan ayrılır.

Etkili bir yüzdürme için hidrolik kalış süresinin 30 dakikadan az olmaması gerekir. Birçok ticari yağ-gres tutucunun, hidrolik kalış süresinin yetersiz olması nedeniyle verimli olamadıkları kanıtlanmıştır. Buna rağmen, yağ-gres tutucu olarak da görev yapan klasik çürütme tanklarının verimli ve etkin oldukları görülmüştür. Ancak çürütme tankları yağ-gres tutucu olarak kullanıldığında tank yapısında bazı değişiklikler gerekebilir. Yağ-greste etkili arıtım için büyük hacimli çürütme tankları daha uygundur. Çamaşırhane atıksularında kumaş liflerinin de bulunması deşarjda ciddi problemlere yol açabilir. Bu durumda çıkış atıksu kanalına veya pompa önüne (sepet) elek yerleştirilmesi önerilir.

Çürütme Tankı:

Şematik olarak Şekil 5.4'te verilen çürütme tankı (fosseptik, septik tank) yerinde imal edilen veya prefabrike bir yapı olup, çökeltim ve yüzdürme işlemlerinin birlikte gerçekleştirildiği, karıştırmasız ve ısıtmasız anaerobik bir tanktır. Septik tankın Avrupa'daki en eski kullanımı 1860'lı yıllarda Fransa'da görülmektedir.

Günümüzde yaygın olarak betonarme, YYPE veya CTP malzemeden yapılmış çürütme tankları başarıyla kullanılmaktadır. Bu tür tanklar aynı zamanda su sızdırmasız ve sağlam bir yapıda olmalıdır. Bu nedenle kurulum öncesi ve sonrasında sızdırmazlık ile yapısal sağlamlık testleri yapılmalıdır. ABD'de yapılan müstakil evlerin %25'inde hala septik tanklar kullanılmaktadır.

Çürütme tankı içini bölmelere ayıran perdeler, kolay kontrol ve temizleme amacıyla da kontrol bacaları bulunur. Yağ-gres ve diğer yüzücü maddeler köpük ile birlikte yüzeyde toplanır. Böylece çökelmiş ve yüzücü maddelerden arındırılmış atıksu, köpük ve çürümüş çamur tabakası arasından alınarak araziye veya başka bir arıtım ünitesine deşarj edilir. Tankın dibinde kalan organik maddeler, fakültatif ve anaerobik mikroorganizmalarca parçalanarak CO_2, CH_4 ve H_2S gibi daha kararlı bileşiklere dönüştürülür.

Gelen suyun miktarına (L/s) göre şekildeki boyutlar (mm) olarak aşağıdaki gibidir.

Q l/s	H	a	h'	h''	L	l	B	b	o	m	d	e	f	g	i
2	1380	260	670	770	1500	1000	790	550	225	120	100	273	25	895	60
3	1390	280	660	780	1700	1200	890	650	275	120	100	293	75	835	60
4	1400	300	650	790	2070	1400	1250	750	312,5	250	125	314,5	125	775	75
5	1410	320	640	800	2370	1600	1350	850	362,5	250	125	334,5	175	715	75
7	1422,5	345	627,5	812,5	2550	1850	1500	1000	425	250	150	360	250	627,5	80
9	1435	370	615	825	2800	2100	1650	1150	500	250	150	385	325	540	80

Şekil 5.3. Kargir veya betondan bir yağ yakalayıcı [2]

Şekil 5.4. Tipik çürütme tankı; a) Klasik iki bölmeli tip, b) Çıkışı elekli tek bölmeli tip

Çürütme tankında oluşan H_2S, biriken çamurdaki metallerle birleşerek çözünmez metal sülfürler oluşturduğundan, genellikle koku problemi olmaz. Biriken katı madde hacmi anaerobik çürüme sonucu sürekli azalsa bile, tankta gene de net bir çamur birikimi olacaktır. Oluşan gaz ile birlikte tankın tabanından yüzeye çıkan maddeler köpük tabakasının altına yapışarak sıvı yüzeyindeki yüzer tabaka kalınlığını arttırır. Çamur ve köpüğün uzun süreli birikimi sonucu tankın etkili hacminde azalma görüleceğinden, belli aralıklarla çürütme tankındaki çürümüş çamurun ~%80'inin vidanjörle boşaltılması gerekir.

Septik tanklarda ortalama atıksu debisi için gerekli asgari hidrolik bekletme süresi 0,5 gün (12 sa) dür. Çamur çürütme fonksiyonu da olan tanklarda ise 4-6 ayda bir çamur çekimi için ~100 L/N çamur hacmi de dikkate alınmalıdır.

Temel Tasarım Kriterleri: Çürütme tankları sızdırmaz yapıda olmalıdır. Tanktan aşırı sızma, köpük tabakasının azalan su seviyesi ile birlikte çıkış yapısı seviyesine düşerek tıkanmalara yol açabilir. Tankın giriş ve çıkış yapılarının yapımına özel önem verilmelidir. Giriş/çıkış yapıları başlıca 3 ana görev icra ederler: (1) giriş akımındaki salınımlar dolayısıyla TKM çökelmesinin engellenmesinin önünü almak, (2) tank çıkışındaki katıların yeniden askıda hale geçmesini önlemek ve (3) çürümüş çamurdan çıkan gazların TKM çökelmesini etkilemesini engellemek.

Yukarıda belirtilen hususları sağlamak üzere, giriş/çıkışta T boru, çıkış kovası, dalgıç köpük perdeleri ve çeşitli gaz saptırma perdeleri gibi elemanlar kullanılır. Septik tanklar 2 veya 3 gözlü olarak inşa edilirler. Genelde 2 gözlü kullanım yaygındır. Çürütme tanklarının tasarım kriterleri Tablo 5.7'de özetlenmiştir [1].

Tablo 5.7. Septik tanklar için tipik tasarım kriterleri

Tasarım Parametresi	*Birim*	*Değer Aralığı*	*Tipik değer*
Sıvı hacmi			
Minimum	m^3	*2,5-4,0*	*2,5* [a]
1-2 yatak odası	m^3	*2,5-4,0*	*2,5* [a]
3 yatak odası	m^3	*3,5-5,7*	*4,5* [a]
4 yatak odası	m^3	*3,5-7,6*	*5,7* [a]
5 yatak odası	m^3	*4,5-7,6*	*5,7* [a]
Ek yatak odaları	m^3	*0,6-1,0*	*1,0* [a]
Bölme (göz)			
Sayı	*sayı*	*1-3*	*2* [b]
Çok gözlü tanklarda hacim dağılımı			
İki bölmeli tank	*% (toplam) 1., 2.*	*67,33*	*67,33*
Üç bölmeli tank	*% (toplam) 1., 2., 3.*	*33-50, 25-33, 25-33*	*50, 25, 25*
Boy: En oranı (L: B)	*oran*	*2:1-4:1*	*3:1*
Derinlik (H)	*m*	*0,5-2,0*	*1.5*
Sıvı üstünde bırakılan boşluk	*cm*	*25-30*	*25*
Girişin altındaki su yüzeyinin derinliği	*cm*	*7-10*	*8*
Muayene bacaları	*sayı*	*2-3*	*2*
Giriş ve çıkış yapıları	*sayı*	*Birer adet*	*Birer adet*
Tipik çıkış suyu kalitesi [c]			
BOI_5		*120-140*	*130*
TAKM	*mg/L*	*50-100*	*90*
$NH_3 – N$	*mg/L*	*20-50*	*40*
$NO_3 – N$	*mg/L*	*<1*	*<1*
TN	*mg/L*	*25-80*	*50*
TP	*mg/L*	*10-20*	*15*
Toplam koliform	*ad/100 mL*	*10^3-10^6*	*10^5*
Virüs	*PFU/mL*	*10^5-10^7*	*10^6*

[a] *Çoğu düzenleyici kurumun septik tanklar için minimum boyut şartı mevcuttur (ABD'de tipik olarak 4500 L). Septik tank boyutu belirtilmemişse, bu tabloda verilen değerler esas alınabilir.*
[b] *Izgara sepeti kullanılmadığında iki veya üç bölmeli tanklar*
[c] *Giriş suyu kalitesi Tablo 5.1'de verilmiştir.*

Septik tanklarda 10-20°C'lik atıksu için, <0,1 kg $BOİ_5/m^3$.gün yüklemesiyle ~%50 $BOİ_5$ giderimi sağlanabilmektedir [3].

Septik tank çıkış suyu kalitesini iyileştirmek üzere çeşitli tiplerde sepet ızgara/elekler kullanılmaktadır. Bu tip kovalı elekler yerinden alınabilir özellikte olup mevcut tanklara da eklenebilmektedir. Gözenekli bir hazne içine yerleştirilmiş dalgıç pompa da çıkış suyunu sonraki birimlere verilmek üzere (besleme sifonları yerine) kullanılabilmektedir.

Septik tanklar için tipik çıkış suyu kalitesi Tablo 5.7'de verilmektedir. Tipik çürümüş çamur (septik tank çamuru) karakterizasyonu için aşağıdaki değerler esas alınabilir:

$BOİ_5$ = 6000 mg/L , AKM = 15.000 mg/L, TKN = 700 mg/L, NH_3-N = 400 mg/L, TP = 250 mg/L, Yağ ve Gres = 8000 mg/L.

Septik tank muhtevalarının nihai bertarafındaki en yaygın yöntem en yakın merkezi AAT'ne vermektir. Diğer arıtma seçenekleri ise katı atıklarla birlikte depolama, arazide arıtma ve özel bir septik tank atığı arıtma tesisinde arıtmadır.

WSP (2002) raporuna göre, septik tankların ilk yatırım ve işletme/bakım maliyetleri için ilk yaklaşımda sırası ile 12-20 $/N ve 0,5-1,0 $/N yıl değerleri esas alınabilmektedir.

Imhoff Tankı:

İki katlı çürütme yapılarından olan Imhoff tanklarında, üst kat çökeltim alt kat ise çürütme için kullanılır (Şekil 5.5). İki katlı tesislerde büyük tesislerde olduğu gibi, atık su yine de taze tutulamamaktadır. Atıksuyun akışı gayri muntazam olmakta, hatta atıksuyun bir kısım çamur bölgesinden de akmaktadır. Tesislerin verimi mekanik arıtma kadardır. Çamurun aşağı yuvarlanabilmesi için, üst kattaki çökeltim bölmesinin yan duvarları alt kısımda tercihen 1.4:1 eğiminde, çökeltim havuzu ile çürütme odası arasındaki yarık 12 cm genişliğindedir. Çıkışta su içerisine 30 cm dalan ve su yüzeyinden 20 cm yukarıya kadar yükselen bir dalgıç perde bulunur.

Üstteki çökeltim bölmesi 30 L/N , alttaki çamur çürütme kısmı ise 60 L/N esas alınarak hesaplanır. Üst bölmenin hacmi ($V_{çök}$) 1500 L'den, alt bölmeninki ise ($V_{çç}$) 3000 L'den küçük alınmaz. Ayrıca yüzücü çamur için ($V_{yç}$) 30 L/N esasıyla hesaplanan en az 1500 L'lik hacim düşünülür. Bu tesisler en az 50 kişi için yapılır. Bağlı nüfus 50'den az ise tek katlı çürütücüler (septik tank) tercih edilmelidir. Çökelme bölmesi için önerilen yüzeysel hidrolik yük ~33 m^3/m^2.gün'dür. Bu değer pik debilerde bile 40 m^3/m^2.gün'ü geçmemelidir [4], [5].

Klasik Imhoff tankları dikdörtgen veya daire planlı olarak inşa edilebilirler (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6). Tesisin plandaki enkesit alanının ~ %20'si oranında gaz tahliye alanı planlanır. Gaz tahliye yapısının (baca) minimum açıklığı ≥ 62,5 cm olmalıdır. Çamur çürütücü bölmesi, genelde 6 aylık çamuru depolayabilecek kapasitede tasarlanır.

Çamur tahliye borusu çapı ≥ 25 cm, tanktaki toplam su derinliği ~7,3-9,7 (9,0) m aralığında seçilir.

Şekil 5.5. Küçük yerleşimler için Imhoff Tankı; a) planı, b) kesiti

Çökelme bölmesindeki hidrolik bekletme süresi 1,5-3,5 (3 sa), tipik uzunluk/genişlik oranı 3:1'dir. Çökeltim bölmesinin maksimum su derinliği (su seviyesi ile tabandaki çamur geniş açıklığı arası) 2,7 m'yi aşmamalıdır. Çoğu tesiste, çekilen çamuru boşaltmak üzere tesis yakınında bir çamur kurutma yatağı yapımı yaygındır.

Imhoff tanklarında üretilen veya oluşan çamur miktarı için 0,150 kg KM/m^3 arıtılan atıksu veya 85-113 (~100) L/N değerleri esas alınıp 4-6 aylık bir depolama düşünülerek çürütme hacmi tasarlanmalıdır.

Imhoff tanklarında, TKM ve BOİ$_5$ giderimleri sırası ile %50-60 ile %40-60 aralıklarında değerler almaktadır [6]. Imhoff tanklarının tasarım kriterleri Tablo 5.8'de özetlenmiştir.

$V_{çök}$ üstteki çökelme bölümü hacmini, $V_{çç}$ alttaki çürütme kısmı hacmini, $V_{yç}$ yüzücü çamur hacmini, V_{hd} hesap dışı (rezerv) kalan hacmi göstermektedir.

Şekil 5.6. Daire planlı Imhoff tankı

Tablo 5.8. Imhoff tanklarının tasarım kriterleri [4], [5]

Bileşen/Parametre	***Değeri***
Çökelme Bölmesi (Üst kat):	
Hidrolik kalış süresi, θ (sa)	*1,5-4 (3)*
Hacim, (L/ N)	*30*
Toplam su derinliği, H (m)	*< 2,7*
Uzunluk: Genişlik (L: B)	*2:1 – 5:1 (3:1)*
B (m)	*< 3*
Yüzey yükü, m^3/m^2.gün	*33 (< 40)*
Perde eğimleri (Düşey: Yatay)	*1,4:1*
Çürütme Bölmesi (Alt kat):	
Çamur biriktirme kapasitesi, ay	*4-8 (6)*
Toplam hacim (L/ N)	*85-110 (100)*
Tankın toplam derinliği, H_T (m)	*7,3 – 9,7 (9,0)*
Gaz tahliye alanı, % A_{tesis}	*≥ 20*

Arıtılmış Atıksu Uzaklaştırma Alanı:

Çürütme tankı vb. küçük arıtma sistemlerinde açığa çıkan arıtılmış suyun nihai arıtımı, arazi yüzeyinde veya zeminde absorpsiyon yoluyla sağlanır. Tipik zeminde absorpsiyon sızdırma sistemi: içi granüler malzeme (genellikle çakıl taşı, Şekil 5.7) ile doldurulmuş dar ve sığ (0,6-1,5 m) hendeklerdir.

Sızdırma hendeklerinde granüler madde kullanılmasının başlıca nedenleri;

- Uzaklaştırma alanının alt yapısını oluşturmak,
- Çıkış akımında kısmi arıtım sağlamak,
- Çıkış suyunu geçirimli toprak yüzeyine dağıtmak ve
- Hendekler su ile dolu olmadığı zamanlarda, pik debiler için geçici depolama görevini görmek olarak ifade edilebilir.

Şekil 5.7. Septik tank çıkışını zemine sızdırmak üzere planlanan sızdırma hendeklerinin plan ve kesiti

Septik tank çıkışı, atıksu uzaklaştırma alanına cazibeli olarak, kesikli pompalama veya bir sifonla dozlanır.

Atıksu uzaklaştırma arazisine deşarj edilen çürütme tankı çıkışı, öncelikle hendek yan duvarlarından toprağa sızar. Çıkış suyu toprak yüzeyini geçtikten sonra doymamış (vadoz) tabakaya girer. Bu bölgedeki akış, zemin yapısına bağlıdır. Atıksu, zemin tanecikleri üzerinde ve boşluklarında yerçekimi kuvvetinin tersi yönünde hareket edebilir (kapiler yükselme).

Arıtılmış su vadoz tabakadan sonra yer altı suyuna (akiferlere) veya en yakın yüzeysel su tabakasına doğru hareket eder. Yer altı suyu akışı, toprak geçirgenliğine bağlı olarak yatay veya dikey yöndedir.

Gözenekli alandaki arıtma bir dizi fiziksel, biyolojik ve kimyasal mekanizmaların birlikte etkisiyle gerçekleştirilir. Gözenekli ortam, sürekli su altında kalması halinde batmış anaerobik filtre, kesikli besleme uygulamalarında ise aerobik damlatmalı filtre gibi davranır.

Kesikli Beslemeli Kum Filtresi

Konum ve yerel şartlar septik tank ve uzaklaştırma alanının kullanımı için uygun olmayabilir. Bu gibi durumlarda atıksu arıtıldıktan sonra yapay bir kum filtreye verilir. Çürütme tankı çıkışının uzaklaştırma alanlarına yağmurlama yoluyla verilmesi koku ve hijyen problemleri dolayısıyla uygun değildir.

Kesikli kum filtresi, sığ bir kum yatağı olup (0,6-0,8 m kalınlık) yüzeyde atıksu dağıtım ve altta ise drenaj (toplama) sistemine sahiptir (Şekil 5.8). Septik tank çıkışı kum yatağı yüzeyine belli aralıklarla kesikli olarak verilir. Arıtılan su, filtrenin tabanındaki drenaj sisteminde toplanır. Filtre çıkış suyu uzaklaştırma alanına veya dezenfekte edildikten sonra yüzey sularına deşarj edilir. Kum filtrelerinin çoğu zemine gömülü olmasına rağmen açıkta da yapılabilirler.

Kum filtredeki arıtımda fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım mekanizmalarının tamamını içerir. Askıda katılar, temas süresi ve çökelmeye bağlı olarak mekanik süzme ile giderilir. Bakteriler, kum tanecikleri arasında tutulurlar. Bu nedenle BOİ giderimi ve nitrifikasyon reaksiyonları havalı (aerobik) şartlar altında meydana gelir. Anaerobik şartlar altında ise denitrifikasyon gerçekleşir. Bazı özel bileşikler kimyasal ve fiziksel sorpsiyon ile giderilirler. Bu filtrelerde yüksek verim sağlamak için aerobik şartlar oluşturulmalıdır. Kesikli besleme ve havalandırma filtrede aerobik şartları sağlayacaktır.

Granüler Malzeme (Toprak) Yığınından Sızdırma Sistemi

Granüler malzeme veya toprak yığınından sızdırma sistemi, bir tür kesikli kum filtresi olup, temel farkı, yatağın zemin yüzeyi üzerinde yapay olarak oluşturulan bir yığın içerisinde zemin yüzeyine yerleştirilmesidir (Şekil 5.9). Zemin yüzeyi üzerinde yapay bir hendek veya yatak inşa edilir. Septik tank çıkışı, granüler (çakıl) tabaka üzerine yerleştirilen basınçlı bir dağıtım sistemi vasıtasıyla bu yatağa pompalanır. Ayırma bariyeri çakıl tabaka üzerine yerleştirilir ve üzeri toprak ile örtülür.

Bu sistem özellikle;

- toprağın geçirgen ve yer altı su tabakasının sığ
- alt katmanların çok gözenekli
- eğimin %12'den az
- toprak (arazi) geçirimliliğinin çok düşük olduğu

yerlerde uygulanır.

Toprak geçirimliliğinin az olduğu yerlerde bu sistemin kullanılması durumunda biriken drenaj suları uzaklaştırılamaz.

Şekil 5.8. Kesikli kum filtrelerinin tipik şeması; a) plan, b) kesit

Şekil 5.9. Fosseptik çıkışı için kullanılan, toprağı geçirgen ve yüksek yer altı suyu veya sığ kırık kaya tabakası için kullanılan tipik yığından sızdırma sistemi

Diğer sistemler

Septik tank ve Imhoff tankı çıkış sularının sonraki arıtımında yapay sulak alanların (YSA) kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Bölüm 4.10.4). Özellikle Fransız tipi YSA teknolojisi, bu tür atıksular için oldukça iyi derecede ilave arıtma sağlamaktadır. Yapay sulak alanlar dışında, yerel şartlar gözetilerek, paket biyolojik arıtma ve lagün sistemlerinin de kullanımı mümkündür.

5.1.6. Türkiye'de Kırsal Alanda Atıksu Yönetimi Sorununun Boyutları ve Çözüm Önerileri

İçişleri Bakanlığı'nın güncel (2015 yılı) verilerine göre Türkiye'de Büyükşehirler dışındaki 51 ildeki toplam köy sayısı ve nüfusu sırası ile 18.305 ve 6.410.000 kişi olup ortalama köy nüfusu ~432 (medyan değer 374 kişi) kişidir. Köy nüfusları 84 – 1528 kişi gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Dağlık kesimlerdeki mahalle sayıları artmakta, bunun sonucu olarak köy nüfusları daha da azalabilmektedir. Elli bir ildeki ortalama köy nüfuslarının %75'i <500 kişi, %95'i ise <1000 kişidir. İl bazındaki ortalama nüfusu >1000 kişi olan köy sayısı, elli bir ildeki toplam köy sayısının %5'idir.

Kırsal kesimdeki atıksu toplama (kanalizasyon), arıtma ve uzaklaştırma sorunu, özellikle Köydes Programı ile köylere basınçlı su temini sonrası iyice görünür ve ertelenemez bir hal almıştır. Mevcut durumda sorun İl Özel İdareleri'nin sağladığı proje ve mali finans desteği ile çözülmeye çalışılmakla birlikte, ihtiyacın çok büyük olması dolayısıyla, ancak sınırlı düzeyde başarı sağlanabilmiştir. Bu yüzden ilave yeni proje, finans ve insan kaynağı ile sivil toplum potansiyelinin hızla harekete geçirilerek, Türkiye'nin mevcut gelişmişlik düzeyi ile bağdaşmayan kırsal altyapı yetersizliği ve oluşturduğu ciddi halk sağlığı risklerinin daha fazla ertelenmeden acilen giderilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde özetlenen yerinde atıksu arıtma ve uzaklaştırma sistemleri dikkate alınarak, Türkiye'nin kırsal (köy) yerleşimlerinde oluşan atıksu sorununun çözümü için aşağıdaki teknoloji seçeneklerinin uygulanabileceği düşünülmektedir:

N<100 kişi olan köyler:

- Çürütme tankı + Fransız tipi yapay sulak alan (YSA) (Bölüm 4.10.4)
- Çürütme tankı + Araziye uygulama (yüzeye veya yüzey altına)

100 < N < 2000 kişi olan köyler:

- Imhoff tankı + biyodisk + Fransız tipi YSA
- Ardışık kesikli reaktör (AKR) + Fransız tipi YSA

1000<N <2000 kişi olan köyler:

- Havasız çamur yataklı reaktör + Fransız tipi YSA
- Biyodisk + Fransız tipi (veya yatay akışlı) YSA
- AKR + Fransız tipi (veya yatay akışlı) YSA
- Stabilizasyon havuzu

Yukarıdaki sistemler topografik, jeolojik ve iklimsel şartlar ile tamir, bakım ve işletim kolaylığı dikkate alınarak, yeterli yerel mühendislik hizmeti desteği/denetimi ile geliştirilecek tip projelerle uygulanabilir. Tesislerin bakım ve işletim hizmetleri, il özel idareleri koordinasyonuyla gerçekleştirilecek 6-10 yıllık hizmet alımı ihaleleriyle, özel sektör firmaları veya yakındaki Büyükşehir Su Kanalizasyon İdareleri tarafından sağlanabilir. Kırsal alandaki bu tür yerleşimlerin atıksu toplama, arıtma ve uzaklaştırma tesislerinin planlama, yapım ve

işletimi için İl Özel İdareleri'ne gerekli ek mali kaynağın da, belli bir plan dahilinde aktarılması sağlanmalıdır.

Problem 5.1.

Merkezi su ve atıksu şebekesi bulunan 300 kişi nüfuslu bir köy için gerekli yerinde atıksu arıtma sistemini (Septik tank/Imhoff tankı + zemine sızdırma/Fransız tipi yapay sulak alan) projelendiriniz.

Çözüm.

(a) Çürütme Tankı Tasarımı

Günlük ortalama atıksu debisi,

$Q_{ort} = q_{ort} * N = 0{,}200\ m^3\ /N\ gün * 300 = 60\ m^3\ /gün$

alınabilir.

Çürütme etkili bir septik tank için gerekli sıvı faz hacmi, θ = 0,5 günlük hidrolik bekletme süresi kabulüyle,

$V_{sıvı} = 60\ m^3\ (100\ L/N)\ bulunur.$

Çürütme tankında Imhoff tanklarındaki gibi ~150 kg/10^3 m^3 arıtılan atıksu miktarında birincil çamur toplanacağı ve ≥ 4 aylık sürede~ %40 azalması olacağı kabulü ile, 4 aylık çamur biriktirecek çürümüş çamur depolama hacmi,

$V_{ÇÇH} = [(0{,}150\ kg\ KM/m^3 * 60\ m^3\ /gün)/(100\ kg/m^3 * 0{,}025)] * 4 * 30 * (1 - 0{,}40)$

$V_{ÇÇH} = 26\ m^3 (\sim 90\ L/N)$

bulunur (Çürümüş çamurun KM içeriği %2,5 alınmıştır).

Çürütme tankında, toplam hacmin ~%15'i oranında ilave yağ-gres + köpük hacmi ile birlikte toplam tank hacmi,

$V_{Top} = [30 + 26] + 56 * \frac{0{,}15}{0{,}85} = 56 + 10 = 66\ m^3\ (\sim 220\ L/N)\ olur.$

Net su derinliği 3,0 m seçilerek (enkesit ve çapı sırasıyla 66/3 = 22 m^2 ve D =5,3 m bulunur.

Su seviyesi üzerinde 1,0 m'lik ilave hava payı ile birlikte toplam tank yüksekliği,

$H_{Top} = 3{,}0 + 1{,}0 = 4{,}0\ m\ olur.$

N = 3 göz seçilip, ilk göz hacmi %50, 2. ve 3. Göz hacimleri %25'er tutulabilir. Daire planlı septik tankın şematik plan ve kesiti aşağıda verilmiştir.

Şekil a. *Septik tanka ait plan ve kesit*

(b) *Imhoff Tankı Tasarımı*

Üst kısım (Çökelme bölmesi):

$\theta = 3\ saat$

$V_{çök} = \frac{60}{24} * 3 = 7{,}5\ m^3$

$H_{çökelme} = 1{,}7\ m$

$A = 7{,}5 / 1{,}7 = 4{,}41\ m^2$

$L/B = 3/1$

$B = [4{,}41/3]0{,}5 = 1{,}21 \approx 1{,}50\ m$

$L = 3 * 1{,}50 = 4{,}50\ m$

$V_{son} = 60/1{,}50 * 4{,}5 = 8{,}9\ m^3/m^2 * gün < 33$

Alt kısım (Çürütme) Bölmesi:

$V_{çürütme} = 300\ kişi * 100\ L/N * 10 - 3 = 20\ m^3$

150 kg KM/10^3 m^3 atıksu arıtılan miktarındaki birincil çamurun çürütülmesi sonrası,~4 aylık bir depolama için gerekli hacim,

$V^* = [0{,}150 * 60 / 1000 * 0{,}025] * 4 * 30 * (1 - 0{,}40)$

$V^* = 26\ m^3\ olur.$

$V_{ÇÇ} = 30\ m^3\ alınabilir.$

Imhoff tankı uzunluğu;

$L_{top} = 2 * 0{,}75\ m + 4{,}5 = 6{,}0\ m$

Genişlik,

$B_{top} = 3 * 0{,}70 + 1{,}50 = 3{,}60\ m$

Çürütme bölmesi yüksekliği,

$H_{çür} = 30/(3{,}6 * 6) = 1{,}50\ m$

% 15'lik yüzücü madde hacmi de dikkate alınarak toplam tank su derinliği,

$H_{top} = \frac{1{,}50}{0{,}85} + 1{,}7 = 1{,}75 + 1{,}7 = 3{,}45\ m$

bulunur. Tasarlanan Imhoff tankı boyuna/enine kesitleri aşağıda verilmiştir.

(c) *Zemine Sızdırma Sistemi*

Zemin tipi: siltli kil lem/kil lemi – düşük geçirgenlikte zemin.

Zamanla biyokütle ile tıkanma etkisi dikkate alınarak siltli kil lem, kil lemi türü (düşük geçirgenlikli) zeminlerde, atıksu sızdırma hendekleri için esas alınacak emniyetli uygulama yükü 5 L/m^2.gün (~10 L/m^2.gün) alınabilir [5].

Problemdeki ön arıtma uygulanmış atıksuların sızdırılabilmesi için gerekli sızdırma sistemi hesabı Şekil b'de özetlenmiştir:

Şekil b. *Zemine sızdırma hendeği tipik enkesiti*

$Q_{ort} = 60\ m^3/gün = 60 * 103\ L/gün$

$q_{min} = 10\ \ L/m^2 * gün$

Gerekli sızdırma alanı,

$A = 60 * 103/10 = 6000\, m^2$ *olarak bulunur.*

Sızdırma hendeği genişliği,

$B = 0{,}90\, m$

alınarak gerekli toplam hendek uzunluğu,

$L = 6000/0{,}90 = 6670\, m$

bulunur. Maksimum sızdırma borusu boyu,

$l_1 \leq 30$ *m alınarak gerekli 30 m'lik sızdırma hendeği + 100 mm dren borusu sayısı,*

$n = 6670/30 = 222$ *adet bulunur.*

Gerekli sızdırma alanı da,

$A_{net} = (n-1) * 30\, m = (222-1) * 2\, m * 30\, m = 13.260\, m^2$

$A_{brüt} = 1{,}2 * 13.260 = 15.912\, m^2$ *(~16 dönüm/1,6 ha) veya 53* m^2*/N olarak hesaplanır. Bu değer 300 kişilik bir yerleşim için oldukça yüksektir.*

(d) *Fransız Tipi Yapay Sulak Alan*

Fransız tipi 2 kademeli düşey akışlı yapay sulak alan için gerekli alan ihtiyacı,

1. kademe için $\sim 1\, m^2/N$*'lik bir alan esasıyla,*

$A_1 = 300 * 1 = 300\, m^2$ *bulunur. Benzer şekilde,*

2. kademe için de $\sim 1\, m^2/N$*'lik bir özgül alan esasıyla,*

$A_2 = 300 * 2 = 600\, m^2$ *elde edilir. Bu durumda gerekli toplam net ve brüt alanlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.*

$[A_1 + A_2]_{net} = 300 + 600 = 900\, m^2$

$[A_1 + A_2]_{brüt} = 1{,}2 * 900 = 1080\, m^2$

Çürütme tankı çıkışının zemine sızdırma alanı veya yapay sulak alanlara beslemesi dozlama sifonu veya pompa vasıtasıyla, ~30 dk'lık aralıklarla kesikli olarak yapılması sağlanmalıdır.

Problem 5.2.

1000 kişiye hizmet verecek bir Imhoff tankı tasarlayınız.

Çözüm.

Atıksu Debisi:

$Q_{ort} = 0{,}200\ m^3/N * gün * 1000 = 200\ m^3/gün$

Üst kısım (çökeltme bölmesi):

$\theta = 3\ saat$

$V_{çök} = \frac{200}{24} * 3 = 25\ m^3$

$H_{çök} = 2{,}5\ m < 2{,}7\ m$

$A = 25/2{,}5 = 10\ m^2$

$B = 1{,}68 \sim 2{,}0\ m, L = 4 * 2{,}0 = 8\ m \rightarrow Ltop = 8 + 2 * 0{,}75 = 9{,}5\ m$

Yüzeysel hidrolik yük,

$V_{50} = 200/(8 * 2) = 12{,}5\ m^3/m^2.gün < 33$

Alt kısım (çürütme bölmesi):

a) *Ampirik yöntem*

Çürütme bölmesi için kişi başına hacim 85-113 L/N (100 L/N) alınarak,

$V_{çürütme} = 1000 * 0{,}100 = 100\ m^3$

b) *4 aylık bir süreçte üretilecek çamur miktarı ~150 kg KM kabulü ile 10^3 m^3 atıksu olacağı ve TKM'nin hacimce~%33 oranında azalacağı bulunur.*

$Vçç = [(0{,}150 * 200)/(1000 * 0{,}025)] * 4 * 30 * (1 - 0{,}33) = 97\ m^3$

Bu durumda çürütme bölmesi hacmi 100 m^3 alınabilir.

Toplam tank genişliği $B_{top} = 2{,}0 + 2 * 0{,}75\ m = 3{,}5\ m$ *ve uzunluk* $L_{çökelme} = 8\ m$ *seçilirse çürütme bölmesi derinliği,*

$H_{çürütme} = 100/(3{,}5 * 9{,}5) = 3{,}0\ m$ *bulunur. Yüzücü köpük için de ilave % 15'lik hacim kabulüyle tanktaki toplam su derinliği,*

$H_{top,su} = 3{,}0/0{,}85 + 2{,}5 = 3{,}5 + 2{,}5 = 6{,}0\ m$

bulunur. Su seviyesi üzerinde 0.80 m hava payı ilavesiyle toplam net (tavan altı döşeme (temel) üstü arası derinlik,

$H_{top} = 6{,}0 + 0{,}8 = 6{,}80\ m$ *bulunur.*

Gaz çıkış alanı, $A_g = (0{,}75 * 8) * 2 = 12\ m^2$ *ve*

$A_g / A_{top} = 12/(8 * 3{,}5) = 0{,}43 > 0{,}20$ *olduğundan yeterlidir.*

Gerekli brüt alan:

$1{,}30 * [(3{,}50 + 2 * 0{,}30) * (9{,}5 + 2 * 0{,}30)] = 1{,}30 * (4{,}1 * 10{,}1) = 55\ m^2$

olur. Tasarlanan Imhoff tankı plan ve enkesitleri Şekil c'de verilmiştir.

Şekil c. *Imhoff tankı tasarım boyutları*

KAYNAKLAR

[1] Qasim, S.R. (1999). Wastewater Treatment Plants. Lancaster: Technomic.

[2] Kor, N (1974). Çevre Sağlığı ve Teknolojisi, 1. Cilt. İstanbul: Teknik Üniversite Matbaası

[3] Libhaber, M., Orozco-Jamamillo, A. (2012). Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater. London: IWA.

[4] Imhoff, K. R., Imhoff, K. (1985). Taschenbuch der Stadtentwasserung. München: 26. überarbeitete Auflage. R. Oldenbourg.

[5] Tchobanoglous, G., Crites, R. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems. Boston: McGraw Hill.

[6] Babbitt, H. E. (1953). Sewerage and Sewage Treatment. 7th Edition. Newyork: John Wiley&Sons.

[7] Arceivala, S. J., Asolekar, S. R. (2007). Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse. 3rd Edition. New Delhi:McGraw Hill.

[8] Babbitt, H. E., Doland, J. J. (1955). Water Supply Engineering. 5th Edition. Newyork: McGraw-Hill.

[9] Hager, W. H. (1999). Wastewater Hydraulics: Theory and Practice. Berlin: Springer.

[10] Steel, E. W. (1960). Water Supply and Sewerage. 4th Edition. Newyork: McGraw-Hill.

[11] Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G. (1981). Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater. New York: McGraw-Hill.

[12] Topacık, D., Koyuncu, İ. (2006). Arıtma Tesislerinin Hidroliği. İstanbul: Su Vakfı

[13] WSP – Water and Sanitation Program of the World Bank (2002). Condominial Water and Sewerage Systems – Costs of Implementing of the Model – Economics and Financial Evaluation, Washington DC, USA.

[14] WSP – Water and Sanitation Program of the World Bank (2008). Constructed Wetlands: A Promising Wastewater Treatment System for Small Locailities, Prepared by Martin Gauss, April 2008.

6. BESİ MADDELERİNİN KONTROLÜ

[1]*Dr. Recep Kaan Dereli, Yrd. Doç. Mustafa Evren Erşahin ve Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Besi maddelerinden azot ve fosfor, arıtılmış atıksuların deşarjında önemli parametrelerdendir. Azot ve fosforun deşarj edilmesi, göl ve rezervuarlarda ötröfikasyonu hızlandırır ve sığ sularda köklü sucul bitkilerle beraber alg büyümesini teşvik eder. Estetik olmayan görünümüne ilave olarak, alg ve sucul bitkilerin varlığı özellikle su temini, balık üretimi ve eğlence amaçlı kullanım gibi su kaynağının faydalı kullanımlarını engeller.

Azotun yüksek konsantrasyonlarda deşarjının sebep olduğu diğer zararlı etkileri;

- Alıcı ortamda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun düşmesi
- Sudaki hayat üzerinde toksik etki
- Klorla dezenfeksiyon verimine etki
- Atıksuyun tekrar kullanıma uygunluğunu bozmak

olarak sıralanabilir. Bu nedenle azot ve fosforun kontrolü su kalitesi yönetiminde ve atıksu arıtma sistemlerinin tasarımında büyük öneme sahiptir. Besi maddelerinin kontrol stratejileri, azot ve fosforun giderim ve kontrolünü içermekte olup bu bölümde detaylı olarak incelenecektir.

6.1. Besi Maddeleri Kontrol Stratejisi

Besi maddelerinin kontrol stratejisinin seçiminde, ham atıksu özelliklerinin belirlenmesi, mevcut arıtma sistemi ve istenen besi maddesi kontrol seviyesi önemli faktörlerdendir. Ayrıca, mevsimsel değiş imlere paralel olarak yıl boyunca besi maddesi gideriminin değişimi de dikkate alınmalıdır. Besi maddesi kontrolünü amaçlayan yaklaşımlar, ilave proses yapılmasını veya mevcut biyolojik arıtma sisteminin besi maddesi giderecek duruma getirilmesini hedefler. Yaklaşım seçimi ise deşarjda istenen standartlara ulaşabilmeye, işletmenin esnekliğine ve maliyete bağlıdır.

Kimyasal, fiziksel ve biyolojik sistemlerin ilavesi ile mevcut arıtma sistemlerinde besi maddelerinin deşarjı kontrol edilebilmektedir. En çok kullanılan ilave prosesler, azot giderimi için amonyak oksidasyonu ve biyolojik nitrifikasyon-denitrifikasyon, fosfor giderimi için ise kimyasal çöktürmedir. Ayrıca, fosforun yalnız veya azot ile birlikte giderimi için yeni biyolojik prosesler geliştirilmiştir. Bu prosesler, kimyasal kullanımının az olmasından veya hiç kimyasala ihtiyaç duyulmamasından dolayı tasarımcılar ve işletmeciler tarafından tercih edilmektedir. Son yıllarda, özellikle artıma tesislerini yan akımlarından tesis başına dönen azotun giderimine yönelik yenilikçi azot giderme prosesleri geliştirilmiştir.

6.1.1. Azot Giderimi ve Kontrolü

Ham atıksuda bulunabilecek farklı azot formları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Azot evsel atıksularda genelde amonyak ve organik azot olarak bulunur. Azotun nitrit ve nitrat formları ise bazı endüstriyel atıksular haricinde evsel atıksularda yok sayılabilecek kadar az bulunurlar. Azot formlarından çözünmüş organik azot, atıksuda daha çok üre ve aminoasit halinde bulunur. Katı formdaki organik azot ise protein gibi kompleks organik maddelerin içinde bulunur ve özellikle ön çökeltim ile giderilen organik madde ile birlikte kısmen giderilir. Biyolojik arıtma sırasında, organik azotun birçoğu amonyum ve diğer inorganik formlara dönüşürken amonyumun bir kısmı da mikroorganizmalar tarafından hücre sentezinde kullanılır. Bu nedenle, konvansiyonel biyolojik arıtma (sadece karbon giderimine yönelik) ile toplam azotun en fazla %30'unun giderildiği söylenebilir.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Şekil 6.1. Atıksularda bulunan azot formları

6.1.2. Fosfor Giderimi

Fosfor atıksularda çözünmüş ve partiküler halde bulunabilir (Şekil 6.2). Çözünmüş fosfor genelde inorganik formunda olup, büyük oranda ortofosfattan oluşur. Organik fosfor ise atıksudaki organik maddelerin içerisinde bağlı olarak bulunur ve genelde partiküler formdadır. Partiküler inorganik fosfor ise fosforun atıksudaki diğer iyonlarla yaptığı ve çözünürlüğü düşük katılardır (ör: $FePO_4$, $Al_3(PO4)_2$, $MgNH_4PO_4$ gibi). Evsel atıksularda toplam fosforun %'u kadarı partiküler fosfor olup, bunu bir kısmı ön çökeltim prosesi ile giderilir. Mikroorganizma tarafından hücre sentezinde kullanılan miktar hariç, kalan çözünmüş fosforun konvansiyonel biyolojik arıtma ile giderimi oldukça zordur.

Şekil 6.2. Atıksularda bulunan fosfor formları

Fosforun gideriminde fiziksel, kimyasal ve biyolojik metotlar kullanılabilmektedir. Demir veya alum tuzları ya da kireç ile yapılan kimyasal çöktürme fosfor gideriminde çok kullanılmaktadır. Biyolojik fosfor giderimi ise, mikroorganizmaların strese sokularak hücre büyümesi için gerekenden daha fazla fosforu bünyelerine almaları esasına dayanır. Bu biyolojik proses, kimyasal arıtmaya alternatif olarak geliştirilmiştir.

6.2. Nitrifikasyon ile Amonyak Giderimi

Atıksulardan azot gideriminde genellikle biyolojik yöntemler uygulanmaktadır. Organik azot bileşikleri organizmalar tarafından parçalanarak amonyuma dönüştürülür. Amonyumun bir kısmı organizmalar tarafından asimile edilerek hücresel proteine çevrilirken diğer kısmı da ototrofik bakteriler tarafından önce nitrit ve sonra da nitrata dönüştürülür. Bu proses "Nitrifikasyon" olarak adlandırılmaktadır.

6.2.1. Nitrifikasyon Prosesi: Stokiyometri ve Kinetik

Nitrifikasyon, atıksuda mevcut amonyum (NH_4^+) iyonlarının bakteriler tarafından önce nitrite sonra da nitrat iyonlarına dönüştürülmesidir. Amonyumu nitrite oksitleyen bakteri türleri *Nitrosomonas* ve *Nitrosococcus* olarak bilinmektedir. İlk basamakta nitrite (NO_2^-) oksitlenen amonyum iyonları, ikinci basamakta *Nitrobakter* tarafından nitrata (NO_3^-) dönüştürülür. Ototrofik nitrifikasyon bakterileri büyüme ve hücre metabolizması için gerekli bütün enerjiyi, inorganik azot bileşiklerinin oksidasyonu sonucu açığa çıkan serbest enerjiden sağlarlar. Hücre büyümesi için gereken karbon kaynağını ise karbondioksitten veya bikarbonattan elde ederler.

Birinci adıma (nitritasyon) ait enerji reaksiyonu,

$$NH_4^+ + 3/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O \text{ (Nitrosomonas)} \tag{6.1}$$

iken ikinci adıma (nitratasyon) ait enerji reaksiyonu,

$$NO_2^- + 1/2\ O_2 \rightarrow NO_3^- \text{ (Nitrobakter)} \tag{6.2}$$

şeklinde olmaktadır. Bunlara bağlı olarak toplam enerji reaksiyonu aşağıdaki ifade ile verilebilmektedir.

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O \tag{6.3}$$

Hücre sentezi dahil edilmediğinde amonyumun nitrata oksidasyonu için gereken teorik oksijen miktarı, (6.3) eşitliğinden 64/14=4,57 mg O_2/mg NH_4-N olmaktadır. (6.1) ve (6.2) reaksiyonları sonucu açığa çıkan enerjiyi her iki bakteri türü için çoğalma ve hücre bakımı için kullanır. Enerji eldesinin yanı sıra, bazı amonyum iyonlarının hücre dokusunu oluşturan proteinlerin sentezi için kullanıldığını da gösteren sentez reaksiyonu aşağıda verilmektedir.

$$NH_4HCO_3 + 0{,}9852NaHCO_3 + 0{,}0991CO_2 + 1{,}8675O_2 \rightarrow 0{,}01982C_5H_7O_2N + 0{,}9852NaNO_3 + 2{,}9232H_2O + 1{,}9852CO_2$$

Burada $C_5H_7O_2N$ kimyasal formülü sentezlenen bakteri hücresini temsil etmektedir. Amonyak ve nitriti oksitleyen bakterilerin hücre dönüşüm oranları sırasıyla 0,12 g UAKM/g NH_4-N ve 0,04 g UAKM/g NO_2-N olarak belirlenmiştir. Kararlı halde nitrifikasyon bakterilerinin çoğalma hızı Monod kinetiği ile tanımlanmaktadır (6.4). Nitrifikasyon prosesi için belirlenen kinetik hız sabitleri Tablo 6.1'de verilmektedir. Ototrofik nitrifikasyon bakterileri düşük çoğalma hızına sahiptirler ve çevre şartlarına çok hassastırlar.

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S_{NH4}}{S_{NH4} + K_{NH4}} * \frac{S_{O2}}{S_{O2} + K_{O2}} \tag{6.4}$$

Burada;

S_{NH4} : Amonyum azotu konsantrasyonu
S_{O2} : Oksijen konsantrasyonu

Tablo 6.1. Nitrifikasyon prosesi için kinetik sabitler (20°C için) [1]

Katsayı	*Birim*	*Aralık*	*Tipik değer*
Maksimum çoğalma hızı (μ_{maks})	*g UAKM/g UAKM.gün*	*0,2-0,9*	*0,75*
Amonyum azotu yarı doygunluk sabiti (K_{NH4})	*g NH_4-N/ m^3*	*0,5-1,0*	*0,74*
Biyokütle dönüşüm oranı (Y)	*g UAKM/g NH_4-N*	*0,1-0,15*	*0,12*
Biyokütle ölüm hızı (b)	*g UAKM/g UAKM.gün*	*0,05-0,15*	*0,08*
Oksijen yarı doygunluk sabiti (K_{O2})	*g/m^3*	*0,4-0,6*	*0,5*

Nitrifikasyon prosesi sırasında alkalinite tüketilir. Giderilen 1 g NH_4-N başına stokiyometrik olarak 7,14 g $CaCO_3$'a ihtiyaç duyulur. Atıksuda yeterli alkalinite bulunmadığı durumda pH düşer ve nitrifikasyon prosesinin hızı yavaşlar. Bu nedenle gerekli hallerde alkalinite takviyesi yapılmalıdır.

Aktif çamur sistemlerinde nitrifikasyon birçok bileşik tarafından inhibe edilmektedir. Ancak sistemde nitrifikasyonun olmamasının nedeni her zaman inhibisyon değildir. Bazı durumlarda nitrifikasyon bakterilerinin sistemden atılmış olma ihtimali de olabilir. Bu nedenle sistemin çamur yaşının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gereklidir. Tablo 6.2'de de verildiği gibi bazı ağır metaller nitrifikasyonu inhibe etmektedir. Tabloda literatürden alınan çeşitli metallerin inhibisyon konsantrasyonları bulunmaktadır ve aktif çamurdaki karbon gideren bakterilerin nitrifikasyon bakterilerine oranla daha az etkilendiği görülmektedir. Sıvı ve çamur fazındaki metal iyon aktivitesinin çok farklı olması nedeniyle aktif çamurdaki bakteriler yüksek metal konsantrasyonuna daha fazla direnç gösterirler. Sülfür bileşikleri, anilin, fenoller ve siyanür gibi bazı organik bileşikler çok kuvvetli inhibisyon etkisi gösterirler. Mikroorganizmalar birden fazla inhibitör bileşiğine aynı anda maruz kalırsa genellikle bir bileşiğin inhibisyonu baskın olmaktadır.

Tablo 6.2. Metallerin nitrifikasyona inhibisyonu [2]

Metal	*Konsantrasyon (g/m^3)*	*Etkileri*
Cu	*0,05-0,056*	*Nitrosomonas inhibisyonu (saf kültür)*
Cu	*4*	*Aktif çamurda inhibisyon yok*
Cu	*150*	*Aktif çamurda %75 inhibisyon*
Ni	*<0,25*	*Nitrosomonas çoğalması inhibisyonu (saf kültür)*
Cr^{3+}	*<0,25*	*Nitrosomonas çoğalması inhibisyonu (saf kültür)*
Cr^{3+}	*118*	*Aktif çamurda %75 inhibisyon*
Zn	*0,08-0,5*	*Nitrosomonas çoğalması inhibisyonu (saf kültür)*
Zn	*0,08-0,5*	*Nitrosomonas çoğalması inhibisyonu (saf kültür)*

6.2.2. Nitrifikasyon Proseslerinin Sınıflandırılması

Nitrifikasyon prosesleri, karbon oksidasyonu ve nitrifikasyon reaksiyonlarının birlikte veya ayrı meydana gelmesine bağlı olarak sınıflandırılır. Karbon oksidasyonu ve nitrifikasyonun bir reaktör içinde meydana gelmesi durumunda sistem "birleşik (tek çamurlu) sistem" olarak adlandırılır. "Ayrık (çok çamurlu) sistem"de ise karbon oksidasyonu ve nitrifikasyon farklı reaktörlerde meydana gelir ve heterotrofik ile ototrofik mikroorganizmalar bir arada bulunmazlar. Tek ve çift çamurlu nitrifikasyon sistemleri Şekil 6.3'te gösterilmektedir.

(a)

(b)

Şekil 6.3. Tam karışımlı reaktörlerde karbon oksidasyonu ve nitrifikasyon prosesleri a) bileşik tek çamurlu sistem, b) ayrık sistem [1]

6.2.2.1.Birleşik (Tek Çamurlu) Sistemler

Tek çamurlu sistemlerde karbon gideriminden sorumlu heterotrofik bakteriler ve nitrifikasyon yapan ototrofik bakteriler aynı reaktörde bulunur. Nitrifikasyon bakterileri hemen hemen bütün aktif çamur proseslerinde bulunurlar ancak sayıları oldukça azdır. Nitrifikasyon prosesi, ardışık kesikli, tam-karışımlı, piston akımlı, uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi gibi birçok konfigürasyonda gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 6.4). Ancak, nitrifikasyon prosesinin bu sistemlerde gerçekleşmesi gerekli çevre şartlarının ve işletme parametrelerinin nitrifikasyon bakterilerine göre ayarlanmasıyla gerekmektedir. Örneğin, ılıman iklimlerde artan nitrifikasyon hızı ve artan çamur miktarı daha fazla hava gereksinimini de beraberinde getirir. Buna karşın düşük sıcaklıklarda nitrifikasyon bakterilerinin sistemde çoğalmasını sağlayabilmek için çamur yaşının arttırılması gerekebilir. Böylece mevsimsel olarak önlem alınması gerekebilir. Karbon giderimi ve nitrifikasyonun birlikte gerçekleştirilebileceği bazı aktif çamur sistemleri için tipik tasarım parametreleri Tablo 6.3'te verilmektedir. Bu sistemler ile ilgili daha detaylı bilgiler [1] ve [3] numaralı kaynaklarda bulunabilir.

Nitrifikasyon birleşik aktif çamur sisteminde gerçekleşiyorsa sistemin kararlılığı için aşağıdaki işletme koşulları sağlanmalıdır:

- Nitrifikasyon için ilave oksijen gereklidir. Sisteme gerekli hava sağlanmalıdır.
- Uzun çamur yaşı seçilmelidir. Nitrifikasyon bakterileri ototrofik bakteriler olup, organik maddeleri parçalayan heterotrofik bakterilerden daha yavaş çoğalma hızına sahiptirler. Bu nedenle bu bakterilerin etkin olabilmesi için daha büyük çamur yaşına ihtiyaç vardır.
- Mikrobiyolojik dönüşüm nedeniyle ortamın pH'ı düştüğünde kireç veya soda ilavesiyle pH ayarlaması yapılmalıdır.

Tablo 6.3. Karbon oksidasyonu ve nitrifikasyon yapan aktif çamur prosesleri için tipik tasarım parametreleri [1]

Proses	*Reaktör tipi*	*Çamur yaşı (gün)*	*F :M oranı (kg BOİ/kg UAKM gün)*	*Hacimsel yükleme (kg BOİ/m³.gün)*	*Biyokütle konsantrasyonu (mg UAKM/L)*	*Hidrolik bekleme süresi (saat)*	*Geri devir oranı (%)*
Tam karışımlı	*Tam karışımlı*	*3-15*	*0,2-0,6*	*0,3-1,6*	*1500-4000*	*3-5*	*25-100*
Piston akımlı	*Piston akımlı*	*3-15*	*0,2-0,4*	*0,3-0,7*	*1000-3000*	*4-8*	*25-75*
Kontakt stabilizasyon	*Piston akımlı*	*5-10*	*0,2-0,6*	*1-1,3*	*1000-3000* *6000-10000*	*0,5-11* *2-42*	*50-150*
Oksidasyon hendeği	*Piston akımlı*	*15-30*	*0,04-0,1*	*0,1-0,3*	*3000-5000*	*15-30*	*75-150*

[1] *Kontakt tankı*
[2] *Stabilizasyon tankı*

Şekil 6.4. Tek çamurlu nitrifikasyon sistemleri a) tam karışımlı, b) piston akımlı, c) kontakt stabilizasyon, d) oksidasyon hendeği

Nitrifikasyon prosesi mikroorganizmaların bir yüzey üzerinde tutunmasına dayalı biyofilm reaktörlerde de gerçekleştirilebilir. Damlatmalı filtre ve dönen biyodisk sistemleri, karbon oksidasyonu ve nitrifikasyonun beraber meydana geldiği biyofilm sistemlerine örnektir (Şekil 6.5). Tam karışımlı sistemlerde olduğu gibi, biyofilmli sistemlerde de nitrifikasyon için tasarım ve işletme şartları önemlidir. İşletme parametrelerine örnek olarak organik yükleme verilebilir. Yüklemenin (F/M'in) azaltılmasıyla nitrifikasyon artacaktır. Bu nedenle bu tip sistemler genelde kademeli olarak tasarlanır ve kullanılırlar. Ön kademedeki reaktörler özellikle karbon giderimini, son kademedeki reaktörler ise nitrifikasyonu gerçekleştirir.

(a)

(b)

Şekil 6.5. Nitrifikasyon için kullanılan biyofilm prosesler a) damlatmalı filtre, b) döner biyodisk

Damlatmalı filtrelerde taş dolgu malzemesi kullanılması durumunda, yüksek organik yüklerde malzeme üzerinde oluşan biyofilm heterotrofik bakteri ağırlıklı olacağından nitrifikasyon verimi düşük olacaktır. Ancak dolgu maddesinin plastik olması durumunda, daha geniş yüzey alanı elde edileceğinden bakteri tutma kapasitesi de daha fazla olacaktır (Tablo 6.4). Bu sayede, yüksek organik yüklerde bile yüksek nitrifikasyon verimlerine ulaşılabilmektedir. Plastik malzeme kullanımının diğer faydası ise daha fazla oksijen transferi sağlamasıdır. Damlatmalı filtreler de karbon giderimi ve nitrifikasyon için kullanılabilecek tipik akım şemaları Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Damlatmalı filtrelerde nitrifikasyon için genelde 2 kademeli sistemler kullanılmakta olup, birinci kademe filtrede karbon giderimi ikinci kademede ise nitrifikasyon yapılmaktadır.

Tablo 6.4. Damlatmalı filtrelerde kullanılan dolgu malzemelerinin özgül yüzey alanları [1]

Dolgu malzemesi	***Özgül yüzey alanı (m^2/m^3)***
Doğal taş	*45*
Plastik çapraz akışlı malzeme	*100-140*
Plastik rastgele dizilimli malzeme	*100*

Şekil 6.6. Damlatmalı filtreler için tipik akım şemaları

Döner biyodisklerde de amonyumun oksidasyon verimi sistemdeki yüzey alanına bağlıdır. Bu tip sistemler de genelde kademeli olarak tasarlanır ve işletilir (Şekil 6.7). Kademe sayısı arıtma hedeflerine göre değişmekle beraber, BOİ giderimi için 2-4, nitrifikasyon için ise en az 6 kademe yapılması önerilir. Nitrifikasyon için gerekli yüzey alanı iki adımda belirlenebilmektedir. Birinci adımda, BOİ giderimi için gerekli yüzey alanı, ikinci adımda ise giriş amonyum konsantrasyonunu istenen seviyeye kadar arıtmak için gereken disk yüzey alanı bulunur. İki yüzey alanın toplamı, birleşik karbon oksidasyonu ve nitrifikasyon prosesinin gerçekleşmesi için gerekli toplam alanı vermektedir. Kullanılan disklerin yüzey alanı genelde 9300-16700 m^2/disk aralığında değişir. Döner biyodiskler için tipik tasarım parametreleri Tablo 6.5'te verilmektedir.

Şekil 6.7. Döner biyodiskler için tipik akım şemaları

Tablo 6.5. Döner biyodiskler için tipik tasarım parametreleri [1]

Parametre	***Birim***	***Sadece BOİ giderimi***	***Karbon giderimi ve nitrifikasyon***	***Ayrık nitrifikasyon***
Hidrolik yükleme	*m^3/m^2.gün*	*0,08-0,16*	*0,03-0,08*	*0,04-0,1*
Organik yükleme	*g çözünmüş BOİ/m^2.gün*	*4-10*	*2,5-8*	*0,5-1*
	g BOİ/m^2.gün	*8-20*	*5-16*	*1-2*
1. Kademe için maksimum organik yükleme	*g çözünmüş BOİ/m^2.gün*	*12-15*	*12-15*	
	g BOİ/m^2.gün	*24-30*	*24-30*	
NH_3 yükü	*g N/ m^2.gün*		*0,75-1,5*	
Hidrolik bekleme süresi	*sa*	*0,7-1,5*	*1,5-4*	*1,2-3*

6.2.2.2.Ayrık Nitrifikasyon Sistemleri

Askıda çoğalan ve biyofilm sistemlerin her ikisi de ayrık veya birleşik nitrifikasyon prosesi için kullanılabilmektedir. Nitrifikasyonun ayrı reaktörde gerçekleştirilmesi, büyük bir proses esnekliği ve emniyeti sağlamaktadır. Karbon giderimi ve nitrifikasyon prosesleri birbirlerinden bağımsız olarak işletilebilmektedir ve bu sayede her iki proses de ayrı ayrı optimize edilebilmektedir. Ayrıca, nitrifikasyon bakterileri için toksik olabilecek organik bileşiklerin potansiyel etkisi de karbon oksidasyonu sırasında azaltılabilmektedir.

Şekil 6.3b'de gösterilen sistemde ise, birinci tanka yüksek F/M oranında yükleme uygulanabileceğinden bu tankın hacmi daha küçük yapılabilmektedir. Fakat bu durumda sistem yük değişimine karşı daha hassas bir duruma gelmektedir. Bu tip reaktörlerde daha çok çamur oluşur. Ancak, her iki tanktaki çamuru birbirlerinden ayrı tutmak için ek bir çökeltme havuzu yapılmaktadır. Bu sisteminin en önemli faydası nitrifikasyon veriminin yüksek olmasıdır. Özellikle gelen atıksuda toksik madde bulunma ihtimali varsa bu sistem daha faydalı olmaktadır. Çünkü toksik bileşiklerin ilk havuzda giderilmesi veya etkisini kaybetmesi söz konusudur. Böylece tesisin ikinci bölümünde yer alan nitrifikasyon bakterileri korunmuş olur. Ancak, bu sistemlerde ara kademe çökeltim havuzları gerekeceğinden ilk yatırım maliyeti tek çamurlu sistemlere göre daha yüksek olur.

6.3. Azotun Nitrifikasyon-Denitrifikasyon Prosesleri ile Giderimi

Atıksudaki azot biyolojik olarak iki adımda giderilir. Birinci adımda amonyum havalı ortamda nitrata dönüştürülürken (nitrifikasyon) ikinci adımda nitrat azot gazına dönüştürülür (denitrifikasyon). Denitrifikasyon metanol ilavesi veya uygun organik maddelerin karbon kaynağı olarak kullanımı ile ayrı bir reaktörde veya birleşik nitrifikasyon-denitrifikasyon sistemlerinde yapılabilmektedir. Biyolojik nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesi, aşağıdaki sebepler dolayısıyla azot gideriminde kullanılan en yaygın metotlardandır.

- Arıtma verimi yüksektir.
- Proses kararlılığı ve güvenilirliği fazladır.
- Proses kontrolü diğer sistemlere kıyasla kolaydır.
- Maliyeti yüksek değildir.

6.3.1. Denitrifikasyon Prosesi: Stokiyometri ve Kinetik

Denitrifikasyon prosesi heterotrofik bakteriler tarafından gerçekleştirilir. Bu proseste organik madde elektron kaynağı, nitrat ise elektron alıcı olarak kullanılır. Farklı karbon kaynakları için denitrifikasyon stokiyometrisi aşağıdaki gibidir;

Atıksu içerisindeki organik madde:

$C_{10}H_{19}O_3N + 10\ NO_3^- \rightarrow 5N_2 + 10\ CO_2 + 3\ H_2O + NH_3 + 10\ OH^-$

Metanol:

$CH_3OH + 6\ NO_3^- \rightarrow 3N_2 + 5CO_2 + 7\ H_2O + 6\ OH^-$

Asetat:

$CH_3COOH + 8NO_3^- \rightarrow 4N_2 + 10\ CO_2 + 6H_2O + 8OH^-$

Yukarıdaki stokiyometrik reaksiyonlara hücre çoğalması dahil edilmediğinden gerçekte gerekli organik madde miktarı bu denklemlerde verilenden daha fazla olacaktır. Mikroorganizma çoğalması da eklendiğinde 1 g NO_3 azotunu gidermek için gerekli organik madde miktarı (KOİ biriminde) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$\frac{biyolojik\ olarak\ ayrışabilen\ KO\dot{I}}{NO_3 - N} = \frac{2{,}86}{1 - 1{,}42\ Y_n} \tag{6.5}$$

Burada;

2,86 : Nitrat azotunun oksijen eşdeğeri (g O_2/g NO_3-N)
Y_n : Mikroorganizma net dönüşüm oranı (g UAKM/g KOİ)

ifade etmektedir.

Mikroorganizma net dönüşüm oranı sistemin çamur yaşına (SRT) ve biyokütle ölüm hızına (b) bağlı olarak ifade edilebilir.

$$Y_n = \frac{Y}{1 + b\ SRT} \tag{6.6}$$

Buna göre denitrifikasyon için gerekli organik madde miktarı sistemin çamur yaşı ve biyokütle dönüşüm oranı ile bağlantılıdır. Organik madde kaynağına göre anoksik şartlarda görülen mikroorganizma dönüşüm oranı 0,28-0,4 g UAKM/g KOİ aralığında değişmektedir. Bu durumda 1 g nitrat azotunu gidermek için 4,8-6,6 g KOİ'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Denitrifikasyon sırasında ayrıca giderilen nitrat azotu başına 3,57 g $CaCO_3$ alkalinitesi üretilir. Bu sayede nitrifikasyon sırasında tüketilen alkalinitenin yarısı geri kazanılmış olur.

Nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerinin stokiyometrik karşılaştırılması Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerinin karşılaştırılması

Proses	***Oksijen kullanımı***			***Alkalinite kullanımı***	
	mol O_2/mol N	***g O_2/g N***	***g O_2/g N****	***Eşdeğer alk./mol N***	***Eşdeğer alk./mol N****
Nitrifikasyon	*2*	*4,57*	*4,3*	*2*	*1,9*
Denitrifikasyon	*-1,25*	*-2,86*	*-2,4*	*-1*	*-0,8*
Nitrifikasyon+ Denitrifikasyon	*0,75*	*1,71*	*1,9*	*1*	*1,1*

** Pratik değerler, çamur üretimindeki azotu da içermektedir.*

Tablo 6.7'de karbon kaynağının türüne göre denitrifikasyon hızları verilmektedir. Buna göre en yüksek denitrifikasyon hızları metanol gibi mikroorganizmalar tarafından kolay tüketilebilen organik maddelerle elde edilmektedir. Mikroorganizmanın içsel solunumu ile gerçekleşen denitrifikasyon ise oldukça yavaştır.

Tablo 6.7. Çeşitli karbon kaynakları için tipik denitrifikasyon hızları

Karbon kaynağı	***Denitrifikasyon hızı (mg NO_3^-/mg UKM.gün)***	***Sıcaklık (20°C)***
Metanol	*0,21-0,32*	*25*
Metanol	*0,12-0,9*	*20*
Atıksu	*0,03-0,11*	*15-27*
İçsel metabolizma hidroliz ürünleri	*0,017-0,048*	*12-20*

Denitrifikasyon için dışsal karbon kaynakları kullanılması halinde denitrifikasyon için gerekli organik madde miktarı teorik olarak hesaplanabilir. Örneğin ortamda nitrat, nitrit ve çözünmüş oksijenin bulunması durumunda metanol ihtiyacı (6.7) eşitliği ile hesaplanabilir:

$$C_m = 2{,}47\ N_0 + 1{,}53\ N_1 + 0{,}87\ D_0 \qquad (6.7)$$

Burada,

C_m : gerekli metanol konsantrasyonu, mg/L
N_0 : başlangıç nitrat konsantrasyonu, mg/L
N_1 : başlangıç nitrit konsantrasyonu, mg/L
D_0 : başlangıç çözünmüş oksijen konsantrasyonu, mg/L

Denitrifikasyon prosesi için kinetik parametreler Tablo 6.8'de verilmektedir. Tablodan da görülebileceği üzere denitrifikasyon yapan heterotrofik bakterilerin çoğalma hızı nitrifikasyon bakterilerine göre oldukça yüksektir. Bu nedenle nitrifikasyon-denitrifikasyon yapan aktif çamur sistemleri daha hassas ve yavaş çoğalan nitrifikasyon bakterilerinin sistemdeki kalış sürelerine göre tasarlanır.

Tablo 6.8. Heterotrofik bakteriler için tipik kinetik katsayılar (20°C için) [1]

Katsayı	***Birim***	***Aralık***	***Tipik değer***
Maksimum çoğalma hızı (μ_{maks})	*g UAKM/g UAKM gün*	*3-13*	*6*
Substrat yarı doygunluk sabiti (K_s)	*g KOİ/m^3*	*5-40*	*20*
Biyokütle dönüşüm oranı (Y)	*g UAKM/g KOİ*	*0,3-0,5*	*0,4*
Biyokütle ölüm hızı (b)	*g UAKM/g UAKM gün*	*0,06-0,2*	*0,12*

6.3.2. Denitrifikasyon Proseslerinin Sınıflandırılması

Karbon oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon tek sistem içinde gerçekleştirilebilir. Nitrifikasyon yapıldıktan sonra denitrifikasyon yapılması sistemde oksijen tasarrufu sağlar. Ayrıca uygun konfigürasyonun kullanılması halinde denitrifikasyon için ilave karbon kaynağına gerek kalmaz. Nitrifikasyon-denitrifikasyonun gerçekleştirildiği aktif çamur prosesleri önde denitrifikasyon, sonda denitrifikasyon ve simultane denitrifikasyon sistemleri olarak gruplandır. Azot giderimi için sık kullanılan aktif çamur sistemlerinin tipik tasarım kriterleri Tablo 6.9'da verilmektedir.

Tablo 6.9. Azot giderimi için sık kullanılan proseslerin tasarım kriterleri [1]

Parametre	*SRT (gün)*	*UAKM (mg/L)*	*Hidrolik bekleme süresi (sa)*			*Çamur geri devir oranı (%)*	*İçsel geri devir oranı (%)*
			Toplam	*Anoksik bölme*	*Havalı bölme*		
MLE	*7-20*	*3000-4000*	*5-15*	*1-3*	*2-12*	*50-100*	*100-200*
4 kademeli Bardenpho	*10-20*	*3000-4000*	*8-20*	*1-3 (1. kademe)* *2-4 (3. kademe)*	*4-12 (2. Kademe)* *0,5-1 (4. Kademe)*	*50-100*	*200-400*
Oksidasyon hendeği	*20-30*	*2000-4000*	*18-30*	*Değişken*	*Değişken*	*50-100*	

6.3.2.1.Önde Denitrifikasyon Sistemleri

Önde denitrifikasyon proseslerinin en önemli avantajı atıksudaki organik maddelerin denitrifikasyon amacıyla kullanılabilmesi ve ilave karbon kaynağına ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu sistemlerin en önemlileri Modifiye Ludzack-Ettinger Prosesi (MLE) ve dört basamaklı Bardenpho prosesleridir. Bu sistemler ile atıksudaki toplam azotun %60-80'i giderilebilmektedir. Nitrat giderme verimi atıksudaki mevcut organik madde miktarına ve nitrat geri devir oranına bağlıdır.

MLE Prosesi

MLE prosesi en çok kullanılan azot giderme proseslerinden biridir (Şekil 6.8). Aerobik bölgede üretilen nitrat azotunun sistemin başına geri devrettirilmesi (içsel geri devir) ile nitratın atıksudaki organik maddeden yararlanılarak giderilmesi esasına dayanır. İçsel geri devir oranı giriş atıksu debisinin 2-4 katıdır. Atıksuda yeterli organik madde bulunması ve anoksik bölmenin uygun hacimde tasarlanması halinde çıkışta 4-7 mg NO_3-N konsantrasyonlarına inilebilir. Sadece karbon giderimine yönelik konvansiyonel aktif çamur sistemleri bu proses uygun olarak kolayca modifiye edilebilir ve çıkış azot konsantrasyonları düşürülebilir.

Şekil 6.8. Modifiye Ludzack-Ettinger Prosesi (MLE) akım şeması

Bardenpho Prosesi (Dört basamaklı)

Dört basamaklı Bardenpho prosesinde denitrifikasyonun olabilmesi için karbon kaynağı olarak hem atıksudaki karbon, hem de içsel solunum sonucu açığa çıkan karbon kullanılır. Bu bakımdan 4 basamaklı Bardenpho prosesi hem önde hem de sonda denitrifikasyon yapılan bir sistemdir. Karbon oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon için havuzda ayrı bölümler kullanılır. Atıksu öncelikle anoksik olan denitrifikasyon reaktörüne girer. Bu reaktöre aynı zamanda karbon oksidasyonu-nitrifikasyon reaktörü çıkış suyu da geri döndürülerek verilmektedir (Şekil 6.9). Atıksudaki karbon, geri döndürülen sudaki nitratı denitrifiye etmek için kullanılır. Organik yükleme yüksek olduğundan, denitrifikasyon da hızlıdır. Atıksudaki amonyum ilk anoksik ortama girmektedir ve hiçbir değişime uğramadan sistemdeki ilk havalandırma tankına gelir. Bu tanktan çıkan nitrifiye olmuş atıksu, ikinci anoksik reaktöre girer. Bu ikinci reaktörde içsel solunum ile karbon sağlanır ve denitrifikasyon gerçekleştirilir. İkinci havalı reaktör nispeten küçük olup, azot gazının ortamdan uzaklaştırılması ve içsel solunum sonucu açığa çıkan amonyağın nitrifiye edilmesi için kullanılır. Bardenpho presesinin geliştirilmiş şekli olan beşli reaktör sistemi de azot ve fosforun birlikte arıtımı için kullanılmaktadır.

Şekil 6.9. 4 basamaklı Bardenpho Prosesi akım şeması

6.3.2.2.Simultane Denitrifikasyon Sistemleri

Simultane denitrifikasyon sistemleri karbon oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerinin aynı ortamda gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu tip sistemler oksijenin aktif çamur flokları içerisine difüzyonu esasına dayanmaktadır. Buna göre flok merkezine doğru oksijen tükenerek anoksik şartlar hakim olur ve denitrifikasyon gerçekleşir. Bu sistemlerin en önemli örneği oksidasyon hendekleridir. Oksidasyon hendeği gibi sistemlerde kesikli havalandırma ve oksijen kontrolü uygulaması ile tek reaktör içerisinde karbon giderimi, nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerini gerçekleştirilebilir. Oksidasyon hendeği akış şeması Şekil 6.3'te verilmektedir. Ayrıca, ardışık kesikli reaktörlerde de işletme şartları (havalandırma, besleme süreleri) ayarlanarak simultane denitrifikasyon prosesi gerçekleştirilebilir.

Oksidasyon Hendeği

Oksidasyon hendeğinde atıksu fırça tipi hareketli yüzeysel havalandırıcılar ile ya da reaktörün belirli bölgelerine döşenen difüzörler ile havalandırılır ve kanalda hareket etmesi sağlanır (Şekil 6.10). Hendekte havalı bölüm havalandırıcının arkasında, anoksik bölüm ise havalandırıcının önündedir. Havalandırıcının dönüş hızı ve hareket hızı kontrol edilerek sudaki oksijenin istenilen seviyede kalması sağlanır. Son yıllarda, oksidasyon hendeklerinde fırça tipi yüzeysel havalandırıcılar yerine tankın belirli bölgelerine döşenen difüzörler kullanılmaktadır. Buna göre difüzör döşenen bölgeler havalı, diğer bölgeler ise anoksik olur. Anoksik bölgelere yerleştirilen yavaş hızlı karıştırıcılar ile aktif çamurun askıda kalması ve akımın yönlendirilmesi yapılır.

Şekil 6.10. Oksidasyon hendeği akım şeması

6.3.2.3.Sonda Denitrifikasyon Sistemleri

Sonda denitrifikasyon sistemleri (Şekil 6.11) karbon kaynağının dışarıdan eklenip eklenmemesine göre ikiye ayrılabilir. Denitrifikasyon prosesi için gerekli karbon metanol, asetat gibi kolay ayrışabilen organik maddelerin sisteme dışarıdan eklenmesi ile sağlanabilir. Ancak, bu durum işletme maliyetlerini oldukça arttıracaktır. Teorik olarak 1 g nitrat azotunu giderebilmek için 4,8-6,6 g KOİ'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Dışsal karbon kaynağı olarak kullanılabilecek ucuz karbon kaynaklarının, örneğin endüstriyel atıksular, fermantasyon atıkları gibi, bulunması halinde işletme maliyetleri düşürülerek yüksek nitrat giderme verimlerine ulaşılabilir. Ancak, dışarıdan karbon kaynağı eklenirken karbonun fazlasının çıkış suyu kalitesini olumsuz etkileyebileceğinden sistem çok iyi optimize edilmelidir. Sonda denitrifikasyon sistemlerinde dışsal karbon yerine mikroorganizmanın içsel solunumu sonucu açığa çıkan karbon da kullanılabilir. Ancak, içsel solunum ile denitrifikasyon hızı oldukça yavaş olduğundan, yeterli denitrifikasyon verimini elde edebilmek için anoksik reaktörün hacmi çok büyük olmalıdır. Ayrıca denitrifikasyon ile açığa çıkan azot gazının son çökeltim havuzu verimini azaltmaması için anoksik bölmenin çıkışında kısa süreli (10-20 dakika) bir havalandırma yapılarak azot gazının floklardan uzaklaştırılması gerekebilir.

Şekil 6.11. Sonda denitrifikasyon sistemi akım şeması

Problem 6.1

Aşağıda özellikleri verilen nitrifiye edilmiş ve çökeltilmiş atıksu için sonda denitrifikasyon yapan bir aktif çamur sistemi tasarlayınız. Çıkış nitrat azotu konsantrasyonunun 2 g/m^3 olması istenmektedir. Hesaplanması istenenler:

1) *Gerekli metanol dozu*
2) *Anoksik bölme hacmi ve bekletme süresi*
3) *Fazla çamur miktarı*

Parametre	*Birim*	*Değer*
Debi	*m^3/gün*	*4000*
Nitrat azotu konsantrasyonu	*g/m^3*	*25*
Ara çökeltim havuzundan gelen AKM	*g/m^3*	*20*
Sıcaklık	*°C*	*15*

Kabuller

- *Biyokütle dönüşüm oranı, Y = 0,18 g UAKM/g biyolojik olarak ayrışabilir KOİ*
- *Mikroorganizma ölüm hızı, k_d = 0,05 g UAKM/g UAKM∗gün (15 °C)*
- *Maksimum özgül substrat tüketim hızı, k = 6,7 g biyolojik olarak ayrışabilir KOİ/g UAKM∗gün*
- *Substrat yarı doygunluk sabiti, K_s = 10,9 g/m^3*
- *Mikroorganizmanın inert partiküler ürünlere dönüşüm oranı, f_d = 0,15*
- *Reaktör içi AKM konsantrasyonu = 2000 g/m^3*
- *Öndeki havalı bölmede atıksudaki BOİ'nin tamamen tüketildiği kabul edilmiştir.*
- *Anoksik bölme sonrası gelen havalı bölmede bekletme süresi 15 dakika alınmıştır.*
- *Anoksik bölmede kullanılamayan fazla metanolün en son havalı bölmede giderileceği kabul edilmiştir.*
- *Anoksik bölme için çamur yaşı 5 gün seçilmiştir.*
- *Son çökeltim tankı yüzeysel yükleme hızı = 24 m^3/m^2.gün*

Çözüm.

1. *Kinetik yaklaşım kullanılarak anoksik bölmede kullanılamayan metanol konsantrasyonunun (S) bulunması*

$$S = \frac{K_S\,[1 + k_d\,\theta_x]}{\theta_x\,(Y\,k - k_d) - 1} = \frac{10{,}9\,[1 + 0{,}05 * 5]}{5 * (0{,}18 * 6{,}7 - 0{,}05) - 1} = 2{,}9\ g/m^3$$

2. *Gerekli metanol dozunun bulunması*

$$Giderilen\ nitrat\ azotu\ miktarı\ =\ 25 - 2\ =\ 23\ g/m^3$$

Net dönüşüm oranı (g UAKM/g biyolojik olarak yarışabilir KOİ),

$$Y_n = \frac{Y}{1 + k_d\,SRT} = \frac{0{,}18}{1 + 0{,}05 * 5} = 0{,}144$$

$$\frac{biyolojik\ olarak\ ayrışabilen\ KO\dot{I}}{NO_3 - N} = \frac{2{,}86}{1 - 1{,}42 * Y_n} = \frac{2{,}86}{1 - 1{,}42 * 0{,}144} = 3{,}6\ g/g$$

$$KO\dot{I}\ olarak\ gerekli\ metanol\ dozu\ =\ 3{,}6 * 23\ +\ 2{,}9\ =\ 85{,}7\ g\ KO\dot{I}/m^3$$

$$Metanol\ dozu\ =\ (85{,}7\ g\ KO\dot{I}/m3)\ /\ (1{,}5\ g\ KO\dot{I}/g\ metanol)\ =\ 57{,}1\ g/m^3$$

$$Günlük\ metanol\ tüketimi\ =\ 57{,}1 * 4000\ /\ 1000\ =\ 228{,}5\ kg/gün$$

3. *Fazla çamur üretimi*

$$P_{X,AKM} = \frac{QY(S_0 - S)}{(1 + k_d\theta_x)0{,}85} + \frac{f_d k_d QY(S_0 - S)\theta_x}{(1 + k_d\theta_x)0{,}85} + Q\ AKM$$

$S \approx S_0$ kabul edilerek,

$$P_{X,AKM} = \frac{4000 * 0{,}18 * 85{,}7}{(1 + 0{,}05 * 5)0{,}85} + \frac{0{,}15 * 0{,}05 * 4000 * 0{,}18 * 85{,}7 * 5}{(1 + 0{,}05 * 5)0{,}85} + 4000 * 20 = 140252\ \ g/gün$$

4. *Anoksik bölme hacmi*

$$(Reaktör\ içi\ AKM\ konsantrasyonu) * Hacim\ =\ P_{X,AKM}\ \theta_c$$

Reaktör içi AKM konsantrasyonu 2000 mg/L kabulü ile,

$$Hacim\ (V) =\ 140252 * 5/2000 =\ 350{,}6\ m^3$$

$Hidrolik\ bekletme\ süresi\ =\ V/Q\ =\ 350{,}6 * 24/4000 =\ 2{,}1\ saat$

Anoksik bölmenin son kısmına havalandırma tertibatı döşenerek oluşan azot gazını aktif çamurdan sıyırmak ve çamurun çökmesini kolaylaştırmak amacıyla havalandırma yapılacaktır. Bu bölgede 15 dakikalık (0,25 saat) bir bekletme süresi yeterlidir.

5. *Son çökeltim havuzları tasarımı*

   $Yüzey\ alanı\ =\ 4000/24\ =\ 166{,}7\ m^2$

   Dairesel planlı 2 çökeltim havuzu yapılır ise 1 havuz için çap ≈ 10,5 m olarak hesaplanır.

6.4. Yenilikçi Biyolojik Azot Giderimi Prosesleri

Biyolojik arıtma tesislerinde, atıksu arıtma çamurlarının (birincil ve ikincil) anaerobik olarak çürütülmesi sonucu organik madde ve biyokütle içerisindeki organik azotun ve fosforun büyük kısmı çözünmüş hale geçer. Bu nedenle, özellikle anaerobik çürütücü çıkışı ve çamur susuzlaştırma birimlerinin üst suları yüksek konsantrasyonda azot ve fosfor içerir. Bu akımlar tesisin yerleşim planı ve borulamasına göre ön çökeltim tankı ya da aktif çamur prosesi girişine geri beslenir. Buda tesisin azot ve fosfor yükünü ciddi oranda (%10-20) arttırır. Son yıllarda arıtma tesislerinin çamur işleme birimlerinden kaynaklanan yan akımlardaki azot yükünün tesisin azot giderme performansına ve enerji kullanımına olan etkisini azaltmak için bir çok yeni proses geliştirilmiştir. Bu prosesler özellikle iki kademeli nitrifikasyon prosesini gerçekleştiren bakterilerin çoğalma kinetiklerindeki farklılıklara ve anaerobik şartlarda amonyum oksitleyen bakterilerin (Anammox) bulunmasına bağlı olarak geliştirilmiştir.

6.4.1. Nitritasyon – Denitritasyon Prosesi

Bu proseste amonyum öncelikle nitrite oksitlenir (nitritasyon). Daha sonra, nitrit organik madde kullanılarak azot gazına dönüştürülür (denitritasyon). Nitritin nitrata oksitlenmesi engellenerek, tam nitrifikasyonda kullanılan oksijen ve havalandırma enerjisinden %25 tasarruf edilir. Ayrıca, nitrit üzerinden denitrifikasyon yapılması proses için gerekli organik madde miktarını %40 oranında azaltır.

6.4.1.1.Proses Stokiyometrisi ve Kinetik

Amonyumun ototrofik bakteriler tarafından nitrite oksitlenmesi prosesinin stokiyometrik denklemi aşağıda verilmektedir.

$$NH_4HCO_3 + 0{,}9852\ NaHCO_3 + 0{,}07425\ CO_2 + 1{,}4035\ O_2 \rightarrow 0{,}01485\ C_5H_7O_2N + 0{,}9852\ NaNO_3 + 2{,}9406\ H_2O + 1{,}9852\ CO_2$$

Oluşan nitritin azot gazına indirgenmesi için stokiyometrik olarak gerekli organik madde miktarı organik maddenin tipine göre değişmektedir. Aşağıda, en çok kullanılan organik madde kaynakları için stokiyometrik denklemler verilmektedir.

Atıksu

$$C_{10}H_{19}O_3N + 16{,}66\ NO_2^- + 0{,}33\ H_2O \rightarrow 10\ CO_2 + NH_3 + 8{,}33\ N_2 + 16{,}66\ OH^-$$

Metanol

$$5\ CH_3OH + 10\ NO_2^- \rightarrow 5\ N_2 + 5\ CO_2 + 5\ H_2O + 10\ OH^-$$

Asetat

$$5\ CH_3COOH + 13{,}33\ NO_2^- \rightarrow 6{,}67\ N_2 + 10\ CO_2 + 3{,}33\ H_2O + 13{,}33\ OH^-$$

Yukarıdaki reaksiyonlar hücre sentezini içermediğinden gerçekte gerekli organik madde miktarı daha fazla olacaktır. Denitritasyon için gerekli biyolojik olarak ayrışabilir KOİ miktarı hücre sentezini de içerecek şekilde aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{biyolojik\ olarak\ ayrışabilen\ KO\dot{I}}{NO_2 - N} = \frac{1{,}71}{1 - 1{,}42 * Y_n} \quad (6.8)$$

Burada;

1,71 : Nitritin oksijen eşdeğeri (g O_2/g NO_2-N)
Y_n : Biyokütle net dönüşüm oranı (g UAKM/g KOİ)

ifade eder. Denitritasyon reaksiyonu denitrifikasyona göre %40 daha az organik madde gerektirir. Nitritasyon prosesi sırasında nitrifikasyon prosesinde tüketilene eşit miktarda alkalinite tüketimi olur. Denitritasyon reaksiyonunda da önemli miktarda alkalinite üretilmektedir. Bu nedenle kararlı bir nitritasyon prosesi için denitritasyon ile üretilen alkaliniteye ya da dışarıdan alkalinite takviyesine ihtiyaç duyulur. Alkalinite takviyesi, yan akımın ham atıksu, ön çökeltim sonrası atıksu ya da arıtma tesisi deşarj suyu ile karıştırılması ile de yapılabilir. Ancak, bu durumda nitritasyon prosesini kontrol etmek ve özellikle nitritin nitrata oksidasyonunu engellemek zorlaşır.

Amonyum oksidasyonu ve nitrit oksidasyonu yapan mikroorganizmaların kinetik sabitleri Tablo 6.10'da verilmektedir. Buna göre, amonyum oksidasyonu yapan bakterilerin biyokütle dönüşüm oranı nitrit oksitleyen mikroorganizmalara göre daha yüksektir. Ayrıca, amonyum oksitleyen bakteriler daha düşük oksijen konsantrasyonlarında yaşayabilmektedir. Bu durumdan yararlanılarak, nitrit oksitleyen bakteriler baskı altına alınır ve sistemde çoğalmaları engellenir. Nitrit oksitleyen bakterilerin baskı altına alınması için genellikle aşağıdaki 4 mekanizmadan yararlanılır:

(1) Reaktörü 20^0C'den yüksek sıcaklıkta ve düşük çamur yaşı ile işletmek
(2) Reaktörü kesikli havalandırma ile düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonunda işletmek
(3) Serbest amonyak inhibisyonu (reaktör pH'sına bağlıdır)
(4) Serbest nitröz asidi inhibisyonu (reaktör pH'sına bağlıdır)

Tablo 6.10. Amonyum oksidasyonu ve nitrit oksidasyonu yapan mikroorganizmalar için kinetik sabitler (20°C için) [4]

Parametre	***Birim***	***Amonyum oksidasyonu***	***Nitrit oksidasyonu***
Maksimum çoğalma hızı (μ_{maks})	*g UAKM/g UAKM gün*	*0,9*	*1*
Substrat yarı doygunluk sabiti (K)	*mg/L*	*0,5*	*0,2*
Biyokütle dönüşüm oranı (Y)	*g UAKM/g Substrat*	*0,15*	*0,05*
Biyokütle ölüm hızı (k_d)	*g UAKM/g UAKM gün*	*0,17*	*0,17*
Oksijen yarı doygunluk sabiti (K_{O2})	*mg/L*	*0,5*	*0,9*

6.4.1.2.Nitritasyon – Denitritasyon Sistemleri

Bu bölümde, nitritasyon-denitritasyon amacıyla kullanılabilecek proseslerin detaylı açıklaması bulunmaktadır. Bu sistemlerin tipik tasarım ve kontrol parametreleri Tablo 6.11'de verilmektedir.

Tablo 6.11. Nitritasyon – Denitritasyon sistemlerinin tipik tasarım ve kontrol parametreleri [4]

Proses	*Temel tasarım parametresi*	*Amonyum azotu yükleme hızı (kg N/ m^3.gün)*	*Çamur yaşı (gün)*	*Proses kontrol parametresi*
BABE prosesi (AKR)	*Çamur yaşı* *Amonyum azotu yükleme hızı* *Sıcaklık*	*0,4*	*4-8*	*BABE reaktörüne yapılan çamur geri devri* *Sıcaklık (maksimum 25°C)* *Çözünmüş oksijen*
AKR	*Çamur yaşı* *Amonyum azotu yükleme hızı*	*0,4-0,6*	*5-10 (toplam)*	*Çözünmüş oksijen (<1 mg/L)* *Dışsal alkalinite* *Dışsal karbon*
SHARON prosesi	*Çamur yaşı (havalı, anoksik)* *Sıcaklık*	*<0,7**	*1,5/0,75** (havalı/anoksik)*	*Sıcaklık (35-38°C)* *Havalı çamur yaşı* *Dışsal karbon*

** Maksimum amonyum azotu yükleme hızı sistemin toplam hacminin %67 havalı %33 anoksik ve oksijen tüketim hızının 150 mg/L saat olması durumu için verilmiştir.*
*** Havalı ve anoksik çamur yaşları yan akım debisine bağlıdır. Yan akıma eklenebilecek seyreltme suyu sisteme beslenen toplam debi hesaplamalarında dikkate alınmalıdır.*

BABE Prosesi

BABE (Kesikli Biyolojik Takviye Prosesi) prosesi yan akımdaki amonyağın nitrite oksidasyonunu amacıyla kullanılan bir reaktördür (Şekil 6.12). Reaktörde üretilen ve amonyak oksitleyen bakterilerce zengin çamur, ana akımı arıtan prosese gönderilerek aşılama (biyo-takviye) yapılır. Bu sayede, ana prosesin nitrifikasyon verimi de arttırılır. BABE prosesi amacıyla yan akımda teşkil edilen kesikli havalandırılan bir AKR, anoksik ve aerobik bölmelerden oluşan piston akımlı bir reaktör ya da MLE prosesi kullanılabilir. Ana prosesin geri devir çamurunun <%10'u BABE reaktörüne gönderilir ve sıcaklık 25 °C civarında tutulur. Bu sayede amonyum nitrite okside olur ve üretilen nitrit geri devir çamurundaki içsel karbon ve eklenen ilave karbon kaynakları ile denitrite edilir. BABE reaktörünün fazla çamuru ana prosese geri devrettirilir.

Şekil 6.12. BABE prosesi akım şeması

AKR

Ardışık kesikli reaktörde oksijen ya da pH kontrolü yapılarak nitritasyon-denitritasyon reaksiyonları gerçekleştirilebilir (Şekil 6.13). Oksijen 1 mg/L'nin altında tutulur. Denitritasyon amacıyla dışsal karbon eklenir. AKR'nin reaksiyon süresi boyunca atıksu beslemesi yapılır. AKR genelde 30°C'de işletilir. Biyolojik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısı, ısı değiştiriciler

yardımı ile uzaklaştırılır ve reaktörün 38°C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkması engellenir. Çamur yaşı 5-10 gün arasında tutulur.

Şekil 6.13. Ardışık kesikli reaktör akım şeması

SHARON Prosesi

SHARON prosesi birbirine seri bağlı tam karışımlı anoksik ve anaerobik reaktörlerden oluşur (Şekil 6.14). Proses 35-38°C'de işletilir. Aerobik ve anoksik bölmelerin çamur yaşı sırasıyla 1,5 ve 0,75 gün olarak tasarlanır ve işletilir. Aerobik bölmeden anoksik bölmeye, besleme debisinin 13 katı kadar nitrit geri devri yapılır. Anoksik bölmeye nitrit giderimi amacıyla dışsal karbon eklenir ve üretilen alkalinite nitrifikasyon prosesinde kullanılır. Gerektiğinde dışsal alkalinite kaynağı da gerekebilir. Çok yüksek konsantrasyonda amonyum içeren yan akımlar arıtma tesisi çıkış suyu ya da ön çökeltim havuzu çıkış suyu ile seyreltilerek proses girişindeki amonyum konsantrasyonunun 1500 mg/L'nin altına inmesi sağlanır.

Şekil 6.14. SHARON® prosesi akım şeması

6.4.2. Kısmi Nitritasyon – Anaerobik Amonyum Oksidasyonu (Deamonifikasyon) Prosesi

Deamonifikasyon prosesinde öncelikle amonyağın bir kısmı nitrite oksitlenir (kısmi nitritasyon). Daha sonra amonyum ve nitrit anaerobik şartlar altında ototrofik bateriler tarafından azot gazı ve nitrata dönüştürülür. Bu reaksiyonu gerçekleştirilen mikroorganizmalar Anammox bakterileri olarak adlandırılır.

6.4.2.1.Proses Stokiyometrisi ve Kinetik

Anammox bakterilerinin varlığı deniz ve göl sedimanları, toprak, sulak alanlar, atıksu arıtma tesisi çamurları gibi birçok farklı ortamda gösterilmiştir. Bu bakterilerin maksimum spesifik çoğalma hızı ototrafik nitrifikasyon bakterilerinin onda biri kadardır. Bu nedenle deamonifikasyon proseslerinin tasarımında çamur yaşı en önemli parametredir.

Kısmi nitritasyon prosesinin stokiyometrik denklemi aşağıda verilmektedir. Bu proses ile amonyumun bir kısmı nitrite dönüştürülür. Bu reaksiyon için oksijen ve alkalinite gerekmektedir.

$$2{,}3\ NH_4^+ + 1{,}87\ O_2 + 2{,}66\ HCO_3^- \rightarrow 0{,}02\ C_5H_7O_2N + NH_4^+ + 1{,}32\ NO_2^- + 2{,}55\ CO_2 + 3{,}94\ H_2O$$

Havasız şartlar altında ototrofik anammox bakterileri amonyumu elektron verici ve nitriti elektron alıcı olarak kullanarak amonyumu okside ederler. Bu reaksiyon için organik madde gerekmemektedir. Reaksiyon sonucunda azot gazı ve nitrat oluşur. Açığa çıkan nitrat klasik denitrifikasyon prosesi ile azot gazına dönüştürüleceğinden organik maddeye ihtiyaç duyulur. Ancak deamonifikasyon ile giderilen 1 kg azot başına 0,11 kg nitrat azotu üretildiğinden, gerekli organik madde miktarı klasik denitrifikasyon prosesinin %11'i kadardır. Denitrifikasyon sırasında alkalinite üretileceğinden kısmi nitritasyon ve anaerobik amonyum oksidasyonu proseslerinde tüketilen alkalinitenin bir kısmı geri kazanılır. Ayrıca, deamonifikasyon prosesinin sadece ilk adımında (kısmi nitritasyon) oksijen kullanıldığından klasik nitrifikasyon prosesine göre %40 daha az oksijen gereklidir.

$$NH_4^+ + 1{,}32\ NO_2^- + 0{,}066\ HCO_3^- + 0{,}13\ H^+ \rightarrow 1{,}02\ N_2 + 0{,}26\ NO_3^- + 0{,}066\ CH_2O_{0,5}N_{0,15} + 2{,}03\ H_2O$$

Anammox bakterileri için kinetik sabitler Tablo 6.12'de verilmektedir. Anammox bakterilerinin hücre dönüşüm oranı çok düşük olduğundan, bu mikroorganizmaların reaktör içerisinde tutulabilmesi için çamur yaşının 20 günden fazla olması gereklidir. Anammox bakterilerinin en önemli özelliği uygun şartlar altında çok iyi çökelebilen granüller oluşturmalarıdır. Bu özelliğe dayanılarak granüler yataklı reaktörler ve spesifik yoğunluk esasına dayalı sistemler (hidrosiklon gibi) en sık kullanılan sistemlerdir. Deamonifikasyonun tek çamurlu bir sistemde yapılması halinde oluşan granüllerin dış kısmında amonyak oksitleyen bakteriler, iç kısmında ise anammox bakterileri bulunur. Bu durumda oksijen konsantrasyonu 0,3 mg/L civarında tutulur. Granülün dış yüzünde nitritasyon reaksiyonu gerçekleşir, iç kısımlarda ise oksijen konsantrasyonu düştüğünden anammox reaksiyonu için uyun şartlar oluşur.

Tablo 6.12. Anammox bakterileri için kinetik sabitler [4]

Parametre	***Birim***	***Amonyum oksitleyen bakteriler (20°C için)***	***Anammox (30-35°C için)***
Maksimum spesifik çoğalma hızı (μ_{maks})	*g UAKM/g UAKM.gün*	*0,9*	*0,06-0,07*
Amonyum yarı doygunluk sabiti (K_{NH4})	*mg/L*	*0,5*	*0,07-0,1*
Nitrit yarı doygunluk sabiti (K_{NO2})	*mg/L*	*-*	*<0,1*
Mikroorganizma dönüşüm oranı (Y)	*g UAKM/g NH_4-N*	*0,12*	*0,07-0,13*

Nitrit, anammox bakterileri için toksiktir ve geri dönüşümsüz inhibisyona yol açar. Nitrit inhibisyonu konsantrasyon ve maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olup, reaktör de nitrit birikiminden kaçınılmalıdır. Ayrıca, oksijen de anammox bakterileri üzerinde geri dönüşümlü inhibisyona yol açar. Anammox bakterileri nitrit için nitrit okside eden bakteriler ile rekabet halindedir. Bu nedenle reaktörün işletme şartları çok iyi kontrol edilerek nitrit oksitleyen bakterilerin sistemde hakim olması engellenmelidir.

6.4.2.2.Kısmi Nitritasyon – Anaerobik Amonyum Oksidasyonu Sistemleri

Anammox bakterilerinin granül ve biyofilm oluşturma özelliğine dayanılarak birçok patentli sistem geliştirilmiştir (Tablo 6.13). Bu sistemlerin hepsinin ortak yönü anammox bakterilerinin reaktör içerisinde kalış sürelerinin arttırılmaya çalışılması ve buna yönelik farklı çözümler kullanmalarıdır. Anammox bakterilerinin biyokütle dönüşüm oranı ve çoğalma hızı çok düşük olduğundan, deamonifikasyon sistemlerinin devreye alınma süresi çok uzundur. Ancak uygun aşının bulunması halinde bu süre kısaltılabilir.

Tablo 6.13. Kısmi nitritasyon-anaerobik amonyum oksidasyonu proseslerinin tipik tasarım ve kontrol parametreleri [4]

Proses	***Temel tasarım parametresi***	***Amonyum azotu yükleme hızı (kg N/ m^3.gün)***	***Çamur yaşı (gün)***	***Proses kontrol parametresi***
ANITA^{TM}Mox	*Dolgu malzemesi yüzey alanı* *Amonyum azotu yükleme hızı*	*0,7-1,2**	*>20*	*Çözünmüş oksijen (0,5-1,5 mg/L)*
DeAmmon	*Dolgu malzemesi yüzey alanı* *Amonyum azotu yükleme hızı*	*0,6-0,8**	*>20*	*Çözünmüş oksijen* *Havalı-anoksik çevrim süreleri*
DEMON^{R} AKR	*Çamur yaşı* *Amonyum azotu yükleme hızı*	*0,7-1,2*	*40-50 (Anammox granülleri için)* *10-15 (floklar için)*	*pH kontrol aralığı (0,01-0,02 birim)* *Çözünmüş oksijen (0,3 mg/L)* *Çamur yaşı*
2 kademeli SHARON-ANAMMOX	*Çamur yaşı* *Amonyum azotu yükleme hızı* *Yukarı akış hızı*	*<0,7 (SHARON)* *3-10 (ANAMMOX)*	*1,5 (SHARON, havalı)* *>20 (ANAMMOX)*	*SHARON* *Çamur yaşı* *Sıcaklık* *ANAMMOX* *Yukarı akış hızı* *Çamur yaşı*

** Amonyum yükleme hızı, kullanılan dolgu malzemesinin özgül yüzey alanına göre değişebilir. Burada değerler, 500 m^2/m^3 özgül yüzey alanına sahip malzeme için verilmiştir.*

ANITA^{TM}Mox Prosesi

ANITA^{TM}Mox prosesi tek kademeli bir deamonifikasyon prosesidir (Şekil 6.15). Reaktör içerisinde mikroorganizmaların üzerine tutunduğu ve çok yüksek yüzey alanına sahip (500 m^2/m^3) plastik bir dolgu malzemesi bulunmaktadır. Bu tür reaktörler hareketli dolgu yataklı reaktörler olarak adlandırılır. Reaktör içerisindeki amonyum ve nitrit konsantrasyonları ölçülerek havalandırma kontrol edilir. Oksijen konsantrasyonu 0,5-1,5 mg/L aralığında değişir. Biyofilm kaplı plastik malzemenin reaktör içerisinde serbest hareket edebilmesi için reaktör hacminin %50'sinden fazla dolgu malzemesi kullanılmamalıdır.

Şekil 6.15. ANITA^{TM}Mox prosesi akım şeması

DeAmmon hareketli yataklı biyofilm reaktör prosesi

DeAmmon prosesi 3 kademeli bir reaktörden oluşur (Şekil 6.16). Her reaktör içerisindeki bölmeler seri bağı ya da paralel bağlı olarak işletilebilir. Reaktör içerisine toplam hacmin %50'sininden fazla olmamak kaydıyla, yüksek yüzey alanına sahip hareketli dolgu malzemesi (500 m^2/m^3) yerleştirilir. Her kademe havalı ve anoksik şartları sağlamak amacıyla kesikli olarak havalandırılır ve mekanik olarak karıştırılır. Havalı ve anoksik reaksiyon süreleri azot yüküne ve istenen giderme verimine göre ayarlanır. Tipik olarak 20-50 dakika havalı, 10-20 dakika anoksik reaksiyon süreleri kullanılır. Nitrit oksitleyen bakterilerin çoğalmasını ve oksijenin annomax bakterileri üzerindeki inhibisyon etkisini engellemek amacıyla, reaktör içi oksijen konsantrasyonlarının 3 mg/L'yi geçmemesi istenir.

Şekil 6.16. DeAmmon hareketli yataklı reaktör prosesi akım şeması

DEMON AKR

DEMON ardışık kesikli reaktöründe (Şekil 6.17) havalı ve anoksik şartlar pH ya da zaman kontrollü kesikli havalandırma ile sağlanır. Nitrit oksitleyen bakterileri baskılamak ve havalandırma sonrası anoksik şartlara hızlı geçiş yapılabilmesi için reaktör içi oksijen konsantrasyonunun 0,3 mg/L'nin aşmaması istenir. Havalı ve anoksik süreler tipik olarak 10-15 dakika ve 5-10 dakika arası tutulur. Havalandırma süreleri pH'a göre kontrol ediliyor ise 0,01-0,02 pH birimi değişimi ile havalandırma ekipmanı devreye girer ve çıkar. Reaktör içi pH, karbondioksitin sudan sıyrılmaması için 6,8'den yüksek tutulur. Reaksiyon adımında sürekli besleme yapılır. Anammox bakterileri granül oluşturduğundan, çamur hidrosiklondan geçirilerek granüler reaktöre geri döndürülür. Floküler çamur ve inert katılar ise sistemden atılır. Bu sayede, anammox granülleri için çamur yaşı 40-50 güne yaklaşır, diğer katılar (amonyum oksitleyen bakteriler, heterotrof bakteriler ve inert katılar) için ise çamur yaşı 10 gün civarıdır.

Şekil 6.17. DEMON AKR prosesi akım şeması

SHARON-ANAMMOX

Deamonifikasyon prosesi 2 kademeli reaktörlerde de gerçekleştirilebilir (Şekil 6.18). Burada ilk kademede kısmi nitritasyon, ikinci kademede ise anaerobik amonyum oksidasyonu gerçekleştirilir. Kısmi nitritasyon reaktörü SHARON konseptini temel alan ve 1,5 gün çamur yaşıyla işletilen tam karışımlı bir reaktördür. Reaktör 30°C üzeri sıcaklıklarda, dışardan alkalinite ve organik karbon eklemesi yapılmadan işletilir. Burada amonyumun azotunun yaklaşık %50'si nitrite dönüştürülür. Kısmi nitritasyon sonrası atıksu yukarı akışlı olarak tasarlanan ANAMMOX reaktörüne beslenir. Yüksek yukarı akış hızları ile işletilen bu reaktörde, anammox bakterileri çökelme hızı 100 m/sa'ten yüksek granüller oluşturur. Bu sayede, reaktörün içerisinde %5-7 katı madde oranına sahip bir çamur yatağı gelişir. Granül oluşturmayan mikroorganizmalar, düşük yoğunluklu floküler çamur ve inert maddeler yüksek yukarı akış hızı sayesinde sistemden atılır. Reaktörde daha yüksek kesme kuvvetleri oluşturabilmek için oluşan azot gazı toplanarak reaktöre geri devrettirilir. Ayrıca arıtılmış suyun bir kısmı da yukarı akış hızını arttırmak ve reaktöre beslenen akımı seyreltmek için reaktöre geri beslenir.

Şekil 6.18. SHARON-ANAMMOX prosesi akım şeması

6.5. Biyolojik Fosfor Giderimi

Kimyasal arıtmaya alternatif olarak birçok biyolojik fosfor giderim prosesi geliştirilmiştir. Fosforun biyolojik olarak giderilmesi, ortofosfat, polifosfat ve organik bağlı fosforun mikroorganizma hücre dokusuyla bağlanması esasına dayanır. Toplam giderilen fosfor miktarı sistemden uzaklaştırılan çamur miktarı ile bağlantılıdır. Mikroorganizma hücre yapısındaki fosfor içeriği, azot içeriğinin beşte biridir. Ancak çevre şartlarına bağlı olarak bu oran üçte bir ile yedide bir arasında değişebilmektedir. Biyolojik fosfor gideriminde ise mikroorganizma kuru ağırlığının %20-30'una kadar yüksek oranlarda fosfor içerebilmektedir.

Biyolojik fosfor giderimi aktif çamur sisteminde fosfor biriktiren mikroorganizmaların (FBO) hakim tür olarak seçilmesine bağlıdır. Bu işlem mikroorganizmaların sırasıyla havasız ve havalı şartlar altında bırakılmasıyla sağlanır. Değişen şartlar mikroorganizma üzerinde baskı yaratır ve ortamdan normalin üzerinde fosfor alırlar. Fosfor yalnızca hücre bakımı, sentezi ve enerji aktarımı amacıyla kullanılmaz, depolanarak sonraki safhada mikroorganizmaların kullanımı için de saklanır. Havasız ortamda, bu mikroorganizmalar atıksudaki uçucu yağ asidi gibi kolay ayrışan organik maddeleri hücrelerine alarak poli-hidroksi bütirat olarak depolarlar. Bu işlem sırasında enerji kullandıklarından ortama fosfor salarlar. Aerobik şartlarda ise hücre içine depoladıkları organik maddeyi enerji üretimi için kullanırlar. Bu işlem sırasında havasız ortamda saldıkları fosfordan daha fazlasını hücrelerine alarak depolarlar (Şekil 6.19).

Şekil 6.19. Biyolojik fosfor giderme mekanizması

Bu esasa dayanılarak geliştirilen fosfor gideren tipik biyolojik arıtma sistemleri aşağıda verilmektedir. Bu proseslerin tasarım kriterleri Tablo 6.14'te özetlenmiştir.

- A/O prosesi (Phoredox),
- Phostrip prosesi,
- Ardışık kesikli reaktörler (AKR)

Tablo 6.14. Biyolojik fosfor giderim proseslerinin tipik tasarım bilgileri [1]

Proses	*Çamur yaşı (gün)*	*UAKM konsantrasyonu (mg/L)*	*Hidrolik bekletme süresi (saat)*			*Çamur geri devir oranı (%)*	*İçsel geri devir oranı (%)*
			Havasız bölme	*Anoksik bölme*	*Havalı bölme*		
A/O	*2-5*	*3000-4000*	*0,5-1,5*	*-*	*1-3*	*25-100*	*-*
PhoStrip	*5-20*	*1000-3000*	*8-12*	*-*	*4-10*	*50-100*	*10-20*
AKR	*20-40*	*3000-4000*	*1,5-3*	*1-3*	*2-4*	*-*	*-*

6.5.1. A/O prosesi

A/O prosesi, atıksulardan karbon ve fosfor gideriminde kullanılır (Şekil 6.20). Askıda çoğalma esasına dayalı bir sistem olup havalı ve havasız bölümlerden oluşan bir reaktörde gerçekleştirilir. Sistemde nitrifikasyonun gerçekleşmesini önlemek ve fosfor giderme verimini artırmak için çamur yaşı 2-5 gün aralığında tutulur. Havasız bölmede hidrolik bekletme süresi 0,5-1 saat aralığındadır. Havalı bölümde uygun hidrolik ve çamur kalış süreleri oluştuğunda nitrifikasyonda gerçekleşebilir. Ancak sistemde nitrifikasyonun gerçekleşmesi (nitrat oluşumu) fosfor giderim verimini olumsuz etkileyebilir. Fosfor arıtma verimi, atıksu karakteristiklerine özellikle de BOİ/P oranına bağlıdır. Bu oran 10'u aştığında çıkış suyundaki fosfor konsantrasyonu 1 mg/L veya daha altına indirilebilir. BOİ/P oranının 10'dan daha küçük olması durumunda metal tuzları ile fosfor ilave giderimi yapılabilir.

Şekil 6.20. A/O prosesi akım şeması

Problem 6.2

Kirletici konsantrasyonları aşağıdaki tabloda verilen bir evsel atıksuyu arıtan A/O prosesinin çıkış fosfor konsantrasyonunu hesaplayınız.

Kirletici parametre	***Konsantrasyon (g/m³)***
KOİ	*300*
Biyolojik olarak ayrışabilir KOİ (bKOİ)	*200*
Biyolojik olarak ayrışabilir çözünmüş KOİ (bsKOİ)	*50*
Toplam fosfor	*6*

Verilenler

- *Heterotrofik mikroorganizmalar için substrat dönüşüm oranı, Y = 0,4 g UAKM/g KOİ*
- *Heterotrofik mikroorganizmalar için ölüm hızı, k_d = 0,08 g UAKM/g UAKM∗gün*
- *Çamur yaşı (θ_c)= 5 gün*
- *Fosfor biriktiren mikroorganizmaların fosfor içeriği = 0,3 g P /g UAKM*
- *Diğer heterotrofik bakterilerin fosfor içeriği = 0,02 g P /g VSS*
- *Son çökeltim havuzundan kaçan biyokütle konsantrasyonu = 8 g UAKM/m³*

Çözüm.

1. *Fosfor biriktiren mikroorganizmalar tarafından giderilen fosfor*

$$\text{Üretilen fosfor biriktiren mikroorganizma biyokütlesi} = \left[\frac{Y}{1 + k_d\,\theta_c}\right] bsKO\text{İ}$$

$$\text{Üretilen fosfor biriktiren mikroorganizma biyokütlesi} = \left[\frac{0{,}4}{1 + 0{,}08 * 5}\right] * 50 = 14{,}3\ g\ UAKM/m^3$$

$$\text{Giderilen fosfor} = (0{,}3\ g\ P/g\ UAKM) * (14{,}3\ g\ UAKM/m^3) = 4{,}3\ g/m^3$$

2. *Diğer heterotrofik mikroorganizmalar tarafından giderilen fosfor*

$$\text{Biyolojik olarak ayrışabilir partiküler } KO\text{İ} = 200 - 50 = 150\ g/m^3$$

$$\text{Üretilen heterotrofik mikroorganizma biyokütlesi} = \left[\frac{Y}{1 + k_d\,\theta_c}\right] bpKO\text{İ}$$

$$\text{Üretilen fosfor biriktiren mikroorganizma biyokütlesi} = \left[\frac{0{,}4}{1 + 0{,}08 * 5}\right] 150 = 42{,}9\ g\ UAKM/m^3$$

$$\text{Giderilen fosfor} = (0{,}02\ g\ P/g\ UAKM)(42{,}9\ g\ UAKM/m^3) = 0{,}86\ g/m^3$$

3. *Toplam giderilen fosfor konsantrasyonu ve çıkış çözünmüş fosfor konsantrasyonu*

$$\text{Toplam giderilen fosfor} = 4{,}3 + 0{,}86 = 5{,}16\ g/m^3$$

$$\text{Çıkış çözünmüş fosfor konsantrasyonu} = 6 - 5{,}16 = 0{,}84\ g/m^3$$

4. *Çıkış partiküler fosfor konsantrasyonu*

$$\text{Son çökeltimden kaçan biyokütlenin ortalama fosfor konsantrasyonu} = (0{,}3 \cdot 14{,}3 + 0{,}02 \cdot 42{,}9)/(14{,}3 + 42{,}9) = 0{,}09\ g\ P/g\ UAKM$$

Çıkış partiküler fosfor konsantrasyonu = 0,09 · 0,08 = 0,72 g/m³

Çıkış toplam fosfor konsantrasyonu = 0,86 + 0,072 = 1,56 g/m³

Fosfor giderme verimi = (6 – 1,56)·100/6 = %74

6.5.2. PhoStrip Prosesi

PhoStrip prosesi biyolojik ve kimyasal fosfor giderme proseslerinin birlikte uygulandığı bir prosestir. Havasız ve havalı bölmelerden oluşan reaktörde mikroorganizmaların fosfor depolaması sağlanır. Geri devir çamurunun bir kısmı havasız fosfor sıyırma tankına alınır (Şekil 6.21). Sıyırma tankında kalma zamanı 8-12 saat arasında değişir. Sıyırma tankı havasız koşullarda işletildiğinden mikroorganizma bünyesine aldığı fosforu salar. Fosfor çamur

fazından sıvı faza geçer, böylece çamurun fosfor konsantrasyonu düşmüş, atıksuyunki ise yükselmiştir. Bu çamur tekrar sisteme geri döndürülür. Fosfor bakımından zengin atıksu ise ayrı bir tanka alınır ve fosfor, kireç veya metal tuzları ile çöktürülür. Bu sistemde, fosfor kimyasal olarak ortamdan uzaklaştırılmış olur. Bu sistemler çıkış suyundaki fosforu 1 mg/L'nin altına kadar düşürebilir.

Şekil 6.21. PhoStrip prosesi akım şeması

6.5.3. Ardışık Kesikli Reaktör (AKR)

Bu reaktörler, hem karbon oksidasyonu, hem de azot ve fosfor giderimi için kullanılabilirler (Şekil 6.22). Gerekli arıtma reaktörün işletme şartlarını değiştirerek ve gerektiğinde kimyasal ilavesi ile sağlanabilir. Bu sistemde reaksiyon zamanı 3 ile 24 saat arasında değişebilir. Havalı ve havasız reaksiyon süreleri değiştirilerek nitrifikasyon ve denitrifikasyon reaksiyonları da aynı sistemde gerçekleştirilebilir.

Şekil 6.22. Karbon, azot ve fosfor gideriminde ardışık kesikli reaktör

6.6. Azot ve Fosforun Birlikte Biyolojik Olarak Giderimi

Azot ve fosforun birlikte arıtımı için birçok biyolojik proses geliştirilmiştir. Bunların çoğu özel sistemler olup, azot ve fosfor giderimi için havalı, havasız ve anoksik bölümlerin bileşiminden oluşmuş aktif çamur prosesi formundadır. Bu proseslerin bazıları temelde fosfor giderimi için geliştirilmiş olup, daha sonra azot ve fosforun birlikte arıtılabileceği sistemlere dönüştürülmüştür. Çok yaygın olarak kullanılan sistemler:

- A^2/O prosesi,
- Beş basamaklı Bardenpho prosesi,
- UCT prosesi,
- VIP prosesidir.

Bu 4 prosesin tipik tasarım kriterleri de Tablo 6.15'te verilmiştir. Bunların yanında ardışık kesikli reaktörler de, aynı şekilde birleşik azot ve fosfor gideriminde kullanılabilmektedir.

Tablo 6.15. Birleşik azot ve fosfor gideriminde kullanılan biyolojik proseslerin tipik tasarım bilgileri [1]

Parametre	*Çamur yaşı (gün)*	*UAKM konsantrasyonu (gün)*	*Hidrolik bekletme süresi (saat)*			*Çamur geri devir oranı (%)*	*İçsel geri devir oranı (%)*
			Havasız bölme	*Anoksik bölme*	*Havalı bölme*		
A^2/O	*5-25*	*3000-4000*	*0,5-1,5*	*0,5-1*	*4-8*	*25-100*	*100-400*
UCT	*10-25*	*3000-4000*	*1-2*	*2-4*	*4-12*	*80-100*	*200-400 (anoksik) 100-300 (havalı)*
VIP	*5-10*	*2000-4000*	*1-2*	*1-2*	*4-6*	*80-100*	*100-200 (anoksik) 100-300 (havalı)*
Beş basamaklı Bardenpho	*10-20*	*3000-4000*	*0,5-1,5*	*1-3 (1. kademe) 2-4 (2. kademe)*	*4-12 (1. Kademe) 0.5-1 (2. Kademe)*	*50-100*	*200-400*

6.6.1. A^2/O Prosesi

A^2/O prosesi, A/O prosesinin bir modifikasyonu olup, denitrifikasyon için anoksik bölüm de içermektedir (Şekil 6.23). Anoksik bölümde kalma zamanı yaklaşık olarak bir saattir. Anoksik bölümde çözünmüş oksijen düşüktür, ancak nitrit ve nitrat formundaki kimyasal bağlı oksijen havalı bölümden yapılan geri devirle sisteme verilmektedir. Çıkışta filtrasyon olmaksızın, 2 mg/L'den daha az fosfor konsantrasyonu elde edilebilmektedir. Ancak, çamur geri devrinin anaerobik bölmeye yapılması fosfor giderimini olumsuz etkilemektedir. Anaerobik bölmeye gelen nitrat konsantrasyonunun azaltılması amacıyla birçok farklı modifikasyon geliştirilmiştir.

Şekil 6.23. A^2/O prosesi akım şeması

6.6.2. Bardenpho Prosesi (Beş basamaklı)

Azot gideriminde kullanılan Bardenpho prosesinin, azot ve fosfor giderimi için geliştirilmiş şeklidir (Şekil 6.24). Fosfor giderimi amacıyla biyoreaktörün giriş kısmına bir havasız bölme ilave edilmiştir. Beş basamaklı sistemde havalı, havasız ve anoksik bölümler fosfor, azot ve karbon gideriminde rol oynarlar. Sıvı karışım birinci havalı bölümden anoksik bölüme geri beslenir. İkinci anoksik bölüm, havalı bölümde oluşan nitratı elektron alıcı, içsel organik karbonu ise elektron verici olarak kullanıp ilave denitrifikasyonu sağlar. Çıkışta 3-5 mg/L toplam azot konsantrasyonu elde edilebilir. Son havalı bölüm ise kalıntı azot gazını çözeltiden

sıyırmak ve atıksuya oksijen kazandırarak son çökeltim havuzunda fosfor salımını en aza indirmek için kullanılır. Uzun çamur yaşında çalıştırıldığından dolayı (10-20 gün) karbon oksidasyon kapasitesi de yüksektir. Bu sistemin fosfor giderme verimi UCT ve VIP proseslerine göre daha düşüktür.

Şekil 6.24. 5 basamaklı Bardenpho prosesi akım şeması

6.6.3. UCT Prosesi

Cape Town üniversitesi tarafından geliştirilen UCT prosesi, temelde A^2/O prosesine benzemektedir (Şekil 6.25). Burada amaç havasız bölmeye geri dönen nitrat konsantrasyonunun azaltılarak fosfor giderimi için optimum şartların sağlanmasıdır. Aktif çamur, havasız bölüm yerine, anoksik bölüme geri döndürülür ve nitrat geri devri ise havalı bölümden anoksik bölüme doğrudur. Aktif çamurun anoksik bölüme geri döndürülmesi ile nitrat havasız bölüme girmez, böylece havasız bölümde atıksudaki organik maddenin fosfor giderimi için daha fazla kullanımı ve fosforun daha iyi açığa çıkması sağlanır. Anoksik bölümdeki karışım, önemli miktarda çözünmüş BOİ ve az miktarda nitrat içerir. Anoksik karışım havasız bölüme geri devrettirilerek, havasız bölümde fermantasyon için optimum şartlar sağlanır. Ancak anoksik bölümden yapılan geri devir, son çökeltim havuzundan yapılan geri devre göre daha az mikroorganizma içerdiğinden havasız bölmedeki bekleme süresinin daha uzun olması (1-2 sa) gerekmektedir.

Şekil 6.25. UCT prosesi akım şeması

6.6.4. VIP Prosesi

VIP prosesi, geri döngüler hariç A^2/O ve UCT proseslerine benzer (Şekil 6.26). VIP prosesinde anoksik ve aerobik bölmeler seri bağlı en az iki tam karışımlı hücreden (reaktörden) oluşur. Aktif çamur geri devri, içsel geri devir ile birlikte anoksik bölüme verilir. Anoksik bölümün çamuru havasız bölüme geri beslenir. VIP prosesi yüksek hızlı bir aktif çamur prosesi olarak tasarlanır. Biyolojik fosfor giderim veriminin arttırılması için çamur yaşı düşük seçilir. Anaerobik ve anoksik bölmelerin toplam çamur yaşı ve hidrolik bekletme süresi sırasıyla 1,5-3 gün ve 60-90 dakika aralığındadır. Havalı bölme ise nitrifikasyon amacıyla tasarlanır.

Şekil 6.26. VIP prosesi

6.7. Proses Seçimi

Atıksuların içerdikleri besi maddeleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin bir ya da bir kaçının birlikte kullanımı ile giderilebilir. Bu sebeple bahsedilen proseslerden alıcı ortamların hassasiyetine göre, ülke şartları ve ekonomi de göz önünde tutularak uygun olanının seçilmesi gerekir. Doğru bir sistem tasarımı, besi maddesi ve karbon giderimi esaslarının bilinmesine ve bu süreçleri sağlayacak organizma gruplarının doğru yönetimine bağlıdır.

Yukarıda bahsedildiği gibi besi maddelerinden yalnızca birini veya her ikisini gidermeye yönelik birçok biyolojik proses geliştirilmiştir. Sonda denitrifikasyon yapan sistemlerin mahzuru, ilave karbon kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu proseslerin verimi biyolojik olarak kolay parçalanabilen organik maddelerin miktarına bağlıdır ve genellikle işletme giderleri fazladır. Ancak, ucuz karbon kaynaklarının mevcut olması durumunda bir alternatif olarak değerlendirilmelilerdir.

Nitrifikasyonun tam olarak gerçekleşebilmesi ve nitrifikasyon bakterilerinin gelişebilmesi için çamur büyük olmalı (>5 gün) ve karbonlu organik maddelerin oksidasyonu için gerekli çamur yaşına göre 1,5-2 kat daha fazla tutulmalıdır. Özellikle soğuk iklimlerde nitrifikasyon bakterilerinin çoğalma hızı yavaşladığından çamur yaşı genellikle 10-12 gün mertebesinden olmalıdır. Nitrifikasyon amacıyla biyofilm sistemlerin kullanılması durumunda reaktörlerin kademeli bir şekilde kullanımı karbon giderimi ve nitrifikasyon proseslerinin optimizasyonu için oldukça yararlıdır.

Biyolojik olarak giderilecek fosfor miktarını BOİ/TP oranı belirler. Kolay parçalanabilen karbon kaynakları biyolojik fosfor giderme prosesinin veriminde önemli rol oynarlar. Fosfor depolayan organizmaların polifosfat depolayabilmeleri, düşük molekül ağırlıklı organiklerin, özellikle uçucu yağ asitlerinin atıksuda bulunmasına bağlıdır. Biyolojik olarak giderilebilecek fosfor miktarı, havasız bölmede fosfor depolayan organizmaların çözünmüş fermantasyon ürünleri ile olan temasına bağlıdır. Fosfor depolayan bakteriler havasız ve havalı olarak değişen koşullara karşı hassastırlar.

BOİ/P oranı ve biyolojik olarak parçalanabilen organik madde içeriği, proses seçiminde en etkili faktördür (Tablo 6.16). Biyolojik fosfor giderme proseslerinde BOİ/P oranı <20 ise 1-2 mg/L çıkış fosfor konsantrasyonu elde etmek oldukça zordur. PhoStrip prosesi, teorik olarak giriş fosfor konsantrasyonuna daha az hassastır. Düşük organik madde içerikli atıksuların arıtılmasında tercih edilir. Biyolojik olarak parçalanabilen organik madde içeriği artarsa fosfor giderme verimi de artar. Azot giderimi gerekli değil ise fosfor A/O ya da PhoStrip prosesi ile giderilebilir. PhoStrip prosesi ile 1mg/L çıkış fosfor konsantrasyonu elde etmek mümkündür. Ancak, A/O prosesi ile bu değere ulaşmak zordur. Tablo 6.16'da atıksudaki BOİ/P ve KOİ/P oranlarına göre uygulanabilecek aktif çamur prosesleri verilmektedir.

Tablo 6.16. Farklı atıksu BOİ/P ve KOİ/P oranları için tavsiye edilen biyolojik nütrient giderimi prosesleri [1]

Biyolojik nütrient giderimi prosesleri	*BOİ/P oranı*	*KOİ/P oranı*	*Çamur yaşı (gün)*
A/ O, VIP	*15-20*	*26-34*	*<8*
A^2/O, UCT	*20-25*	*34-43*	*7-15*
Bardenpho	*>25*	*>43*	*15-25*

Atıksuda fosfor giderimi ve/veya denitrifikasyon için yeterli organik madde yok ise, birincil çamurun fermantasyonu ile üretilebilecek kolay ayrışan uçucu yağ asitleri sisteme beslenerek azot ve fosfor giderme verimi arttırılabilir. Ayrıca, biyolojik fosfor giderimi yapan tesislerin birçoğunda ilave fosfor giderimi için kimyasal (alum, demir klorür) dozlama sistemleri ve çıkış suyundaki partiküler maddeleri tutmak için filtrasyon sistemleri de bulunmaktadır.

Problem 6.3

Eşdeğer nüfusu 100.000 kişi olan, debisi Tablo a'da ve kirlilik yükleri ile konsantrasyonları Tablo b'de verilen evsel atıksuyun arıtımı için biyolojik azot fosfor gideren bir evsel atıksu arıtma tesisi tasarımı aşağıda verilmiştir.

Tablo a. *Tasarıma esas debiler*

Debiler	*m^3/gün*	*m^3/sa*	*L/ sn*
Q_{24}	*16380*	*683*	*190*
Q_{min}	*8720*	*363*	*101*
Q_{maks}	*35515*	*1480*	*411*

Tablo b. *Tasarıma esas kirlilik yükleri ve konsantrasyonları*

Yükler	*kg/gün*	*Konsantrasyon*	*mg/L*
$BOİ_5$	*5000*	*$BOİ_5$*	*305*
KOİ	*9000*	*KOİ*	*550*
AKM	*5500*	*AKM*	*336*
TN	*800*	*TN*	*49*
TP	*120*	*TP*	*7*

Bu örnekte Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'ne göre biyolojik azot-fosfor giderimi yapacak bir atıksu arıtma tesisi tasarımı için temel bazda proses hesapları yapılmışır. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'ne göre deşarj limitleri Tablo c'de verilmektedir.

Tablo c. *Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'ne göre deşarj limitleri*

Parametreler	*Konsantrasyon (mg/L)*	*Minimum arıtma verimi(%)*
$BOİ_5$	*25*	*70-90*
KOİ	*125*	*75*
TAKM	*35*	*90*
Toplam fosfor (TP)	*2 mg/L P* *(10000-100000 E.N.)* *1 mg/L P* *(100000 E. N. 'den fazla)*	*80*
Toplam azot (TN)	*15 mg/L N* *(10000-100000 E.N.)* *10 mg/L N* *(100000 EN'den fazla)*	*70-80*

Buna göre tasarımı yapılacak atıksu arıtma tesisi akım şeması Şekil a'da gösterilmektedir.

Şekil a. *Arıtma tesisi akım şeması*

<u>Izgara hesabı:</u>

<u>Bağlantı kanalı (kaba ızgara öncesi)</u>

Ø800 mm çaplı ana toplayıcı hattından alınan atıksu boru ile arıtma tesisine verilmektedir. Buna göre Manning Formülü'nden;

$$V_d = \frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

V_d : Dolu kesitte atıksu akış hızı, m/s
Q_d : Dolu kesitte atıksu debisi, m^3/s
J : Taban eğimi
N : Boru tipine bağlı katsayı

$Q_{maks} = 411\ L/sn$

$n = 0{,}013$

$J = 0{,}003$

$D = 0{,}8\ m$

$$V_d = \frac{1}{0{,}013}\left(\frac{0{,}8}{4}\right)^{2/3} 0{,}003^{1/2} = 1{,}44\ m/sn$$

$$Q_d = V_d A$$

$$Q_d = 1{,}44\left(\frac{\pi * 0{,}8^2}{4}\right) = 0{,}72\ m^3/sn$$

$$\frac{Q}{Q_d} = \frac{0{,}411}{0{,}72} = 0{,}57$$

Hesaplanan Q/Q_d değeri kullanılarak dairesel kesitli borularda doluluk oranına göre debi ve hız değerini veren abaka göre;

$$\frac{h}{D} = 0{,}543 \qquad \frac{V}{V_d} = 1{,}03$$

bulunmuştur.

$h = 0{,}543 * 0{,}8 = 0{,}434\ m$

$V = 1{,}44 * 1{,}03 = 1{,}48$ m/sn

Kaba ızgara:

B = 1 m genişlikli kaba ızgara yaklaşım kanalında Q_{max} = 411 L/s debisinde su derinliğinin H_{max} = 0,434 m'yi geçmemesi için, kaba ızgara taban eğiminin Manning formülü yardımıyla,

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{(B\,H)^{5/3}}{(B+2H)^{2/3}}\right)J^{1/2}$$

$$0{,}411 = \left(\frac{1}{0{,}013}\right)\left(\frac{(1{,}0 * 0{,}434)^{5/3}}{(1{,}0 + 2 * 0{,}434)^{2/3}}\right)J^{1/2}$$

$$J = 0{,}001$$

$$V_{maks} = \frac{Q}{B\,H} = \frac{0{,}411}{1 * 0{,}434} = 0{,}95\ m/sn$$

Aynı şekilde $Q_{min} = 101\ L/sn$ *için,*

$$H_{min} = 0{,}16\ m$$

$$V_{min} = 0{,}62\ m/sn$$

bulunmuştur.

Enkesiti 10∗50 mm, çubuklar arası mesafe 0,05 m olarak seçilen ızgara çubuklarının sayısı,

$$B = (n + 1)e + n\,t$$

t : Izgara çubuk kalınlığı, m
e : Izgara çubukları arası mesafe, m
n : Izgara çubuk sayısı

$$1 = (n + 1) * 0{,}05 + n * 0{,}01$$

$n = 16$ *adet ızgara çubuğu*

Bu durumda maksimum debide ve 0,434 m derinlik için ızgara çubukları arasında geçiş hızı:

$$V_{maks} = \frac{Q_{maks}}{(B - n\,t)\,H}$$

$$V_{maks} = \frac{0{,}411}{(1 - 16 * 0{,}01) * 0{,}434} = 1{,}13\ m/sn < 1{,}2\,m/sn\ \text{olduğundan uygundur.}$$

İnce ızgara:

Yaklaşım kanalı (ince ızgara öncesi)

B = 0,6 m, J = 0,003, n = 0,013 seçilmiştir. Buna göre maksimum debi için Manning Formülü yardımıyla,

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{(B\,H)^{5/3}}{(B+2H)^{2/3}}\right)J^{1/2}$$

$$0{,}411 = \left(\frac{1}{0{,}013}\right) * \left[\frac{(0{,}6 * H)^{5/3}}{(0{,}6 + 2H)^{2/3}}\right] * 0{,}003^{1/2}$$

$$H = 0{,}5\,m$$

$$V_{maks} = 1{,}38\,m/sn$$

bulunmuştur.

Maksimum debide ızgara çubukları arası maksimum geçiş hızı 1,2 m/s alınırsa çubuklar arasındaki toplam ıslak kesit alanı,

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0{,}411}{1{,}2} = 0{,}34\,m^2$$

Izgaradan önceki yaklaşım kanalındaki su derinliği 0,49 m olduğuna göre çubuklar arasındaki net açıklık (b),

$b = \frac{A}{H} = \frac{0,34}{0,5} = 0,69\ m$

Bu durumda çubuk aralığı $e = 0,02\ m$, *çubuk kalınlığı* $t = 0,01\ m$ *seçilirse,*

$0,69 = (n + 1) * 0,02$

$n = 34$ *adet ızgara çubuğu*

Izgara kanalının toplam genişliği $(B) = 0,69 + 34 * 0,01 = 1,02\ m$

<u>Kum tutucu:</u>

Dikdörtgen kesitli, havalandırmalı, iki gözlü (biri yedek) bir kum tutucu tasarımı yapılacaktır.

$Qmax = 0,411\ m^3/sn$

$Qort = 0,190\ m^3/sn$

$Bir\ gözden\ geçen\ debi = 0,411\ m^3/sn$

5 dakikalık bekletme süresinde (2-5 dak arası alınır)

$V = (0,411\ m^3/sn).(5\ dk).(60sn/dk) \approx 123\ m^3\ (bir\ göz\ için)$

$Ortalama\ su\ derinliği = 3,6\ m, (2 - 5\ m\ arası\ alınır)$

$Hava\ payı = 0,8\ m$

$Toplam\ derinlik = 3,6\ m + 0,8\ m = 4,4\ m$

$V = A\ h$

$Yüzey\ alanı\ (A) = 123\ m^3/3,6\ m = 34\ m^2$

$Uzunluk = 34\ m^2/3,5\ m = 9,7\ m \approx 10\ m, (7,5 - 20\ m\ alınır)$

Kum tutucu genişliği 3,5 m seçilmiştir.

$Tasarım\ yüzey\ alanı = 3,5\ m * 10\ m = 35\ m^2$

Difüzörler, kum tutucu boyunca bir tarafta olmak üzere, tabandan 0,6 m yukarı konur.

<u>Hava Tertibatı ve Yüzey Yükü Hesabı</u>

Gerçek bekletme süresi $= V/Q$

$(3,5\ m * 10\ m * 3,6\ m)/(0,411\ m^3/sn * 60\ sn/dk) = 5,11\ dk$

$Bir\ göz\ için\ teorik\ hava\ ihtiyacı = (7,8\ L/sn\ m) * (10\ m) = 78\ L/sn$

Birim hava ihtiyacı m uzunluk başına (3,3 – 8,3 L/s.m) arası seçilir.

Bulunan değer emniyet katsayısı ile çarpılırsa,

$Bir\ göz\ için\ emniyetli\ hava\ ihtiyacı = (78\ L/sn) * (1,5) = 117\ L/sn$

$Yüzeysel\ hidrolik\ yük = ((0,411\ m^3/sn) * (86400\ sn/gün))/(3,5\ m * 10\ m) = 1037$
$< 1700\ m^3/m^2.gün\ olduğundan\ uygundur.$

<u>Ön çökeltme havuzu:</u>

Ön çökeltme havuzu daire planlı tasarlanacaktır.

Tasarım için yüzey yükü $S_0 = 1,5\ m^3/m^2 * sa$ *seçilmiştir (*$1,5 - 2\ m/sa$ *seçilebilir).*

$A = \frac{Q_{ort}}{1,5} = \frac{0,190}{1,5} * \frac{86400}{24} = 455\ m^2$

$A = \frac{\pi\ D^2}{4} = 455$ $\qquad$ $Havuz\ çapı = D \approx 24\ m$

$$Tasarım\ yüzey\ alanı\ = \frac{\pi * 24^2}{4} = 452\ m^2$$

Kenar su derinliği 3 m seçilirse,

$$Hacim\ =\ 452 * 3\ =\ 1355\ m^3$$

$$Bekletme\ süresi = \frac{V}{Q} = \frac{1355}{0{,}190 * 86400} = 0{,}083\ gün \approx 2\ sa\ (1\text{–}\ 2\ sa\ arasında\ olduğundan\ uygundur.)$$

<u>Biyolojik proses (karbon, azot, fosfor giderimi) hesabı:</u>

Biyolojik proses hesabında azot-fosfor giderimi gerçekleştirecek bir A^2O prosesinin tasarımı yapılacaktır. Ön çökeltme havuzunda TAKM ve $BOİ_5$ giderme verimleri Şekil b'den yararlanarak aşağıdaki gibi kabul edilmiştir:

$BOİ_5$: %30
KOİ : %30
AKM : %60
TKN : %10
TP : %10

Şekil b. *Ön çökeltme havuzlarında bekletme süresine ve hacimsel yükleme hızına göre AKM ve $BOİ_5$ giderim verimleri*

Ön çökeltme sonrası kirlilik yükleri ve konsantrasyonları Tablo d'de verilmiştir.

Tablo d. *Ön çökeltme sonrası kirlilik yükleri ve konsantrasyonları*

Yükler	*kg/gün*	*Konsantrasyon*	*mg/L*
$BOİ_5$	*3500*	*$BOİ_5$*	*214*
KOİ	*6300*	*KOİ*	*385*
AKM	*2200*	*AKM*	*134*
TN	*720*	*TN*	*44*
TP	*108*	*TP*	*7*

Atıksudaki KOİ bileşenleri yapılan analizler sonucu Tablo e'deki gibi bulunmuştur. Farklı bölgelerdeki evsel atıksular için ve/veya kanalizasyona endüstriyel atıksu girişinin yoğun olduğu bölgeler için mutlaka atıksuya özgü KOİ bileşenlerinin analiz edilerek belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo e. *Atıksu KOİ ve Azot B ileşenleri*

Parametre	Toplam KOİ içerisindeki yüzdesi (%)	Konsantrasyonlar (mg/L)
S_I	5	19
X_I	10	38
S_S	10	38
X_S	75	288
C_S	85	327
KOİ/ TN	-	8,7
KOİ/ TP	-	58

S_I : Çözünmüş inert KOİ konsantrasyonu, mg/L
X_I : Partiküler inert KOİ konsantrasyonu, mg/L
S_S : Kolay ayrışabilir KOİ konsantrasyonu, mg/L
X_S : Partiküler KOİ konsantrasyonu, mg/L
C_S : Biyolojik olarak ayrışabilir KOİ konsantrasyonu, mg/L

Nitrifikasyon ve denitrifikasyon yapan aktif çamur sistemlerinde çamur yaşı, nitrifikasyon yapan mikroorganizmaların özgül çoğalma hızına göre belirlenir. Nitrifikasyon ve denitrifikasyon yapan mikroorganizmaların 20°C ve bu tasarım örneğindeki işletme sıcaklığı olan 15°C için kinetik sabitleri sırasıyla Tablo f'te verilmektedir. 20°C'deki standart değerlerin tasarıma esas işletme sıcaklığına göre düzeltilmesi gerekmektedir. Mikroorganizmalar için kinetik hız sabitleri θ düzeltme katsayısı kullanılarak ve Arrhenius denkleminden yararlanılarak hesaplanmıştır. Havalandırma havuzunda ortalama oksijen konsantrasyonu 2 mg/L kabul edilmiştir.

Tablo f. *Nitrifikasyon-Denitrifikasyon yapan mikroorganizmalar için kinetik sabitler*

Parametre	Birim	Değer (20°C)	Değer (15°C)	θ
Heterotrof bakteriler için maksimum spesifik çoğalma hızı, μ_m	g UAKM/g UAKM.gün	6	4,28	1,07
Ototrof bakteriler için maksimum spesifik çoğalma hızı, μ_{mn}	g UAKM/g UAKM.gün	0,75	0,53	1,07
Heterotrof bakteriler için substrat dönüşüm oranı, Y_H	g UAKM/g bKOİ	0,4	0,4	-
Ototrof bakteriler için substrat dönüşüm oranı, Y_A	g UAKM/g NH_4-N	0,12	0,12	-
Heterotrof bakteriler için mikroorganizma ölüm hızı, k_d	g UAKM/g UAKM.gün	0,12	0,1	1,04
Ototrof bakteriler için mikroorganizma ölüm hızı, k_{dn}	g UAKM/g UAKM.gün	0,08	0,07	1,04
Heterotrof bakteriler için substrat yarı doygunluk sabiti, K_s	g bKOİ/ m^3	20	20	1,00
Ototrof bakteriler için amonyak yarı doygunluk sabiti, K_N	g NH_4-N/ m^3	0,74	0,57	1,053
Ototrof bakteriler için oksijen yarı doygunluk sabiti, K_o	g/m^3	0,5	0,5	-

bKOİ : Biyolojik olarak ayrışabilir KOİ

$k(T) = k_{maks}\,\theta^{T-20}$: Arrhenius sıcaklık düzeltmesi denklemi

Biyolojik azot-fosfor giderimi yapan aktif çamur sistemlerinde çamur yaşı nitrifikasyon yapan ototrofik mikroorganizmalara göre seçilir. Bu mikroorganizmaların maksimum çoğalma hızı heterotrofik biyokütleye göre çok düşüktür. Bu mikroorganizmaların sistemden yıkanmaması için çamur yaşı nitrifikasyon yapan biyokütleye göre seçilir.

<u>Çamur yaşı hesabı:</u>

$$\frac{1}{\theta_{XA}} = \mu_{mn} * \frac{N}{K_n + N} * \frac{DO}{K_O + DO} - k_{dn}$$

$$\frac{1}{\theta_{XA}} = 0{,}53 * \frac{0{,}5}{0{,}57 + 0{,}5} * \frac{2{,}0}{0{,}5 + 2{,}0} - 0{,}07 = 0{,}128$$

$\theta_{XA,min} = 7{,}8$ gün (Minimum aerobik çamur yaşı)

$Pik\ faktörü\ (TKN_{pik}/TKN_{ort})\ =\ 1{,}2$

Hesaplanan aerobik çamur yaşına göre çıkışta NH_4-N konsantrasyonun $(NH_4\text{-}N)_e$ = 0,5 mg/L'nin altında kaldığı kontrol edilir.

$\theta_{XA} = PF * \theta_{XA,min} = 1{,}2 * 7{,}8 \approx 9\ gün\ (Aerobik\ çamur\ yaşı)$

$$S_{NH} = \frac{K_n * (1 + k_{dn} * \theta_{XA})}{\mu_{mn} * \theta_{XA} - (1 + k_{dn} * \theta_{XA})} = \frac{0{,}57 * (1 + 0{,}07 * 9)}{0{,}53 * 9 - (1 + 0{,}07 * 9)} = 0{,}3\ mg\ NH_4 - N/L$$

0,3<0,5 mg NH_4-N /L olduğundan θ_{XA} değeri uygundur.

$\frac{V_D}{V} = 0{,}4\ (0{,}1 -\ 0{,}5\ arası\ seçilebilir)$

V_D *: Denitrifikasyon bölmesinin hacmi, m^3*

V *: Nitrifikasyon ve denitrifikasyon bölmelerinin toplam hacmi, m^3*

$$\theta_X = \frac{\theta_{XA}}{1 - \frac{V_D}{V}} = \frac{9}{1 - 0{,}4} \approx 15\ gün\ (Ç\ amur\ yaşı)$$

Buna göre çıkışta biyolojik olarak ayrışabilen çözünmüş KOİ konsantrasyonu:

$$S = \frac{K_s(1 + k_d * \theta_X)}{\mu_m * \theta_X - (1 + k_d * \theta_X)} = \frac{20(1 + 0{,}1 * 15)}{4{,}28 * 15 - (1 + 0{,}1 * 15)} \approx 0{,}8\ mg\ KOİ/L$$

Arıtma tesisinin çıkışında S_I ile birlikte 0,8 mg/L biyolojik olarak ayrışabilen KOİ bulunmaktadır (Genelde ihmal edilir).

Bu aşamada azot kütle dengesi kurulur. Bu amaçla ilk olarak arıtma tesisine gelen TKN konsantrasyonunun belirli bir kısmının nitrifikasyon prosesiyle nitrat azotuna dönüştüğü kabul edilir.

$NO_x = 0{,}8 * 44 = 35{,}2\ mg\ N/L\ (Nitrata\ dönüşen\ amonyak\ azotu\ miktarı)$

<u>Günlük oluşan biyolojik çamur miktarı (P_{XBio}):</u>

$$P_{XBio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d * \theta_X} + \frac{f_d k_d YQ(S_0 - S)\theta_X}{1 + k_d * \theta_X} + \frac{QY_A(NO_x)}{1 + k_{dn} * \theta_X}$$

$$P_{XBio} = \frac{16380 * 0{,}4 * (327 - 0{,}8)}{1 + 0{,}1 * 15} + \frac{0{,}15 * 0{,}1 * 0{,}4 * 16380\ (327 - 0{,}8)\ 15}{1 + 0{,}1 * 15} + \frac{16380 * 0{,}12\ (35{,}2)}{1 + 0{,}07 * 15} * 10^{-3}$$

$P_{XBio} = 1090\ kg\ UAKM/gün$

f_d *: Ölen biyokütlenin inert partiküler KOİ'ye dönüşüm oranı (0,15 alınmıştır.)*

$P_{XBio} = 1090\ kg\ UAKM/gün = 1090/0{,}8 = 1362\ kg\ /AKM/gün$

Biyokütle için $UAKM/AKM\ =\ 0{,}8$ seçilmiştir.

<u>Oksitlenmesi gereken amonyak azotu miktarı:</u>

$$NO_x = TKN - (NH_4 - N)_e - 0{,}12\frac{P_{XBio}}{Q}10^{-3} = 44 - 0{,}5 - 0{,}12\frac{1090}{16380}10^{-3} \approx 35{,}5\ mg\ N/L$$

Başlangıçta kabul edilen amonyak dönüşüm oranı (%80) uygundur.

<u>V_D/V = 0,4 için denitrifikasyon potansiyelinin (N_{DP}) belirlenmesi:</u>

$$Y_N = \frac{Y}{1 + k_d * \theta_X} = \frac{0{,}4\frac{g\ UAKM}{g\ KOİ} * 1{,}42\frac{KOİ}{UAKM}}{1 + 0{,}1 * 15} = 0{,}23\frac{g\ hücre\ KOİ}{g\ KOİ}$$

Y_N *: Biyokütle net dönüşüm oranı, g KOİ/g KOİ*

$$N_{DP} = \eta_g\frac{V_D}{V}\frac{(1 - Y_N)C_s}{2{,}86} = 0{,}8 * 0{,}4 * \frac{(1 - 0{,}23)327}{2{,}86} \approx 28{,}2\ mg\ N/L$$

η_g *: Anoksik şartlarda heterotrofik mikroorganizmaların hızı için yavaşlama katsayısı*

Çıkış nitrat azotu konsantrasyonu (S_{NO}):

$S_{NO} = NO_X - N_{DP} = 35{,}5 - 28{,}2 = 7{,}3\ mg\ NO_3 - N/L$

Çıkış toplam azot konsantrasyonu (TN_e):

$TN_e = NH_4 + NO_3 = 0{,}5 + 7{,}3 = 7{,}8 < 10\ mg\ N/L$

Arıtma tesisi çıkışındaki toplam azot konsantrasyonu Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği'ne göre nüfusu ≥100000 olan yerleşim bölgeleri için verilen toplam azot deşarj standartı (10 mg/L)'den küçük olduğundan seçilen anoksik bölme hacmi oranı uygundur.

Günlük oluşan çamur miktarı (P_{XT}):

$Giriş\ AKM\ konsantrasyonu\ =\ 134\ mg/L$

$Atıksu\ için\ UAKM/AKM\ =\ 0{,}76\ kabul\ edilmiştir, (0{,}7 - 0{,}8)$

$Giriş\ UAKM\ konsantrasyonu\ =\ 134 * 0{,}76\ =\ 102\ mg/L$

$bp\ KO\dot{I}/p\ KO\dot{I}\ =\ 288/326\ =\ 0{,}88$

$bp\ KO\dot{I}$ *: Biyolojik olarak ayrışabilen partiküler KOİ, X_S*

$p\ KO\dot{I}$ *: Toplam partiküler KOİ, $X_S + X_I$*

$\dot{I}nert\ UAKM\ =\ (1 - 0{,}88) * 102\ =\ 12\ mg/L$

$P_{XI}\ =\ 12 * 16380/(0{,}76 * 103)\ =\ 259\ kg\ AKM/gün$

P_{XI} *: Günlük oluşan inert çamur miktarı, kg/gün*

$$P_{Xf} = (AKM - UAKM)Q = (134 - 102)16380 * \frac{1}{1000} = 528\ kg/gün$$

P_{Xf} *: Atıksudaki sabit katı maddelerden oluşan çamur, kg/gün*

$P_{XT} = P_{XBio} + P_{XI} + P_{Xf} = 1362 + 259 + 528 = 2149\ kg/gün$

Reaktör içerisinde,

$$\frac{UAKM}{AKM} = \frac{1090 + (259 * 0{,}76)}{2149} = 0{,}60$$

Toplam Reaktör Hacmi (Anoksik + Aerobik) (V_T):

Reaktör içi AKM konsantrasyonu (X_T) = 4000 mg/L seçilmiştir.

$$P_{XT} = \frac{V_T X_T}{\theta_X} \qquad 2149 = \frac{V_T * 4}{15} \qquad V_T \approx 8030\ m^3$$

Havuz derinliği = 5 m seçilmiştir. 2 paralel havuz seçilirse;

$1\ havuzun\ alanı\ =\ 8030/(5 * 2)\ =\ 803\ m^2$

$En/Boy\ \approx\ 1/4\ olan\ dikdörtgen\ planlı\ havuz\ seçilirse;$

$En\ =\ 14\ m$

$Boy\ =\ 58\ m$

$Tasarım\ V_T\ =\ (14 * 58 * 5) * 2\ =\ 8120\ m^3$

Oksijen İhtiyacı (Oİ):

$O\dot{I} = Q(S_0 - S) - 1{,}42\ P_{XBio} + 4{,}33\ Q\ NO_X - 2{,}86\ Q\ N_{DP}$

$$O\dot{I} = \frac{16380(327 - 0{,}8)}{1000} - 1{,}42 * 1090 + \frac{4{,}33 * 16380 * 35{,}5}{1000} - \frac{2{,}86 * 16380 * 28{,}2}{1000}$$

$O\dot{I} = 4990\ kg\ O_2/gün = 208\ kg\ O_2/saat$

Havalandırmanın tankın tabanına yerleştirilen difüzörler ile sağlandığı kabul edilmiştir.

$$SO\dot{I} = O\dot{I}\left[\frac{C_{20}}{\alpha\ F\ (\beta\ C_T - C_L)}\right] 1{,}024^{(20-T)}$$

SOİ : Standart şartlarda (20°C, 1 atm basınç, 0 oksijen konsantrasyonu) oksijen ihtiyacı
C_{20} : 20°C' de oksijen doygunluk konsantrasyonu, (9,08 mg/L)
C_T : İşletme sıcaklığında oksijen doygunluk konsantrasyonu, (T_{15} = 10,07 mg/L)
C_L : Reaktör içinde minimum oksijen konsantrasyonu
α : Atıksu için oksijen transfer verimi düzeltme katsayısı, (0,3 – 1,2); 0,5 seçilmiştir.
β : Atıksu için oksijen doygunluk konsantrasyonu düzeltme katsayısı (0,7 – 0,98); 0,95 seçilmiştir.
F : Tıkanma katsayısı, (0,9)

$$SO\dot{I} = 208\left[\frac{9{,}08}{0{,}5 * 0{,}9\ (0{,}95 * 10{,}07 - 2)}\right] 1{,}024^{(20-15)}$$

$SO\dot{I} \approx 624\ kg\ O_2/saat$

$$Gerekli\ hava\ debisi = \frac{624\ kg/sa}{0{,}3 * 60\ dk/sa * 0{,}2318\ kg\ O_2/m^3\ hava} = 150\ m^3/dk$$

1 m^3 havadaki oksijen kütlesi = 0,2318 kg O_2/m^3 hava.

Difüzörler için oksijen transfer verimi % 30 kabul edilmiştir.

<u>Geri devir oranı (R):</u>

$R = IR + RAS$

IR : İçsel geri devir oranı

RAS : Aktif çamur geri devir oranı

$$R = \frac{NO_X}{S_{NO}} - 1 = \frac{35{,}5\ mg/L}{7{,}3\ mg/L} - 1 = 3{,}9$$

<u>Biyolojik fosfor giderimi:</u>

Biyolojik fosfor giderimi için planlanan anaerobik reaktörün hidrolik bekletme süresi (θ_h) 1,5 saat seçilirse;

(0,5-2 saat) arasında seçilir.

$$\theta_h = \frac{V}{Q} \rightarrow V = 1{,}5 * \frac{16380}{24} \approx 1025\ m^3$$

<u>Çamur yaşının biyolojik fosfor giderimini de içerecek şekilde hesaplanması:</u>

$V_T = 1025 + 8120 = 9145\ m^3$

Reaktörde tutulan toplam çamur miktarı $= VT * XT = 9145 * 4 = 36580\ kg$

Toplam çamur yaşı:

$$\theta_X = \frac{X_T}{P_{XT}} = \frac{36580}{2149} \approx 17 gün$$

<u>Hidrolik bekletme süresinin hesaplanması:</u>

$\theta_{H,anaerobik} = 1{,}5\ sa$

$$\theta_{H,anoksik} = \frac{V_{anoksik}}{Q} = \frac{0{,}4 * 8120 * 24}{16380} = 4{,}8\ sa$$

$$\theta_{H,aerobik} = \frac{V_{aerobik}}{Q} = \frac{0{,}6*8120*24}{16380} = 7{,}1\ sa$$

$\theta_{H,toplam} = 1{,}5 + 4{,}8 + 7{,}1 = 13{,}4\ sa$

Son çökeltme havuzu:

Son çökeltme havuzu daire planlı tasarlanacaktır.

$RAS = X_T/(X_R - X_T)$

RAS : Aktif çamur geri devir oranı

$Geri\ devir\ çamurunda\ AKM\ konsantrasyonu\ (X_R) = 8000\ mg/L\ seçilmiştir\ (4000 - 12000\ mg/L).$

$$RAS = \frac{4000}{8000 - 4000} = 1$$

$IR = 3{,}9 - 1 = 2{,}9$

Son çökeltme havuzlarının boyutlandırılmasında dikkat edilmesi gereken hususlar, hidrolik yüzey yükü, katı madde yükleme hızı, hidrolik bekletme süresi ve derinliktir. Bu havuzlarda;

- *Hidrolik yüzey yükü: 16 – 24 m^3/m^2.gün*
- *Katı madde yükleme hızı: 4 – 6 kg/m^2.saat*
- *Hidrolik bekletme süresi: 1 – 4 saat*
- *Derinlik: 3,5 – 6 m*

Hidrolik yükleme hızı 18 m^3/m^2.gün seçilirse, çökeltme havuzu toplam alanı (A_T):

$$A_T = \frac{Q}{Hidrolik\ yükleme\ hızı} = \frac{16380}{18} = 910\ m^2$$

2 havuz tasarlanırsa;

$1\ havuz\ alanı = 910/2 = 455\ m^2$

$$A = \frac{\pi\ D^2}{4} \rightarrow D \approx 25\ m$$

Düzeltilmiş alan = 490 m^2

$$Katı\ madde\ yükü = \frac{(Q + Q_{RAS})\ X_T}{A}$$

$$Katı\ madde\ yükü = \frac{(1+1)\ 16380 * 4}{980 * 24} = 5{,}6\ \ kg\ AKM/m^2\ sa$$

Atılan çamur debisi:

$Atılan\ çamur\ miktarı = 2149\ kg\ AKM/gün$

$Çamur\ yoğunluğu\ (\rho) = 1{,}005$

$Çamurun\ \%\ katı\ madde\ içeriği\ (KM) = 1\ kabul\ edilmiştir.$

$$Q_{çamur} = \frac{2149}{1000 * 1{,}005 * 0{,}01} = 214\ \ m^3/gün$$

KAYNAKLAR

[1] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[2] Henze, M., Harremoes, p., Jansen, J. C., Arvin, E. (1997). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Prosesses 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[3] Çevre ve Orman Bakanlığı (2010). Atıksuların Arıtımı Teknik Usüller Tebliği

[4] Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill.

[5] Orhon D., Artan N. (1994). Modelling of Activated Sludge Systems, Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, PA, USA.

7. İLERİ ATIKSU ARITIMI

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk, Prof. Dr. İsmail Koyuncu ve Çev. Müh. Malhun Fakıoğlu*

Klasik arıtma sistemleri çıkış suyunda kalan AKM, çözünmüş madde, kararlı organik maddeler vb. gibi kirleticilerin arıtımı ilave arıtma sistemlerini gerektirmekte olup bu sistemler ileri arıtma sistemler olarak ifade edilmektedir.

İleri arıtma gerektiren başlıca kirleticiler organik maddeler, askıda katı maddeler, inorganik maddeler (Ca, K, SO_4, fosfat, nitrat vb.) veya kompleks sentetik organik bileşiklerdir. Söz konusu bileşiklerin çoğunun çevre (özellikle sucul ekosistem) üzerine etkileri bilinmektedir. Son yıllarda tehlikeli maddeler ve öncelikli kirleticilerin çevreye etkileri ile klasik ve ileri sistemlerindeki arıtım mekanizmaları yoğun şekilde araştırılmaktadır.

Bazı bileşiklerin çevreye deşarjının ne ölçüde önemli çevresel sorunlara yol açabildiği Tablo 7.1'de verilmektedir. Arıtılmış atıksudaki kalıntı bileşiklerin çevredeki potansiyel etkisi deşarj ortamına göre önemli farklılıklar gösterir. Her ne kadar askıda katı madde ve biyolojik olarak parçalanabilen organiklerin arıtımı için klasik ikinci kademe arıtma sistemleri yeterli olsa da deşarjın göl, nehir, dere veya hassas kıyı ve geçiş sularına yapılması durumunda daha fazla arıtım gerekmekte, bu da ileri arıtma sistemlerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Örneğin, atıksudaki azot (N) ve fosfor (P)'un alıcı ortamlarda ötrifikasyonu hızlandırdığı ve sucul ekosistemin doğal dengesini bozduğu görülmüştür. Bu nedenle atıksu arıtma tesislerinde C, N ve P'un birlikte giderimi (BNR sistemi) önem kazanmış, N ve P için de deşarj limitleri getirilmiştir.

7.1. İleri Atıksu Arıtım İhtiyacı

Atıksuda bulunan bileşiklerin bilimsel olarak tespiti, bilişim imkanlarının artması ve daha etkin çevresel izleme çalışmaları, arıtılmış atıksu deşarj limitlerinin daha sıkı ve sınırlayıcı olmasına yol açmıştır. Çoğu yerde deşarj limitleri klasik ikinci kademe arıtım sistemlerinde arıtılamayan organik maddenin, (askıda katının, besi maddelerinin (N ve P) ve öncelikli kirleticiler) arıtımını gerektirebilir. Dünya'da içme ve kullanma suyunun sınırlı olduğu yerlerde arıtılmış atıksuyun tekrar kullanımı potansiyelinin giderek önem kazanması da daha ileri düzeyde atıksu arıtımına olan ihtiyacı giderek arttırmaktadır.

7.1.1. Arıtılmış Atıksudaki Kalıntı (Bakiye) Maddeler

Evsel atıksuyun tipik özelliği bilinmekle birlikte, rutin olarak ölçülmeyen ancak geniş bir değişim aralığı bulunan bazı eser elementler ve bileşikleri de mevcuttur. Atıksuda bulunan bu bileşiklerin çevreye deşarjı durumunda Tablo 7.1'de özetlenen bazı problemlerle karşılaşılabilir.

7.1.2. Kalıntı Maddelerin Etkileri

Arıtılmış atıksudaki bakiye (kalıntı) maddelerin potansiyel etkileri değişiktir. Bazı maddelerin etkileri ve kritik konsantrasyonları Tablo 7.1'de verilmektedir. Askıda katı ve biyolojik olarak parçalanabilen organikler için genelde ikinci kademe biyolojik arıtma yeterli olsa da, özel durumlarda (küçük göl ve akarsular veya hassas su ortamlarına deşarj) özellikle makro besi elementleri (N , P) ve bazı öncelikli kirleticiler için ek arıtma gerekebilir.

Atıksudaki azot ve fosforun deşarjı, göllerde ötrifikasyonu hızlandırılması ve sucul büyümeyi arttırması dolayısıyla kritik olmaya başlamıştır. Atıksudaki azotun nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleriyle giderimi, alıcı su ortamında amonyak toksisitesini azaltır ve oksijen tüketimini önler.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Özellikle 1980'lerin başından bu yana düzenleyici kurumlar öncelikle atıksudaki uçucu organik maddeler (UOM (VOC)) ve bazı öncelikli kirleticiler üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu kirleticilerin insan sağlığı ve sucul hayata toksik etkilerinin olduğu ortaya konmuştur. Arıtılmış atıksulardaki tehlikeli maddeler ve öncelikli kirleticilerin alıcı ortama etkilerinin çevresel kalite standartları ile düzenlenmesi ile deşarj standartlarının bu kapsamda yeniden gözden geçirilmesi uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır.

Tablo 7.1. Arıtılmış atıksuda bulunabilecek kalıntı maddeler ve etkileri [1].

Bileşikler	*Etkileri*	*Kritik konsantrasyonları, mg/L*
AKM	*Çamur birikimine yol açar, alıcı ortamda bulanıklık oluşturur.*	*Değişken*
Biyolojik olarak parçalanabilen organikler	*Alıcı ortamda çözünmüş oksijen seviyesini düşürebilir.*	*Değişken*
Öncelikli kirleticiler	*İnsanlar için toksik, kanserojen* *Su canlıları için toksik*	*Bileşiğin yapısına göre değişir* *Suda, biotada veya sedimentte bulunma durumuna göre farklı*
Uçucu organik bileşikler	*İnsanlarda toksik etki yapar, kanserojenikdir; fotokimyasal oksidanlar oluşturur.*	*Bileşiğin yapısına göre değişir*
Besi maddeleri		
Amonyak	*Klorür ihtiyacını arttırır, proseste nitrata çevrilebilir, oksijen kaynağını azaltır, fosfor ile birlikte istenmeyen sucul büyümeyi geliştirir.* *Balıklar için toksiktir.*	*Herhangi miktar*[a] *Değişken*
Nitrat	*Alg ve sucul büyümeyi teşvik eder* *Bebeklerde metemoglobinemia (blue babies)hastalığına sebep olur.*	*0,3*[b] *45*[c]
Fosfor	*Alg ve sucul büyümeyi teşvik eder.* *Koagülasyonu engeller.* *Kireç-soda yumuşaklığını engeller.*	*0,015*[b] *0,2-0,4* *0,3*
Diğer inorganikler		
Kalsiyum ve magnezyum	*Sertliği ve toplam çözünmüş katı maddeyi arttırır,*	
Klorür	*Tuzlu tat verir,* *Tarımsal ve endüstriyel prosesleri engeller,*	*250* *75-200*
Sülfat	*Müshil etkisi yapar*	*600-1000*
Diğer organikler		
Yüzey aktif maddeleri	*Köpüklenmeye neden olur, koagülasyonu etkiler*	*1,0-3,0*

[a] *pH ve sıcaklığa bağlıdır*
[b] *Durgun ve hareketsiz göller için*

7.2. İleri Atıksu Arıtımında Kullanılan Arıtma Teknolojileri

Özellikle son 30 yılda birçok ileri arıtma teknolojisi geliştirilmiş ve uygulamaya konmuştur. Bu Bölümde bu sistemlerin genel bir sınıflandırılması yapılacak ve kirletici giderme (arıtma) verimleri incelenecektir.

7.2.1. İleri Arıtma Teknolojilerinin Sınıflandırılması

İleri atıksu arıtma sistemleri temel işlem ve proseslerine veya uygulanan arıtma prensibine göre sınıflandırabilirler. Bu işlem ve proseslerin kıyaslanmasını kolaylaştırmak için aşağıdaki hususlar dikkate alınır.

- Arıtmanın amacı,
- Beklenen fonksiyonu gerçekleştirmek için kullanılan işlem ve proses tipi,
- Arıtılan atıksu özelliği ile ilgili bilgiler

Bu hususlar Tablo 7.2'de verilmektedir.

Tablo 7.2. İleri atıksu arıtma işlem ve prosesleri ile kirlilik giderimi [1]

Esas giderim görevi	*İşlem veya prosesin tanımı*	*Ar ıtılacak atıksu tipi*
AKM giderimi	*Filtrasyon*	*EPT, EST*
	Mikroelek	*EST*
Amonyak oksidasyonu	*Biyolojik nitrifikasyon*	*EPT, EST, EBT*
Azot giderimi	*Biyolojik nitrifikasyon / Denitrifikasyon*	*EPT, EST*
Nitrat giderimi	*Ayrı basamak biyolojik denitrifikasyon*	*EST + nitrifikasyon*
Biyolojik fosfor giderimi	*Ana akımda fosfor giderimi*	*RW, EPT*
	Yan akımda fosfor giderimi	*RAS*
N ve P' nin birlikte giderimi	*Biyolojik nitrifikasyon/denitrifikasyon ve fosfor giderimi*	*RW, EPT*
Fiziksel ve kimyasal metotlarla azot giderimi	*Hava ile sıyırma*	*EST*
	Kırılma noktası klorlaması	*EST + filtrasyon*
	İyon değişimi	*EST + filtrasyon*
Kimyasal ilavesi ile fosfor giderimi	*Metal tuzları ile kimyasal çöktürme*	*RW, EPT, EBT, EST*
Toksik bileşik ve refraktör (kararlı) organiklerin giderimi	*Karbon adsorpsiyonu*	*RW, EPT, EBT, EST*
	Aktif çamur + toz aktif karbon	*EST + filtrasyon*
Çözülmüş inorganik katıların giderimi	*Kireç ile kimyasal çöktürme*	*RW, EPT, EBT, EST*
	İyon değişimi	*EST + filtrasyon*
	Ultrafiltrasyon	*EST + filtrasyon*
	Ters osmoz	*EST + filtrasyon*
	Elektrodiyaliz	*EST + filtrasyon + karbon adsorpsiyonu*
Uçucu organik maddeler	*Buharlaştırma ve gaz sıyırma*	*RW, EPT*

EPT: Birinci kademe (birincil) arıtma çıkışı
EBT: İkinci kademe biyolojik arıtma çıkışı (son çökeltimden önce)
EST: Biyolojik arıtma çıkışı (son çökeltim çıkışı)
RAW: Ham atıksu
RAS: Aktif çamur dönüş akımı

7.2.2. Proseslerin Arıtma Seviyeleri

Arıtma işlem ve proseslerinin seçimi başlıca;

- Arıtılacak atıksuyun yeniden kullanım potansiyeli
- Atıksuyun özelliği
- Çeşitli proses ve işlemlerin bir arada uygulanabilirliği
- Deşarj standartları
- Çeşitli sistemlerin çevresel ve ekonomik yapılabilirliği

dikkate alınarak yapılır.

İleri arıtmada özel ve öncelikli kirleticilerin giderilmesi söz konusu olduğundan ekonomik uygulanabilirlik, sistem tasarımında kontrol edici faktör olmamaktadır. Uygun temel arıtma işlem ve proses düzenlemeleri ile, ileri arıtma sonrası elde edilebilecek çıkış suyu kalitesi değerleri Tablo 7.3'te verilmektedir. Bu işlem ve proseslerin farklı düzenlemeleri arıtma ekonomisine ve arıtılacak maddeye bağlı olarak oluşturulmaktadır.

Çeşitli ileri atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan proses akım şeması örnekleri Şekil 7.1'de verilmiştir.

Şekil 7.1. İleri atıksu arıtımı akım diyagramlarına örnekler [1]

Şekil 7.1. İleri atıksu arıtımı akım diyagramlarına örnekler (devamı)

Tablo 7.3. İleri atıksu arıtımında kullanılan çeşitli temel işlem ve proses düzenlemeleri ile ulaşılabilecek kalite seviyeleri [1]

Arıtım prosesi	*Arıtılmış çıkış suyu kalitesi*						
	AKM *mg/L*	***BOİ$_5$*** *mg/L*	***KOİ*** *mg/L*	***Top. N*** *mg/L*	***NH_3 - N*** *mg/L*	***PO_4 - P*** *mg/L*	***Bulanıklık*** *NTU*
AÇ +GF	*4-6*	*<5-10*	*30-70*	*15-35*	*15-25*	*4-10*	*0,3-5*
AÇ + GF + KA	*<3*	*<1*	*5-15*	*15-30*	*15-25*	*4-10*	*0,3-3*
AÇ/Nit, tek basamak	*10-25*	*5-15*	*20-45*	*20-30*	*1-5*	*6-10*	*5-15*
AÇ/Nit-denit.(ayrı)	*10-25*	*5-15*	*20-35*	*5-10*	*1-2*	*6-10*	*5-15*
Metal tuz + AÇ	*10-20*	*10-20*	*30-70*	*15-30*	*15-25*	*<2*	*5-10*
Metal tuz + AÇ + Nit-denit.+ filtrasyon	*<5-10*	*<5-10*	*20-30*	*3-5*	*1-2*	*<1*	*0,3-3*
BFG (ana akım)	*10-20*	*5-15*	*20-35*	*15-25*	*5-10*	*<2*	*5-10*
BN + BFG + filtrasyon	*<10*	*<5*	*20-30*	*<5*	*<2*	*<1*	*0,3-3*

AÇ: Aktif çamur — *Nit-denit: Nitrifikasyon + denitrifikasyon*
GF: Granüler filtrasyon — *BFG: Biyolojik fosfor giderimi*
KA: Karbon adsorpsiyonu — *BNG: Biyolojik azot giderimi*

7.3. Granüler Filtrasyon ile AKM Giderimi

Bu bölümde çıkış suyundaki artık AKM gideriminde yaygın olarak kullanılan granüler filtrasyon sisteminin tasarım esasları verilmiştir. Bu kapsamda dikkate alınacak temel parametreler aşağıdaki gibidir;

- Granüler filtrasyonun uygulanması
- Filtre ünitesinin sayısı ve boyutu
- Filtre tipinin seçimi
- Filtre yatağının çeşitleri
- Filtre malzemesinin özellikleri
- Filtre geri yıkama sistemi
- Filtreye ilaveler
- Filtre işletme problemleri
- Filtre kontrol sistemleri ve enstrümanları,
- Kimyasal ilaveli filtrasyon

7.3.1. Granüler Filtrasyonun Uygulanabilirliği

Granüler filtrasyonu atıksu arıtımında kullanma fikri daha önceki içme suyu arıtımında gözlenen başarılı uygulamalardan doğmuştur. Fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle atıksular, doğal sulardan önemli derecede farklılık gösterirler. Bu nedenle, atıksuların granüler filtrasyon uygulamaları özel tasarım gerektirmektedir. Genel olarak, atıksu filtreleri farklı katı yüklemelerinde daha büyük, ağır ve değişik boyutlardaki tanecikleri tutabilirler. Filtrasyon mekanizması oldukça kompleks olup, filtre direnci, yerçekimi etkisiyle çökelme, ortamda tanecikler arasında sıkışma gibi farklı etkenler söz konusudur. Ayrıca filtre yatakları arasındaki biyolojik büyüme, sistemde ek yük kaybı oluşturmaktadır. Atıksu filtrelerinin verimleri, yukarıda sayılan birçok faktöre bağlı olduğundan, kısıtlayıcı (sıkı) deşarj limitlerinin olduğu durumlarda uygulama öncesinde mutlaka pilot ölçekli çalışma yapılması önerilmektedir.

Atıksu filtrasyonu, daha çok alıcı ortama deşarjdan önce biyolojik arıtma çıkış suyunda kalan biyolojik flokların giderilmesinde kullanıldığı gibi, fosfatın metal tuzları veya kireç ile çöktürme sonrası kalan katılarını arıtmak ve arıtılmış atıksuyun aktif karbon ünitesine verilmeden önce ön arıtımını yapmak amacıyla da kullanılmaktadır. Ayrıca, tarım, park ve oyun alanlarının sulanması gibi tekrar kullanım uygulamalarında insan teması söz konusu olduğu için, biyolojik olarak arıtılmış atıksuyun filtrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Granüler filtrasyonun arıtılmış atıksulara uygulanması ile ilgili daha detaylı bilgi için Kaynak [2] ve [3]'e başvurulabilir.

Tasarım Uygulaması

Proses akım düzeni: Genel olarak, filtrasyon, son çökeltim tankı çıkışındaki kalıntı biyolojik flokların giderimi için kullanılır.

Ön Arıtma: İyi bir tasarım, hem filtre öncesinde çökeltim tankı girişinde hem de filtre girişinde organik ve inorganik koagülant ilavesine imkan vermelidir. Uygulanacak polimer dozajları, işletmeci tarafından kavanoz testi sonuçlarına göre belirlenir [4].

Organik Polimer Kullanımı: Organik polimerler uzun zincirli organik moleküller olup, moleküler ağırlıkları 10^4 ile 10^6 gr arasında değişir. Organik polimerler katyonik, anyonik veya naniyonik olabilirler. Polimerler daha büyük tanecik (flok) oluşturmak için son çökeltim çıkış suyuna ilave edilir. Atıksuyun kimyasal yapısı polimer verimini önemli ölçüde etkileyeceğinden, deneysel çalışma yapılarak (kavanoz testi) polimer tipini belirlemek gereklidir. Araştırmalarda polimer dozajı 1 mg/L'den başlanarak arttırılır ve sonuçlar gözlenir.

Sonuçlara göre dozaj 0,5 mg/L veya 0,25 mg/L değerinde azaltılır ve verimi en iyi olan dozaj belirlenmeye çalışılır. Alum bileşiği özelliğinde moleküler ağırlığı daha büyük olan polimerler geliştirilmiştir. Bunların uygulama dozajları daha yüksektir (≥10 mg/L).

Alum kullanımı: Yüksek pH değerine sahip (7,3-8,5) atıksular için 5-10 mg/L gibi düşük alum dozajları etkili olmadığından genel olarak optimum tanecik (AKM) giderimi, pH 7-8 aralığında 20-60 mg/L gibi yüksek alum dozajlarında elde edilir [1].

Filtreye beslenen atıksuda 20 mg/L'den daha fazla ortalama AKM konsantrasyonu olması bekleniyorsa, çıkıştaki AKM'nin 3 mg/L'den düşük olması için filtre öncesinde pıhtılaştırma, flokülasyon, çöktürme veya yüzdürmeden oluşan bir ön arıtma gereklidir.

Filtre tipi: Dünya genelinde atıksu arıtımı için kullanılan filtrelerin çoğu aşağı akışlı, çift malzemeli veya çoklu malzemeli ünitelerdir. Tek malzemeli-tabakalı yataklar, istenmeyen yük kaybı artışlarına sebep olduklarından kentsel atıksu arıtma uygulamalarında kullanılmazlar.

A det ve boyut: Çoklu filtre üniteleri, içme suyu filtrelerinde olduğu gibi, bazı üniteler geri yıkamadayken sistemin sürekli çalışmasına imkan verirler. Ünitelerin adet ve boyutlarının belirlenmesinde temiz su filtrelerindeki esaslar dikkate alınır.

Filtrasyon hızı ve nihai yük kaybı: Tipik filtrasyon hızları 5 ile 20 m^2/sa aralığında değişir. Nihai yük kayıpları 2,4 ile 3 m'dir.

Malzeme: Çeşitli malzeme dizilişleri için Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 yol göstericidir.

Tablo 7.4. Atıksuların BNR sistemi ile arıtımında çift malzemeli filtreler için tasarım kriterleri [4]

Parametre	***Aralık***	***Tipik değer***
Üstte antrasit kömürü		
Etkin dane çapı	*0,8-2,0 mm*	*1,3*
Şekil faktörü (f)	*0,4-0,6*	
Porozite	*0,56-0,60*	
Özgül ağırlık	*1,4-1,75*	
Yatak derinliği	*3600-900 mm*	*720*
Altta kum		
Etkin dane çapı	*0,4-0,8 mm*	*0,65*
Şekil faktörü (f)	*0,7-0,8*	
Porozite	*0,40-0,47*	
Özgül ağırlık	*2,55-2,65*	
Yatak derinliği	*180-360 mm*	*360 mm*
Filtrasyon hızı	*5-24 m/sa*	*12 m/sa*
Geri yıkama hızı	*48-72 m/sa*	
Geri yıkama süresi [a]	*10-20 dk*	
Yüzeysel hidrolik yük		
Döner dağıtıcı ile besleme hali	*1,2-2,4 m^3/m^2.sa*	

[a] *Filtreyi boşaltmak ve gerekli geri yıkama hızına kademeli olarak ulaşmak için süre gerekeceğinden gerçek devre dışı kalma süresi ≥30 dk olacaktır. Su yatağının temizlenmesi ve bulanıklığın giderilmesi için de 30-40 dakikalık bir ek devre dışı süresi gereklidir. Eğer hava ile yıkama uygulanıyorsa, hava ve yıkama suyunun ardışık olarak uygulanması gerekeceğinden gerekli süre daha da uzayacaktır.*

Tablo 7.5. Atıksuların BNR yöntemi ile arıtımında kullanılan derin yataklı-tek malzemeli filtreleri için tasarım kriterleri [4]

Parametre	*Aralık*	*Tipik değer*
Antrasit kömür		
Etkin dane çapı	*2-4 mm*	
Şekil faktörü (f)	*0,4-0,6*	
Porozite	*0,56-0,60*	
Özgül ağırlık	*1,4-1,75*	
Yatak derinliği	*900-2100 mm*	*1500 mm*
Filtrasyon hızı	*5-24 m/sa*	*12 m/sa*
Geri yıkama hızı	*37-45 m/sa*	
Geri yıkama süresi [a]	*15 dk*	
Yüzeysel hidrolik yük		
Döner dağıtıcı ile besleme hali	*1,2-2,4* $m^3/m^2.sa$	

[a] *Filtreyi boşaltmak ve gerekli geri yıkama hızına kademeli olarak ulaşmak için süre gerekeceğinden gerçek devre dışı kalma süresi ≥30 dk olacaktır. Su yatağının temizlenmesi ve bulanıklığın giderilmesi için de 30-40 dakikalık bir ek devre dışı süresi gereklidir. Eğer hava ile yıkama uygulanıyorsa, hava ve yıkama suyunun ardışık olarak uygulanması gerekeceğinden gerekli süre daha da uzayacaktır.*

Denitrifikasyon filtreleri: İri daneli, derin yataklı filtrelerde denitrifikasyon ile azot giderimi 30 yıldan daha uzun süredir uygulanmaktadır. Filtre ortamı, askıda çoğalan denitrifikasyon organizmalar için bir tutunma yüzeyi görevi görür ve denitrifikasyon gerçekleşir. Filtre, anaerobik olarak çalıştırılır. Bu uygulamalarda dışarıdan ilave karbon kaynağı temin edilmelidir. Bunun için genellikle her bir mg/L $NO_3 - N$ başına yaklaşık 3 mg/L metanol dozlanır.

Denitrifikasyon filtrelerinin işletmesi, oluşan azot gazı çıkışı (azot içeren gaz kabarcıklarının patlaması ile) hariç, tipik granüler filtrelerin işletilmesine benzemektedir. Denitrifikasyon ile oluşan azot gazı filtre içinde birikeceğinden, bu gazın dışarı verilmesi gerekir. Bu durum yük kaybında artışa neden olur. Oluşan yük kaybı, sadece 1 ile 5 dakika süreyle suyla geri yıkama yapılarak azaltılabilir. Geri yıkama suyu sistemde tutulmaz. Bu geri yıkama işlemi ile filtre temizliği amaçlanmaz. Denitrifikasyon ile oluşan azot gazının dışarı salınması işleminin sayısı, günlük 4-5 defadan 14-16 defaya kadar değişir. Bu sayı, filtreye uygulanan nitrat yükü, filtre malzemesi ve taban drenajının tipine göre değişir.

Filtre tasarımı, boş yatak temas süresine göre yapılır. Genellikle bu değer ılık su (20°C) için ~20 dk, soğuk su (10°C) için ise ~60 dk'dır. Yataklar yaklaşık 1,8 m derinliğinde tasarlanır ve ortalama 1,7 ile 5 m/sa yükleme hızı ile işletilirler [4].

Granüler filtrasyon teknolojisi uygulamaları hakkında detaylı bilgi için Kaynak [1]'e başvurulabilir.

7.4. Mikroelek ile Kalıntı AKM Giderimi

Mikroelekler, biyolojik arıtma ve stabilizasyon havuzu çıkış sularındaki askıda katıları gidermek için kullanılan eleklerdir. Tipik filtre malzemesi 25-35 μm açıklıklı bir elek olup <4 dev/dk hızla dönen bir tambur üzerine sarılıdır (Şekil 7.2). Bu ünitelerde elde edilen tipik AKM giderimi yaklaşık olarak %55 olup genelde %10 ila %80 arasında değişir. Mikroeleklerde karşılaşılan ana sorun, yüksek verimde AKM gideriminin sağlanamaması ve arıtılacak sudaki AKM salınımlarına karşı sistemin yeterince dirençli olmamasıdır. Mikroeleklerin tipik tasarım parametreleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Şekil 7.2. Tambur üzerine sarılı mikroelek

Tablo 7.6. Mikroeleklerin tipik tasarım parametreleri [1]

Parametre	*Tipik değer*	*Açıklamalar*
Elek boyu	*20-35 μm*	*15-60 μm boyut aralığında paslanmaz çelik veya polyester elek örtüsü mevcuttur*
Hidrolik yükleme hızı	*3-6 m^3/m^2*	*Tamburun batık yüzey alanı*
Elekte yük kaybı	*8-15 cm*	*Yük kaybı 20 cm'yi aştığında akım bypass edilmelidir*
Batık tambur	*Uzunluğun %70-75'i* *Alanın %60-70'i*	*Elek tasarımına göre değişir*
Tambur çapı	*2,4 – 4,9 m*	*Genelde 3 m tambur çapı kullanılır. Daha küçük çap boyutları geri yıkama ihtiyacını arttırır*
Tambur devir hızı	*4,5 m/dk, 8 cm yük kaybı* *35-45 m/dk, 15 cm yük kaybı*	*Maksimum devir hızı 45 m/dk'dır.*
Geri devir ihtiyacı	*%2 geri devir, 345 kPa* *%5 geri devir, 103 kPa*	

7.5. Diğer İleri Arıtma Yöntemleri

7.5.1. Kimyasal Yöntemlerle Fosfor Giderimi

Kimyasal yöntemlerle fosfor gideriminin temeli, suda çözünmüş haldeki fosforun katı tanecik formuna dönüştürülerek çöktürülmesidir. Fosforun bir kısmı klasik ikinci kademe (biyolojik) arıtma sisteminde, birinci ve ikinci kademe arıtma prosesinin her ikisinde de giderilir. Birinci kademe (ön) çöktürmede giderim, fosforun katı tanecik formunda olması ile sınırlanmış olup çöktürücünün verimine bağlıdır. İkincil arıtma prosesinde, fosfor mikroorganizma yapısına girdiğinden dolayı, son çöktürmede çöken mikroorganizmaların uzaklaştırılması ile giderimi sağlanmış olur. Böylece, konvansiyonel ikinci kademe arıtma ile giderilen fosfor miktarı mikroorganizma üremesinin bir fonksiyonudur.

Çıkış suyunda toplam fosfor konsantrasyonu, $C_{TP,çık}$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_{TP,çık} = C_{ÇP,çık} + X_{çık,m_{px}} \tag{7.1}$$

Burada,

$C_{ÇP,çık}$ (mg/L) : çözünmüş fosfor konsantrasyonu (genel olarak ortofosfat),
$X_{çık}$: çıkış askıda katı konsantrasyonu, mg/L
m_{px} : askıda kuru katı maddedeki fosfor konsantrasyonu, mg P/ mg AKM

Konvansiyonel aktif çamur sistemi için, m_{px} değeri 20-25 mg P/g UAKM'dir. Kimyasal fosfor giderimi için m_{px} değeri 40 ile 100 mg P/mg AKM (%4-10) arasında değişir [5].

Aşağıda verilen tipik katyonlar fosforun atıksudan çöktürülerek giderilmesi için kullanılır:

- Alüminyum
- Demir ve
- Kalsiyum

Uygun koşullar altında bu üç katyon ortofosfat ile çözünmez formda çökelti oluşturur. Bu nedenle çözünmüş ortofosfat kimyasal arıtımla giderilen birincil fosfordur. Diğer fosfat formları (polifosfatlar, kolloidler ve fosfor içeren tanecikler) ise adsorpsiyon, koagülasyon, çökelme, filtrasyon veya biyolojik yöntemler gibi ikinci kademe arıtma mekanizmaları ile ortamdan giderilirler.

Kimyasal fosfat gideriminde oluşan çökeltilerin yapısı çok iyi bilinmemektedir. Tablo 7.7'de fosfat giderimi sırasında oluşan kimyasal katılar verilmektedir.

Tasarım, işletme ve kimyasal fosforun analizinde dikkate alınması gereken üç önemli parametre aşağıdaki gibidir:

- Gerekli dozaj
- Ulaşılabilen minimum fosfat konsantrasyonu
- pH'ın etkisi

Tablo 7.7. Kimyasal giderim sırasında oluşan muhtemel çökeltiler [5].

Katyonlar	***Çökeltiler***
AL(III)	*Alüminyum fosfat* $[AL_r(H_2PO_4)(OH)_{3r-1}]$
	Alüminyum hidroksit $[AL(OH)_3]$
Fe(II)	*Demir (II) fosfat* $[Fe_3(PO_4)_2]$
	Demir (II) hidroksit $[Fe(OH)_2]$
Fe(III)	*Demir (III) fosfat* $[Fe_r(H_2PO_4)(OH)_{3r-1}]$
	Demir (III) hidroksit $[Fe(OH)_3]$
Ca(II)	*Trikalsiyum fosfat* $[Ca_3(PO_4)_2]$
	Hidroapatit $[Ca_5(OH)(PO_4)_2]$
	Kalsiyum karbonat $[CaCO_3]$

Fosfor gideriminde en yaygın kullanılan metal tuzları olan $FeCl_3$ ve $Al_2(SO_4)_3$ yanı sıra polimerler de sıklıkla bu metal tuzları ile birlikte çok kullanılırlar. Kireç, daha fazla miktarda çamur oluşturduğu için metal tuzları kadar yaygın kullanılmaz. Fosfor gideriminde kimyasal seçimini etkileyen faktörler Tablo 7.8'de verilmektedir.

Tablo 7.8. Fosfor giderimi için kimyasal seçimini etkileyen faktörler [1]

Faktörler
• *Giriş suyunda fosfor seviyesi*
• *Atıksudaki akım*
• *Alkalinite*
• *Kimyasalların fiyatı (ulaştırma dahil)*
• *Kimyasalların güvenilirliği*
• *Çamur çöktürme işlemleri*
• *Son uzaklaştırma metotları*
• *Diğer arıtma proseslerine uygunluk*

Çöktürücü olarak alum, demir veya kireç kullanıldığında çamur miktarının hesabı için gereken reaksiyonların özeti Tablo 7.9'da verilmektedir. Al (III) ve Fe (III) tuzları ile kimyasal fosfor giderimi için genelleştirilmiş reaksiyonlar ve denge sabitleri ayrıca Tablo 7.10'da verilmiştir.

Tablo 7.9. Çamur üretimini hesaplamada kullanılacak kimyasal reaksiyonlar [1]

Reaksiyon	*Çamurdaki kimyasal*
Kireç	
1. $5Ca^{+2} + 3PO_4^{-3} + OH^- \leftrightarrow Ca_5(PO_4)_3(OH)$	$Ca_5(PO_4)_3(OH)$
2. $Mg^{+2} + 2OH^- \leftrightarrow Mg(OH)_2$	$Mg(OH)_2$
3. $Ca^{+2} + CO_3^{-2} \leftrightarrow CaCO_3$	$CaCO_3$
Alum	
1. $Al^{+3} + PO_4^{-3} \leftrightarrow AlPO_4$	$AlPO_4$
2. $Al^{+3} + 3OH^- \leftrightarrow Al(OH)_3$	$Al(OH)_3$
Demir Fe(III)	
1. $Fe^{+3} + PO_4^{-3} \leftrightarrow FePO_4$	$FePO_4$
2. $Fe^{+3} + 3OH^- \leftrightarrow Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_3$

Tablo 7.10. Al (III) ve Fe (III) tuzları ile kimyasal fosfor gideriminde oluşan kimyasal reaksiyonlar ve denge sabitleri [5]

Kimyasal Reaksiyonlar		*Denge sabitleri*	
		Al (III)	*Fe (III)*
1. $Me^{3+} + 3\,H_20 \leftrightarrow Me(OH)_3\,(s)$	pK_{MeOH}	9,1	-0,5
2. $r\,Me^{3+} + H_2PO_4^- + (3r\text{-}1)\,OH^- \leftrightarrow Me_r\,(H_2PO_4)(OH)_{3r-1}\,(s)$	pK_S	25,8	67,1
	r	0,8	1,6
3. $Me^{3+} + H_2PO_4^- \leftrightarrow MeH_2PO_4^{2+}$	pK_{MP1}		-21,3
4. $Me^{3+} + H_2PO_4^{2-} \leftrightarrow MeHPO_4^+$	pK_{MP2}	-12,1	
5. $H_3PO_4 \leftrightarrow H^+ + H_2PO_4^-$	pK_3	2,1	
6. $H_2PO_4^- \leftrightarrow H^+ + HPO_4^{2-}$	pK_2	7,2	
7. $H_2PO_4^{2-} \leftrightarrow H^+ + PO_4^{3-}$	pK_1	12,3	

7.5.1.1.Metal Tuzları ve Polimer Kullanılarak Fosfor Giderilmesi

Demir ve alüminyum tuzları arıtım prosesinin farklı noktalarında sisteme ilave edilir. Ancak polifosfat ve organik fosfor ortofosfordan daha zor giderildiği için alum ve demir tuzlarının ikinci kademe arıtımda (son çökeltim öncesi) ilavesi daha iyi sonuç verir. Kimyasal ilavesine bağlı olarak daha iyi çöktürmeden dolayı ilave azot giderimi de görülür. İlave edilen kimyasallar nedeniyle sıvı fazdaki çözünmüş katı maddede artış görülebilir.

İlk Çöktürmeye Metal Tuzları İlavesi: Alüminyum veya demir tuzları arıtılmamış (ham) atıksuya ilave edildiğinde, çökelti oluşturmak için çözünmüş ortofosfat ile reaksiyona girer. Organik fosfor ve polifosfatlar floklar üzerine adsorplanarak daha karışık bir mekanizma ile giderilirler. Çözünmez formdaki fosfor ile birlikte önemli miktarda BOİ ve askıda katı da sistemden birincil çamur içinde giderilir. Uygun karıştırma ve flokülasyon, ayrı bir ünitede veya mevcut sistem bu işlemi görecek şekilde düzenlenerek sağlanmalıdır. Polimer ilavesi çöktürmeye yardım için gerekebilir. Düşük alkaliniteli sularda, pH'ı 5-7'de tutmak için baz ilavesi gerekebilir. Alum için tavsiye edilen dozlar Tablo 7.11'de verilmektedir.

Tablo 7.11. Çeşitli fosfor giderim seviyeleri için tipik alum dozajları [1]

Fosfor Giderimi, %	*Mol oranı, Al:P*	
	Aralık	*Tipik değer*
75	1,25:1 – 1,5:1	1,4:1
85	1,6:1 – 1,9:1	1,7:1
95	2,1:1 – 2,6:1	2,3:1

İkinci Kademe (Biyolojik) Arıtmaya Metal Tuzları İlavesi: Metal tuzları ham atıksuya, aktif çamur havalandırma tankında veya son çöktürme tankı girişine ilave edilebilir. Damlatmalı filtre sistemlerinde tuz, ham atıksuya veya çıkışa ilave edilebileceği gibi birden fazla noktadan da uygulanabilir. Fosfor giderimi çöktürme, adsorpsiyon, iyon değişimi ve floklaşma

reaksiyonlarının tümünü kapsamakta olup birincil, ikincil veya her iki çamurun uzaklaştırılması ile ortamdan giderilir. Teorik olarak $AlPO_4$'ün minimum çözünürlüğü pH 6,3'te ve $FePO_4$'ünkü ise pH 5,3'tedir. Ancak pratik uygulamalarda en iyi sonuç pH 5,5-7 aralığında elde edilmektedir.

Yalnız yüksek pH'larda iyi sonuç verdiğinden dolayı demir tuzlarının fosfor arıtımında kullanımı sınırlıdır. Düşük alkaliniteli sularda, sodyum aluminat ve alum veya kireç ilaveli demir 5,5'in üstünde pH sağlamak için birlikte kullanılabilirler. İyi bir çöktürme ve daha düşük BOİ için son çöktürücüye polimer ilave edilir. Metal iyonu-fosfor molar oranı 1-3 aralığında tutulmalıdır.

Son Çöktürmeye Metal Tuzları ve Polimer İlavesi: Damlatmalı filtre ve uzun havalandırmalı aktif çamur prosesleri için bazı durumlarda, çamur floküle olmayabilir ve son çöktürme tankında iyi çökmeyebilir. Bu çöktürme problemi genelde sistemin aşırı yüklenmesi durumunda görülebilir. Alüminyum veya demir tuzlarının ilavesi metalik hidroksil ve fosfatların çökmesine neden olacaktır. Bunların polimerlerle birlikte kullanımı kolloidal tanecikleri koagüle ederek giderimini kolaylaştıracaktır. Alum ve demir tuzlarının dozajında metal/fosfor'un molar oranı, ikinci kademe çıkışında fosfor konsantrasyonu 0,5mg/L'den büyükse 1-3 aralığında seçilir. Çıkış suyu P değerini ≤0,5 mg/L tutabilmek için yüksek dozda metal tuzu kullanımı ve ilave hızlı kum filtrasyonu gerekir.

7.5.1.2.Kireç Kullanarak Fosfor Giderimi

Fosfor gideriminde kireç kullanımı,

- Metal tuzu kullanımına kıyasla çamur miktarında önemli oranda artış olduğundan
- Kirecin besleme, depolama ve tutma safhalarında bakımı ve işletme problemlerinden dolayı

kısıtlıdır. Kireç kullanıldığında, dozaj kontrolündeki esas değişkenler, gerekli arıtım derecesi ve atıksuyun alkalinitesidir.

Her ne kadar kireç kullanımı kimyasal maliyetini düşürse de, bu yöntem ancak büyük sistemlerde fizibil olabilecek alternatif bir yöntemdir. Kireç geri kazanım sisteminin kullanıldığı durumlarda sistem, çamurdaki kalsiyum karbonatı ısıtma (termal işlem) ile (980°C) kirece dönüştüren termal rejenerasyonu da içerir. Bu sistemde açığa çıkan CO_2 atıksuyun pH'ının kontrolünde kullanılır.

İlk Çöktürme Tankına Kireç İlavesi: Düşük veya yüksek dozlu kireç uygulamasının her ikisi de fosforun %65-80 oranlarında çöktürülmesinde kullanılır. Kireç kullanıldığında, kalsiyum ve hidroksitin her ikisi de ortofosfat ile çözünmez hidroksiapatit [$Ca_5(PO_4)_3OH$] oluşturmak üzere reaksiyona girer. Yüksek dozlu kireç sistemlerinde, pH'ı 11'e yükseltmek için yeterli kireç ilave edilir. Çöktürmeden sonra, çıkış suyu biyolojik arıtma öncesi tekrar karbonatlandırılır. Aktif çamur sisteminde, birinci kademe çıkış pH'ı 9,5-10'u aşmamalıdır. Düşük-kireç dozlarında $Ca(OH)_2$ olarak uygun aralık 75-250 mg/L'dir. Birincil çöktürmede pH 9,5'te %50-60 BOİ giderimi elde edilebilir.

Problem 7.1.

Fosfor giderimi için gerekli alum dozu ve ilave (kimyasal) çamur oluşumu hesabı:

Ham evsel atıksu üzerinde yapılan önceki uygulama sonuçlarına göre 10 mg/L'lik TP seviyesini ≤1 mg/L'ye indirebilmek için gerekli molar Al/P oranı ~2,0 olması gerekmektedir. AAT tasarım debisi 20.000 m^3/gün (~100.000 EN) olduğuna göre;

a) Gerekli alum miktarını,

b) *Oluşacak ilave çamur miktarını bulunuz.*

(Alum formülü = $Al_2(SO_4)_3.18\ H_2O$, uygulanacak çözeltideki alum oranı %48 ve alum çözeltisi yoğunluğu 1,2 kg/L alınacaktır)

Çözüm.

a) *Gerekli alum dozu hesabı*

L çözeltideki alum miktarı : $0{,}48 * 1{,}2 = 0{,}576\ kg/L$

L çözeltideki Al miktarı : $0{,}576 * 2 * \frac{26{,}98}{666{,}5} = 0{,}04663\ kg/L$

(Alumun mol ağırlığı 666,5 gr, Al atom ağırlığı 27 gr alınmıştır)

Giderilecek 1 kg P başına ihtiyaç duyulan Al miktarı

Teorik dozaj : *1 mol Al/1 mol P (Tablo 7.9)*

Gerekli Al : $1\ kg * \frac{Al\ mol\ ağırlığı}{P\ mol\ ağırlığı} = 1 * 27/31 = 0{,}87\ kgAl/kg\ P$

Giderilecek kg P başına ihtiyaç duyulan alum çözeltisi

Alum dozu : $2 * \frac{0{,}87\ kg\ Al}{1\ kg\ P} * \frac{L\ alum\ çözeltisi}{0{,}04663\ kg/L} = 37{,}3\ L\ alum/kg\ P$

Günlük alum çözeltisi ihtiyacı

Alum : $20.000\ m^3/gün * (10\ g\ P/m^3 - 1) * 33{,}7\ L\ alum/kg\ P * 10^{-3}$
$\cong 6066\ L\ alum/gün$

$1\ aylık\ depolama\ kapasitesi\ \cong 30 * 6066 * 10^{-3} \cong 182\ m^3$

b) *Oluşması beklenen ilave kimyasal çamur (alum çamuru) miktarının hesabı*

Kimyasal destekli ön çöktürmede AKM giderim verimi ~%50 düzeyinden ~%75'lere çıkar.2'e Alum ile fosfor gideriminde iki tip kimyasal çamur oluşur: Alüminyum fosfat ve kullanılan fazla alum dolayısıyla alüminyum hidroksit çamurları.

Tablo 7.10 Kimyasal Reaksiyon 2'ye göre, $Al_{0,8}(H_2PO_4)(OH)_{1,4}$, Mol ağırlığı = 142,4; çökeltisi, Kimyasal Reaksiyon 1'e göre ise, $Al(OH)_3$, Mol ağırlığı = 78, çökeltisi (çamuru) oluşur.

Gerekli Al dozu;

$Al_{dozu} = (Al/P)(C_{P,giriş} - C_{P,çıkış})$

$= 2 * (10 - 1) = 18\ mg/L = 0{,}667\ mmol\ Al/L$

$Giderilen\ P = 9\ mg\ P/L = 9/31 = 0{,}29\ mmol\ P/L$

$Stokiyometrik\ Al\ ihtiyacı, r\ =\ (0{,}8\ mmol\ Al/mmol\ P * 0{,}29)\ =\ 0{,}232\ mmol\ Al/L$

Fazladan ilave edilen Al = 0,667 – 0,232 = 0,435 mmol Al/L

$Al_{0,8}(H_2PO_4)(OH)_{1,4}$ çamuru $= 0{,}29 * 142{,}4\ =\ 41{,}3\ mg/L$

$Al(OH)_3$ çamuru $=\ 0{,}435\ * 78\ =\ 33{,}93\ mg/L$

Üretilen toplam kimyasal çamur $= (41{,}3 + 33{,}93) * 120.000\ m3/gün * 10 - 3$
$= 1505\ kg\ KM/gün$

Birincil çamurdaki artış $= (0{,}75 - 0{,}50) * 300\ mg\ AKM/L * 20.000 * 10 - 3$
$= 1500\ kg\ KM/gün$

Oluşacak olan kimyasal + ilave birincil çamur miktarı; 1505 + 1500 = 3005 kg KM/gün

Kimyasal çökeltim uygulanmamış ön çökeltim çamuruna (birincil çamur) kıyasla toplam çamur miktarındaki artış;

$$\frac{3005 + 300 * 0{,}5 * 20.000 * 10^{-3}}{300 * 0{,}5 * 20.000 * 10^{-3}} = \frac{6005}{3000} \cong 2\ (\%100, bir\ misli\ artış)$$

Kimyasal çamur oluşumu, Tablo 7.9'daki kimyasal reaksiyonlarla da hesaplanabilmektedir [1].

7.5.2. Membran Sistemler

7.5.2.1.Genel Bilgiler

İlk kez 1748 yılında Abbe Nolet'in osmoz olayını keşfetmesiyle ortaya çıkan membranlar, iki fazı birbirinden ayıran seçici bir bariyer olarak tanımlanmaktadır. 19. yy boyunca ve 20. yy başlarında endüstriyel alanda kullanımları yaygın olmamasına rağmen, membranlar ile pek çok laboratuvar ölçekli çalışma gerçekleştirilmiştir. 1960'da S. Loeb ve S. Sourirajan'ın ilk asimetrik selüloz asetat membranlarını yapmalarıyla beraber oldukça iyi akı verimlerine ulaşılmış ve böylece membranlar su arıtımında ilk kez kullanılmaya başlanmıştır. Loeb ve Sourirajan'ın bu başarılı çalışmaları neticesinde membran bilimi 1960'lı yıllardan itibaren büyük ivme kazanmıştır. 1970'lerde ilk olarak endüstriyel su üretim amaçlı kullanılmaya başlanan membranların bu tarihten sonra endüstriyel alanlarda kullanımı hız kazanmıştır [6].

Membran filtrasyonu, partikül maddelerin, kolloidlerin, büyük moleküllerin, iyonların, askıda katı maddelerin ve çözünmüş maddelerin ayırımı amacıyla kullanılan bir teknolojidir. Besleme akımı, sürücü kuvvetlerin (basınç farkı, sıcaklık farkı, konsantrasyon farkı) etkisiyle membrandan geçerken süzüntü ve konsantre olmak üzere iki akıma ayrılmaktadır. Membran filtrasyona ait gösterim Şekil 7.3'te, sürücü kuvvetlere göre yapılan sınıflandırma ise Tablo 7.12'de verilmiştir.

Şekil 7.3. Membran filtrasyonu

Tablo 7.12. Sürücü kuvvetlerine göre membranlar

Membran Prosesi	*Faz I*	*Faz II*	*Sürücü Kuvvet*
Mikrofiltrasyon (MF)	*Sıvı*	*Sıvı*	*Basınç*
Ultrafiltrasyon (UF)	*Sıvı*	*Sıvı*	*Basınç*
Nanofiltrasyon (NF)	*Sıvı*	*Sıvı*	*Basınç*
Ters Osmos (RO)	*Sıvı*	*Sıvı*	*Basınç*
Gaz ayırma	*Gaz*	*Gaz*	*Basınç*
Diyaliz	*Sıvı*	*Sıvı*	*Konsantrasyon farklılığı*
Osmoz	*Sıvı*	*Sıvı*	*Konsantrasyon farklılığı*
Pervaporasyon	*Sıvı*	*Gaz*	*Basınç*
Elektrodiyaliz (ED)	*Sıvı*	*Sıvı*	*Elektriksel potansiyel farklılığı*
Termo-osmoz	*Sıvı*	*Sıvı*	*Sıcaklık/Basınç*
Membran distilasyonu	*Sıvı*	*Sıvı*	*Sıcaklık/Basınç*

Membranlar farklı malzemelerden üretilebilirler. Bunlar:

(1) Organik (polimerik) membranlar
   a. Hidrofobik (PTFE, PVDF, PP, PE)
   b. Hidrofilik (PC, PSf/PES, PI/PEI, PA, PEEK)
(2) İnorganik membranlar
   c. Seramik membranlar
   d. Cam membranlar
   e. Metalik membranlar

Kullanım amacına göre uygun membran malzemesi seçiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir;

- Sıcaklığa dayanıklılık,
- Basınca dayanıklılık,
- pH'ya dayanıklılık,
- Yüksek kimyasal direnç,
- Uygun fiyat.

Organik membranların ana maddesi polimerlerdir. İnorganik membranlar, kimyasal ve termal olarak organik membranlara göre daha yüksek dayanıklılık gösterirler. Sentetik polimerlerden daha çok poliamid ve polisülfan malzemeleri yaygındır ve genellikle UF membranlarda kullanılır. Bu tür malzemelerin pH, sıcaklık ve klora karşı direnci yüksektir. Daha pahalı olan seramik membranlar ise geniş pH ve sıcaklık aralıklarında uygulanabilir ve MF tipi membranların sanayi uygulamalarında kullanımı yaygındır.

Membranların morfolojilerine göre sınıflandırılması şu şekildedir;

- Simetrik membranlar
- Asimetrik membranlar
- Kompozit membranlar

Simetrik membranların (boşluklu veya boşluksuz) kalınlıkları 10–200 μm arasında değişmektedir. Asimetrik membranlar, üniform olmayan bir yapıya sahip olup kalınlık yaklaşık olarak 10–200 μm arasındadır. Bu membranlar, 50–150 μm arasında boşluklu bir alt tabaka (porozlu destek tabakası) ve 0,1–0,5 μm kalınlığında oldukça yoğun bir üst katmandan (kabuk tabaka) oluşmaktadır.

Membranlar, dışarıdan gelebilecek zararlara karşı korunmak amacıyla modül olarak adlandırılan ünitelere yerleştirilmektedirler. Ne kadar çok membran alanı, ne kadar küçük bir üniteye yerleştirilirse o kadar ekonomi sağlanmaktadır. 1960 ve 1970'li yıllarda düşük maliyetli

membran modüllerinin oluşturulmasıyla membranlar endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Membran modülleri, ince boşluklu, spiral sargılı, kapiler, tubülar, levha-çerçeve tipli olarak hazırlanabilmektedir.

Modül seçiminde dikkat edilmesi gerekenler hususlar aşağıdaki gibidir:

- Fiyatları yüksek olmamalıdır,
- Hasar, delik ve sızıntılara karşı güvenilir olmalıdır,
- Minimum hidrolik kayıp oluşturmalı,
- Minimum enerji gerektirmeli,
- Temizlenmesi kolay olmalıdır.

Farklı modül tiplerinin üstün ve zayıf yönlerinin karşılaştırılması Tablo 7.13'te verilmiştir.

Tablo 7.13. Farklı modül tiplerinin üstün ve zayıflıkları

Modül tipi	*Üstünlükler*	*Zayıflıklar*
Spiral sargılı	*- Yüksek paketleme oranı* *- Konsantrasyon polarizasyonuna karşı etkili* *- Düşük işletme maliyeti* *- Minimum enerji tüketimi*	*- Temizlemesi zor* *- Yüksek basınç farkı oluşumu* *- Daha az kirli su ve atıksularda kullanılabilir*
İnce boşluklu	*- Yüksek paketleme oranı* *- Düşük maliyetler*	*- Tıkanmaya karşı direnci az* *- Temizlemesi zor* *- Membran değiştirme zor*
Tübular	*- Tıkanmaya karşı dirençli* *- Temizlemesi kolay*	*- Düşük paketleme oranı* *- Pahalı*
Levha-çerçeve	*- Yüksek paketleme oranı* *- Membran değişimi kolay*	*- Temizlemesi zor* *- Tıkanmaya karşı direnci az*

Membranların yaygın olarak kullanımını kısıtlayan en büyük engel membran tıkanmasıdır. Tıkanma tipleri:

- *Partiküler ve kolloidal tıkanma:* Membran gözenek çapından daha büyük olan maddelerin, membran yüzeyinde birikerek gözenekleri tıkamasıyla oluşur.
- *Konsantrasyon polarizasyonu:* Tersinir bir proses olup, membran yüzeyinde konsantrasyon artışı ile oluşur.
- *Adsorpsiyon yoluyla tıkanma:* Gözenek çapına eşit ya da daha küçük boyuttaki maddelerin gözenek içlerinde tutulmasıyla gerçekleşir.
- *Çökelme:* İnorganik maddelerin membran yüzeyine çökelmesiyle oluşur.
- *Biyolojik Tıkanma:* Atıksuda mikroorganizmaların neden olduğu tıkanma tipidir.

Genellikle membranlar, başlangıç durumuna göre basınç azalması %20'yi geçerse, akı değeri %10 azalırsa, besleme basıncı %10 artarsa ve giderme verimi %15 kötüleşirse temizlenmelidir.

Son yıllarda kullanımı hızla artan membran prosesler; mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmozdur. Sürücü kuvveti basınç olan bu membran proseslerin karşılaştırılması Tablo 7.14'te gösterilmiştir.

Tablo 7.14. Farklı modül tiplerinin üstün ve zayıf yönleri

Membran prosesi	*Basınç (bar)*	*Akı değişimi (l/m².sa.bar)*	*Uygulamaları*
MF	*0,1–2*	*> 50*	*Partikül, mikroorganizma giderimi*
UF	*1–5*	*10–50*	*Virüs, makromolekül giderimi*
NF	*5–30*	*1,4–12*	*Sertlik giderimi* *Desalinasyon*
RO	*10–100*	*0,05–1,4*	*Desalinasyon*

Membran proseslere ait filtrasyon spektrumu Şekil 7.4'te verilmiştir.

Şekil 7.4. Membran proseslere ait filtrasyon spektrumu

(a) Düşük Basınçlı Membran Sistemleri (Mikrofiltrasyon ve Ultrafiltrasyon)

Gözenek çapları 0,05 ile 5 µm arasında değişmekte olan mikrofiltrasyon membranlarında ayırma işlemi elek mekanizmasına dayanmakta ve büyüklüğü gözenek çapından daha fazla olan maddeler membran tarafından tutularak sudan ayrılmaktadır. Bu tür membranlar daha çok partiküllerin ve mikroorganizmaların gideriminde kullanılır. MF membranları gözenek çapları ile sınıflandırılır ve giderme verimi, mikroorganizma giderme kapasitesi (log-giderme verimi) ile belirlenir.

Konvansiyonel arıtma tesislerinde klor ile dezenfeksiyon sonucu, dezenfeksiyon yan ürünleri (THM) adı verilen ve insan sağlığı için zararlı olan maddeler oluşmaktadır [6]. Dezenfeksiyon yan ürünlerinin en az oluşacağı bir dezenfeksiyon sisteminin kullanılması bu nedenle oldukça önemlidir. Mikroorganizmaların mikrofiltrasyon ile büyük oranda tutulmaları, daha az dezenfektan ihtiyacını ve dolayısıyla, daha az dezenfeksiyon yan ürünü oluşumunu sağlamaktadır.

MF uygulamalarında arıtma sırasında herhangi bir kimyasal madde kullanımı söz konusu değildir, dolayısıyla konvansiyonel arıtma sistemlerinde kullanılan kimyasal maddelerin oluşturduğu toksik etkiler mikrofiltrasyonda görülmez. Mikrofiltrasyon membranları tek başına ya da NF/RO öncesinde ön arıtma amaçlı olarak kullanılabilmektedir.

1930'lu yıllardan beri kullanılmakta olan UF membranlarının işletme basıncı 1–5 bar arasında değişmekte olup daha çok makromoleküllerin ve kolloidal maddelerin giderilmesinde kullanılırlar. İşletme açısından mikrofiltrasyona benzeyen UF membranlarının gözenek boyutları 0,05 mm ile 1 nm arasında değişmektedir. UF membranları üst tabaka kalınlığı 50–250 µ arasında değişen yüksek geçirgenlik ve seçiciliği olan bir alt tabaka ile desteklenmiştir. Ancak esas filtrasyon olayı üst tabakada meydana gelmektedir.

UF membranları, bakteri ve virüs giderimi açısından da oldukça güvenlidir. UF membranlarında, maddelerin tutulma seviyeleri moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) ile ifade edilmekte olup her bir membran türü için bu değer belirlenmiştir. Ultrafiltrasyon membranları ile moleküler ağırlıkları, 1.000–1.000.000 MWCO arasında değişen maddeler

tutulmaktadır [6]. UF membran performansı, sadece membran özellikleri ile değil, aynı zamanda konsantrasyon polarizasyonu, tıkanma ve adsorpsiyon ile de belirlenmektedir.

Başlıca UF membran uygulama alanları;

- İçme suyunda ileri arıtma
- Gıda ve süt endüstrisi
- İlaç endüstrisi
- Tekstil endüstrisi
- Kimya endüstrisi
- Kağıt endüstrisi
- Deri endüstrisi
- RO ve NF öncesinde ön arıtma

olarak sıralanabilir.

(b) Yüksek Basınçlı Membran Sistemleri (Nanofiltrasyon ve Ters Osmoz)

Nanofiltrasyon özellikle son yıllarda kullanımı hızla artan bir teknolojidir. İnce filmli selüloz olmayan membranlardaki gelişmeler ile beraber kullanımı daha da yaygın hale gelmiştir. Boşluk çapı açısından, ters osmoz ile utrafiltrasyon membranları arasında bulunmaktadır. Nanofiltrasyon membranları, ters osmozdan daha düşük basınçlarda işletilmekte, ancak ters osmoza göre daha düşük kalitede su vermektedir. Çapı, 0,001 μm'den büyük olan moleküllerin gideriminde kullanılmaktadır. NF membranları genellikle % NaCl veya $MgSO_4$ giderme verimi ile sınıflandırılır. Ayrıca moleküler ağırlık engelleme sınırı da giderme verimini belirlemede kullanılmaktadır. Bu membranlarda, iki değerlikli iyonların giderimi, tek değerlikli iyonların giderimine göre çok daha yüksek olmaktadır. NF membranları,

- Yüzeysel sulardan sertlik gideriminde,
- Organik madde gideriminde,
- Kuyu sularından TDS ve nitrat gideriminde
- Pestisit gideriminde

kullanılmaktadır. Ayrıca endüstriyel alanda NF membranlarının;

- Tuzlu peynir sularının arıtımında,
- Süt endüstrisi atıksularının geri kazanılmasında,
- Tekstil endüstrisinde renk ve organik madde gideriminde,
- Gıda ve eczacılıkta organik maddelerin konsantre edilmesi ve tuz giderilmesinde vb. uygulamaları vardır.

Bilindiği üzere normal osmozda, yoğunluğu az olan sıvı yarı geçirgen bir membrandan, yoğunluğu fazla olan tarafa geçmektedir. Bu işlem osmotik basınçta dengelenene kadar devam etmektedir. Ters osmozda ise, yoğunluğu fazla olan sıvı tarafında osmotik basınçtan daha büyük bir basınç uygulanarak sağlanacak ters akışla yoğunluğu fazla olan sıvı içerisinde bulunan mineraller, tuzlar ve organik maddeler membranın bir tarafında bırakılarak, diğer tarafa yoğunluğu daha az, tuzlar ve minerallerden arındırılmış bir sıvı olarak geçirilir. Şekil 7.5'te osmoz ve ters osmoz proseslerinin gösterimi verilmiştir.

Şekil 7.5. Osmoz ve ters osmoz prosesleri

Ters osmoz, 1960'larda kullanımı hızlı bir şekilde artmaya başlayan bir teknolojidir. Özellikle desalinasyon ve atıksu arıtma alanlarında ters osmoz kullanımı yaygınlaşmıştır. Ters osmoz ile giderilen maddeler; tuzlar, sertlik, patojenler, bulanıklık, dezenfeksiyon yan ürünleri ve pestisitlerdir. Giderilemeyen maddeler ise; hidrojen sülfür, bazı pestisitler, karbondioksit ve birçok çözünmüş gaz olarak sayılabilir.

Ters osmoz membranlarında, 10–100 bar arasında değişen yüksek basınçların uygulanması gerekmektedir. Son yıllarda membran üretimindeki gelişmelerle birlikte düşük basınçlı ters osmoz membranları da değişik alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür membranlarda uygulanan basınç besleme suyuna bağlı olarak 10 bar'a kadar düşürülmüştür. RO membranları genellikle % NaCl giderme verimi ile sınıflandırılmaktadır.

RO membranlarının uygulama alanları;

- İçme suyu üretimi,
- Atıksu arıtımı,
- Endüstriyel su üretimi,
- Değişik endüstriyel atıksuların arıtımı,
- Meyve suyu konsantresi,
- Fermentasyon ürünleri

olarak verilebilir.

Ters osmoz membranlarının kullanımı arttıkça, zamanla işletme maliyeti hızla azalmış ve akı değerleri ile giderme verimleri artmış, ayrıca geri kazanım oranları da yükselmiştir.

Tipik bir ters osmoz ve nanofiltrasyon sistemi üç aşamadan oluşmaktadır [7]. Bunlar, ön arıtma, membran sistemi ve son arıtmadır. Şekil 7.6'da tipik bir yüksek basınçlı membran sistemi (NF&RO) akış diyagramı verilmiştir. NF ve RO sistemine alınan her türlü su kaynağı, belli bir ön arıtmaya tabii tutulmalıdır. NF ve RO öncesinde, partiküler tıkanmayı önlemek üzere planlanan ön arıtma prosesi, genellikle konsantrasyonu arttıktan sonra kimyasal olarak çökelebilecek maddelerin çökelmelerini önlemek üzere asit ve/veya antisakalant ilavesi, sonrasında ise 5-20 µm'lik kartuş filtrelerden oluşmaktadır.

Ters osmoz sistemi ile arıtılacak su kaynağı daha da kirli ise yukarıda bahsedilen ön arıtma birimlerine ilave olarak başka ön arıtma sistemleri (kum filtresi, ultrafiltrasyon/mikrofiltrasyon membranları vb.) de kullanılabilir. Ters osmoz sonrası, havalandırma, gazlaştırma, pH

ayarlama, korozyon önleyici kimyasal ilavesi, florlama ve dezenfeksiyon gibi konvansiyonel su arıtma sistemlerinde kullanılan birçok son arıtma işlemi uygulanır. NF ve RO sistemlerinin iyi bir şekilde tasarım ve işletimi için arıtılacak su ve arıtılan suyun kalitesinin çok iyi bilinmesi ve buna uygun ön ve son arıtma işlemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Şekil 7.6. Tipik bir ters osmoz sistemi akım şeması [7]

NF ve RO membranları, deniz ve kuyu suyu arıtımı, dezenfeksiyon yan ürünü arıtımı, sertlik giderimi, renk giderimi, inorganik kirleticilerin arıtımı (nitrat, florür, arsenik, ağır metaller vb.), sentetik ve doğal organik maddelerin giderimi, patojen giderimi ve atık suların geri kazanılarak tekrar kullanımı (direkt veya direkt olmayan dolaylı yeraltına deşarj vb.) maksatları için uygulanmaktadır.

NF ve RO membranları, boşluksuz membranlar oldukları için her ne kadar askıda katı maddeleri (yüksek ve düşük bulanıklık vb.) de tutabiliyor olsalar da, askıda katı maddeler membran yüzeylerini hemen tıkayabilmektedir. Bu tıkanma bazen geri dönüşümlü, bazen ise geri dönüşümsüz olmaktadır. Bundan dolayı, NF ve RO membranları öncesinde, ham suda bulunan partiküler maddelerin ön arıtma ile tutulması gerekmektedir.

RO membranlarının en önemli kullanım alanı tuzlu yüzeysel sulardan, tuzlu yeraltı sularından, deniz suyundan, ileri arıtmadan geçmiş atıksulardan ve endüstriyel proses sularından tuz giderimidir. Ticari olarak piyasada bulunan membranların giderme kabiliyeti değişebildiği için hedef TDS aralığı için uygun membranlar seçilmelidir. Yeraltı suyu, deniz suyu ve diğer daha az tuzlu yüzeysel suların arıtımında farklı ters osmoz membranları kullanılabilmektedir. Tuz konsantrasyonunun artması, membrana uygulanacak basıncın da artmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı, düşük tuzlulukta konsantrasyonundaki yüzeysel sularda daha düşük basınçlı RO membranlarının, yüksek tuzluluktaki sularda ise (deniz suyu veya endüstriyel sular) yüksek basınçlı ve yüksek giderme verimli ters osmoz membranlarının kullanılması gerekmektedir. İçme suyu olarak kullanılabilir sularda (EPA tarafından) tavsiye edilen TDS konsantrasyonu, 500 mg/L'dir. Genellikle ters osmoz membranları ile arıtmada, tuzluluğu daha da aşağılara çekmek çok pahalı olacak ise bu değer sınır değer olarak kabul edilmekte ve arıtılacak suyun konsantrasyonu anılan değerin altında olacak şekilde bir arıtma gerçekleştirilmektedir.

RO membranları ile giderim çok yüksek olduğu için bazı durumlarda, arıtılan suyun kalitesi korozif, düşük tamponlama kapasitesinde ve düşük alkalinitede olabilmektedir. Ön arıtmada çökelme kontrolü için asit kullanıldığında, suyun pH değeri de düşük olmakta ve süzüntü

suyuna agresif özellik kazandırmaktadır. Bu yüzden, RO membranları, çıkışta uygun son arıtma elemanları ile borularda korozyonu önleyici düşük TDS ve iyi tamponlama kapasitesine sahip su elde edilecek şekilde boyutlandırılmaktadır.

7.5.2.2.Membran Dizilerinin Tasarımı

Membran dizisi, seri haldeki membran elementlerini ifade etmektedir. Her bir seride, birden fazla membran bulunmaktadır. Ayrıca, sonraki serilerde membran sayısı azalmaktadır. Örnek olarak, üç aşamalı bir membran dizisinde, membran dizileri 4:2:1 olacak şekilde sıralanırlar (Şekil 7.7). Membran elementi dizisi, ham ve arıtılmış su karakteristiği belirlendikten sonra belirlenebilir. Tasarım, aşağıda belirtilen aşamalardan oluşmaktadır:

1. Membran sisteminin seçimi (RO, NF, vb.)
2. Maksimum akı ve geri kazanım oranının belirlenmesi (toplam ve her bir membran elementi ve basınç kabı başına)
3. Uygulanacak net basınç limitlerinin belirlenmesi
4. Giderme verimi ihtiyacının belirlenmesi
5. Membran türünün seçimi
6. Optimum arıtım ve maliyet için tasarım akısı, basıncı ve geri kazanım oranının tekrar değerlendirilmesi ve belirlenmesi
7. Membran dizisi sayısı ve boyutunun belirlenmesi
8. Gerekli membran alanının bulunması
9. Membran elementi çap ve boyunun seçilmesi
10. Her bir membran kabındaki membran sayısının seçilmesi
11. Bir membranın geri kazanım oranına bağlı olarak membran aşamaları sayısının belirlenmesi
12. Membran elementi ve basınç kapları sayıları ile membran dizisi boyutunun belirlenmesi
13. Tahmini arıtılmış su konsantrasyonunun belirlenmesi ve hedef değer ile karşılaştırılması
14. Aşamalar arasında basınç artışı gereksinimi ve ilk aşamada arıtılmış suyun akı dengesine etkisi
15. Ham suyun arıtılmış su ile karışım gereksiniminin belirlenmesi ve 6-13 aşamaların tekrar edilmesi

Şekil 7.7. RO membran aşamalarının şematik gösterimi

Aşağıda membran aşamalarının tasarımı hakkında bilgi verilmiştir.

Geri kazanım:

Geri kazanım oranı, R , arıtılmış su debisinin ham su debisine oranıdır. Genellikle, arıtılmış su konsantrasyonu, çökelebilirlik limitleri ile ilk yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınarak; geri kazanım oranı maksimum seviyede tutulmaya çalışılır.

Akı:

Arıtılmış su akısı, suyun kütle transfer katsayısı, su sıcaklığı ve uygulanan net sürücü basınç ile kontrol edilir. Kütle transfer katsayısı, membran cinsine bağlıdır. Uygulanan net basınç farklılığı membranın her iki tarafı arasındaki basınç farkıdır. Uygulanan net sürücü basınç farklılığı ise uygulanan basınç ile ortalama osmotik basınç arasındaki farktır. Seçilen basınç değeri, membranın mekanik dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Akı ayrıca, sıcaklık arttıkça da artmaktadır.

Çözünmüş madde akısı:

Çözünmüş madde akısı, membranın her iki tarafı arasındaki konsantrasyon farklılığı ve çözünmüş maddenin kütle transfer katsayısı ve membran malzemesine bağlıdır. Konsantrasyon farklılığı, uygun geri kazanım oranının belirlenmesi veya değişik ham su kaynağı seçimi ile sağlanabilir.

Arıtılmış su konsantrasyonu:

Arıtılmış su konsantrasyonunun tahmin edilmesi için temel bir denklem kullanılır. Bu denklem, basit denklemler içermektedir ve beş unsura bağlıdır: ham su konsantrasyonu, su ve çözünmüş madde kütle transfer katsayıları, geri kazanım oranı ve uygulanan net basınç farklılığı. Ham su konsantrasyonu, ham su kaynağına göre değişir. Su ve çözünmüş madde kütle transfer katsayıları ise seçilen membrana bağlıdır. Geri kazanım oranı ve net basınç farklılığı, tasarımcı tarafından ortaya konulabilir.

Geri kazanım oranı değişiminin etkisi:

Tablo 7.15'te geri kazanım etkisinin arıtılmış su konsantrasyonunu nasıl etkilediği verilmiştir. Bu tabloda ayrıca artan geri kazanım oranı ile birlikte, ham su debisinin azalması da gösterilmiştir.

Tablo 7.15. Geri kazanım oranı değişiminin etkisi

Geri kazanım oranı, %	*Ham su konsantrasyonu, mg/L*	*Konsantre akımı konsantrasyonu, mg/L*	*Ortalama besleme konsantrasyonu, mg/L*	*Arıtılmış su konsantrasyonu, mg/L*	*Gerekli ham su debisi, m^3/gün*
50	*1000*	*1951*	*1475*	*49*	*7570*
75	*1000*	*3762*	*2381*	*79*	*119950*
90	*1000*	*8566*	*4783*	*159*	*196015*

Uygulanan net basınç değişiminin etkisi:

Tablo 7.16'da basınç ile arıtılmış su konsantrasyonunun değişimi gösterilmiştir. Geri kazanımdaki %50 artış (%50'den %75'e), arıtılmış su konsantrasyonunu %67 artırmaktadır. Basınçtaki %50 azalma ise (500 psi'den 250 psi'ye), arıtılmış su konsantrasyonunu %93 artırmaktadır. Bundan dolayı, net basınç farklılığının, arıtılmış su konsantrasyonu üzerindeki etkisi daha büyüktür. Şekil 7.8'de arıtılmış su konsantrasyonunun, basınç farklılığı ve geri kazanım oranı ile olan değişimi gösterilmiştir. Konsantrasyondaki aşırı artış, düşük basınçlar ve yüksek geri kazanım oranlarında görülmektedir.

Tablo 7.16. Net basınç değişiminin etkisi

Net basınç değişimi, psi	*Arıtılmış su konsantrasyonu, mg/L*
100	*177*
250	*79*
500	*41*

Şekil 7.8. Net basınç değişimi ve geri kazanım oranının arıtılmış su konsantrasyonuna olan etkisi

Arıtılmış su akısı:

Akı değerini, uygulanan net basınç değeri ve su geçirimlilik katsayısını değiştirerek değiştirebiliriz.

Uygulanan net basınç değerinin etkisi:

Tablo 7.17'de uygulanan basınç ile debideki değişim verilmiştir. Debi, uygulanan basınç ile doğru orantılıdır.

Su geçirimlilik katsayısının etkisi:

Tablo 7.18'de değişik membran geçirimlilik katsayılarının debi üzerindeki etkisi verilmiştir. Burada da etki doğru orantılıdır.

Tablo 7.17. Uygulanan basınç ile debideki değişim

Net uygulanan basınç, psi	*Debi, Litre/gün*
100	*147*
250	*368*
500	*738*

Tablo 7.18. Değişik membran geçirimlilik katsayılarının debi üzerindeki etkisi

Membran geçirimlilik katsayıları, gün^{-1}	*Debi, Litre/gün*
0.005	*36,83*
0.05	*368,3*
0.5	*3683*

Membran dizi konfigürasyonları:

Tahmini maksimum basınç değeri, tasarım esnasında belirlenir. Tipik akı değeri, spiral sargılı RO membranlar için 15-30 L/m^2.sa aralığında değişmektedir. Membran sistemleri, 3 paralel ünitenin yanında, birbirini takip eden 3 aşamalı 3 serili sistem şeklinde de boyutlandırılabilir. Aşama sayısı geri kazanım oranı ile değişebilir. Tek aşamalı sistemlerde, %50 civarında bir geri kazanım, iki aşamalı sistemlerde, %50-75 civarında bir geri kazanım ve üç aşamalı sistemlerde, %75-85 civarında bir geri kazanım mümkün olabilir.

Spiral sargılı sistemlerde, iki aşamalı ve her bir basınç kabında yedi membran elementinin olduğu bir sistem ile veya belli bir miktar konsantrenin başa geri devir ettirilmesi ile %75 geri kazanım sağlanabilir. İkinci veya üçüncü aşamadaki element sayısı, bir önceki aşamadakinin yarısı kadardır. Konsantre akımının aşamalı olarak arıtımı, geri kazanımı artırmak istendiğinde uygulanır. Çok iyi kalitede su elde edilmek isteniyor ise arıtılmış su akımı da aşamalı olarak ikinci veya üçüncü kez arıtılabilir. Bu tür sistemlere çok geçişli sistemler denir. Ancak membran sistemler genellikle iki geçişli olarak inşa edilirler. Bu tür sistemler, yüzey suyu arıtımında, çok iyi kalitede (boron ve TDS giderimi) arıtma istendiğinde, bakteri, protozoa ve organik madde gideriminin artırılması durumunda ve sistem güvenilirliğinin artırılmak istendiğinde kullanılır.

Çift geçişli sistemler genellikle deniz suyu arıtımında kullanılır. Arıtılmış su kalitesi zamanla azaldığı için, birinci aşamadan gelen suyu %10-25 oranında ikinci kademede arıtılıp, daha sonra birinci aşama çıkışı ile karıştırılır. İki geçişli sistemler ile çok iyi kalitedeki su, yüksek akı ve geri kazanım oranlarında elde edilebilmektedir. Deniz suyu arıtımında kısmi iki geçişli sistemin uygulanmasının nedeni, TDS ve yönetmeliklerle iyice kısıtlanmış olan borondur.

Akı dengesi:

Membran kabı içerisindeki ilk membranlar daha düşük TDS konsantrasyonu ve yüksek basınca maruz kaldıkları için buralardaki membranların geri kazanım oranı yüksektir. İkinci ve üçüncü aşamalardaki, basınç azalması da benzer şekilde membran performansında etkilidir. İkinci ve üçüncü aşamalardaki membran performansını artırma için akı dengesi uygulanır. Akı dengesi ile ilk aşamadaki akı değerinin azaltılması ve ikinci ve üçüncü aşamalardaki akının ise artırılması sağlanır. Akı dengesi iki şekilde sağlanabilmektedir. Birinci metotta, birinci aşamadan sonra arıtılmış su hattında geri basınç vanaları kullanılır. Geri basınç vanaları ile ilk aşamanın akısı azaltılır ve konsantre akımında daha fazla basınç oluşturulur. Bir diğer yöntem ise (daha çok büyük sistemlerde tercih edilmektedir.) aşamalar arasında pompa kullanılmasıdır. Bu şekilde ilk aşamaya daha düşük basınçlar uygulanır ve enerji kazanılır. Deniz suyu arıtımında, en sondaki konsantre hattı üzerine ayrıca enerji geri kazanım düzenekleri yerleştirilir. Bu şekilde geri kazanılan enerji, ikinci veya üçüncü aşamalarda kullanılır.

Problem 7.1

TÇM değeri 2000 mg/L olan bir kaynaktan içme suyu temin edilecektir. TÇM konsantrasyonu 250 mg/L'ye düşürebilmek için kullanılacak ters ozmoz (RO) sistemini aşağıdaki verileri kullanarak boyutlandırınız. Kütle dengesini kurunuz, membran alanını, hacmini, modül sayısını ve gerekli basınç tankı sayısını bulunuz.

Q= 10000 m^3/gün

Geri kazanım oranı $R = \%75$

Tuz giderim oranı $S = \%95$

Besleme suyu sıcaklığı=27 ^{0}C

Ham su TÇM $= 2000\ mg/L$

Arıtılmış su TÇM $= 250\ mg/L$

$Akı =\ 0{,}90\ m^3/m^2\ gün$

$Paketleme\ oranı = 800\ m^2/m^3$

$Modül\ hacmi = 0{,}02\ m^3$

Her bir basınç tankında 10 adet modül bulunmaktadır.

Çözüm.

Ters osmoz sistemi

$$C_E = \frac{C_0(1-S)}{R} = \frac{2000\ (1-0{,}95)}{0{,}75} = 133{,}3\ \ mg/L$$

Kütle dengesi (q_e):

$(Q - q_e)\ C_0 + q_E C_E = QC$

$(10000 - q_e)\ 2000 + q_E 133{,}3 = 10000 * 250$

$q_e = 9374{,}8 \sim 9375\ \ m^3/gün$

RO sistemine beslenen su debisi (q_F):

$$q_F = \frac{q_E}{R} = \frac{9375}{0{,}75} = 12500\, m^3/gün$$

Konsantre debisi (q_B):

$q_E = (q_F - q_E) = 12500 - 9375 = 3125\, m^3/gün$

Konsantre TÇM konsantrasyonu (C_B):

$$C_B = \frac{0{,}95 * 2000}{1 - 0{,}75} = 7600\ \ mg/L$$

Toplam ham su debisi (Q_0):

$Q_0 = q_F + (1000 - q_E) = 12500 + (10000 - 9375) = 13125\ \ m^3/gün$

RO membran alanı (A):

$$A = \frac{q_E}{akı\ (J)} = \frac{9375\ \ m^3/gün}{0{,}90\ m^3/m^2\ gün} = 10417\ m^2$$

RO membran Hacmi (V):

$$V = \frac{10417\ m^2}{800\ m^2/m^3} = 13\ m^3$$

Modül Sayısı (n):

$$n = \frac{13\ m^3}{0{,}02\ m^3} = 651\ modül$$

Basınç Tankı (N):

$$V = \frac{651\ modül}{10\ modül\ (basıç\ tankı)} = 65{,}1 \rightarrow 66\ adet\ basınç\ tankı$$

7.5.3. Kimyasal Oksidasyon

Kimyasal oksidasyon ile atıksulardaki kirleticiler kararlı son ürünlere veya daha kolay ayrışabilen veya adsorpsiyon ile uzaklaştırılabilen ara ürünlere dönüştürülürler. Başlıca oksitleyiciler klor, ozon, hidrojen peroksit ve potasyum permanganattır. Kimyasal oksidasyon hızı, pH ve katalizatör varlığına bağlı olarak değişim gösterir.

7.5.3.1.Ozonlama

Ozon normal sıcaklık ve basınçta gaz halindedir. Ozonun suda çözünürlüğü, sıcaklığa, ozonun gaz fazındaki kısmi basıncına ve pH'a bağlıdır. Ozon, kararsız olup kendi kendine bozunma hızı; sıcaklık ve pH'a bağlıdır. Bozunma; OH^- iyonu, O_3'un radikal bozunma ürünleri, çözünen organik maddelerin bozunma ürünleri, katı alkaliler, geçiş metalleri, metal oksitler ve karbon gibi maddelerin varlığı ile katalizlenir. Pratik olarak, doymuş hidrokarbonların ve halojenli alifatik maddeler gibi reaktif olmayan maddelerin tam parçalanması sadece O_3 ile mümkün olmaz. Ozon ses dalgaları (ultrason) veya ultraviyole gibi harici bir enerji kaynağı ile birlikte kullanıldığında refraktör (biyolojik ayrışmaya dirençli veya kararlı) maddelerin parçalanması da sağlanır.

Organik maddelerin ozonla oksidasyon mekanizması şöyledir:

1. Alkollerin aldehitlere ve daha sonra organik asitlere oksidasyonu:

$$RCH_2OH \xrightarrow{Ozon} RCOOH \qquad (7.2)$$

2. Oksijen atomunun aromatik halkaya girmesi
3. Karbon çift bağının açılması

Ozon, yüksek voltaj altında kuru havadan veya saf oksijenden elde edilir. Teorik olarak 1 kW-saat elektrik enerjisi ile 1058 gram ozon üretilebilir, pratikte ise bu değer ancak 150 g/kW-sa civarındadır.

Ozonlama; dezenfeksiyon, renk ve bakiye kararlı organik madde gideriminde kullanılır. Ozonlama sonucu kararlı (biyobozunmaya dirençli) organikler daha kolay parçalanan organiklere dönüşeceğinden, ozonlama çıkışındaki suyun BOİ'si girişe kıyasla daha yüksek olabilir (Tablo 7.19).

Ultraviyole (UV), ozon molekülleri ve organik maddeleri aktive ederek organik madde giderimini arttırır. Bu yolla pestisitlerin CO_2 ve H_2O'ya parçalanması bile mümkün olmaktadır.

Tablo 7.19. Aktif çamur son çökeltim tankı çıkış sularında ozonlama sonuçları [8]

Parametre	*F/ M=0,15, gün^{-1}*		*F/ M=0,60 gün^{-1}*	
*Ozon temas süresi (dk)**	*0*	*60*	*0*	*60*
BOİ, mg/L	*27*	*22*	*97*	*212*
KOİ, mg/L	*600*	*154*	*1100*	*802*
pH	*7,1*	*8,3*	*7,1*	*7,6*
Org-N, mg/L	*25.2*	*18.9*	*40*	*33*
NH_3-N, mg/L	*3,0*	*5,8*	*23*	*25*
Renk (Pt-Co)	*3790*	*30,0*	*5000*	*330*

(*) 155 mg O_3/dk yükleme

7.5.3.2.Hidrojen Peroksit ile Oksidasyon

Hidrojen peroksit demir katalizörlü ortamda $^{\bullet}OH$ (hidroksil) radikali oluşturur. Hidroksil radikali de, ozon gibi, organik maddelerle aşağıdaki gibi reaksiyona girer:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} \quad (7.3)$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + {}^{\bullet}O_2H + H^+ \quad (7.4)$$

$$^{\bullet}OH + RH \rightarrow R^{\bullet} + H_2O \quad (7.5)$$

$$R^{\bullet} + H_2O_2 \rightarrow ROH + {}^{\bullet}OH \quad (7.6)$$

$$^{\bullet}OH + Fe^{2+} \rightarrow OH^- + Fe^{2+} \quad (7.7)$$

H_2O_2 sülfür oksidasyonundan kullanılır: Reaksiyon süresi pH ve katalizör olup olmamasına göre büyük değişim gösterir.

Asidik veya nötr pH'da, katalizör olmadığında reaksiyon süresi 15-45 dakikadır:

$$H_2O_2 + H_2S \rightarrow 2\ H_2O + S^0 \quad (7.8)$$

Fe^{+2} katalizörlüğünde pH=6,0-7,5 aralığındaki reaksiyon süresi ise 1-2 saniyedir.

Bazik pH aralığında katalizör olmaksızın reaksiyon süresi 15 dakika civarındadır:

$$4\ H_2O_2 + S^{2-} \rightarrow {SO_4}^{2-} + 4\ H_2O \quad (7.9)$$

Hidrojen peroksit ile siyanür oksidasyonu aşağıdaki şekilde gerçekleşir:

$$CN^- + H_2O_2 \rightarrow CNO^- + H_2O \quad (7.10)$$

$$CNO^- + CHO^- + H_2O \rightarrow {CO_3}^{2-} + NH_3 \quad (7.11)$$

Toksik atıksuların hidrojen peroksitle oksidasyonunda toksisite ile birlikte organik madde miktarı da azalır. Bu konuda gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bazı tipik sonuçlar Tablo 7.20'de verilmiştir.

Tablo 7.20. Konsantre Atıksuların Katalizli Hidrojen Peroksit Oksidasyonu [8]

Örnek	***TOK (mg/L)***	***KOİ (mg/L)***	***BOİ (mg/L)***	***LC_{50}***
Atıksu 1				
H_2O_2 oksidasyonu öncesi	*92*	*301*	*135*	*16,3*
H_2O_2 oksidasyonu sonrası	*52*	*184*	*57*	*29,7*
Giderim,%	*43,4*	*38,9*	*57,8*	-
Atıksu 2				
H_2O_2 oksidasyonu öncesi	*2150*	*2040*	*300*	*2,4*
H_2O_2 oksidasyonu sonrası	*95*	*850*	*42*	*3,0*
Giderim,%	*95,5*	*58,3*	*86*	-

Arıtım verimi hidrojen peroksitin kabul edilebilir bir yan ürün oluşturma derecesine bağlıdır (7.12):

$$f = \frac{H_2O_2}{HPD_L} \quad (7.12)$$

Burada:

f : Nihai H_2O_2 ihtiyacı oranı,
H_2O_2 : Kullanılan (reaksiyonda tüketilen) hidrojen peroksit, mg/L
HPD_L : 2,13 ∗ başlangıç KOİ (H_2O_2 ile oksitlenebilir organik madde miktarı), mg/L

Hidrojen peroksit UV ile kombine olarak asetat, organik asit ve parlayıcı-patlayıcı maddelerin oksidasyonunda uygulanmış ve UV'nin oksidasyon hızını arttırdığı görülmüştür.

7.5.4. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, bir fazdaki çözünenin (adsorbat) diğer bir fazın (adsorbent) yüzeyinde birikmesidir. Birbirine geçiş yapılan fazlar; katı, sıvı veya gaz olabilse de, birikme gerçekleşen yüzey genellikle katı fazdır. Katı-sıvı faz sisteminde pozitif adsorpsiyon, çözünenin çözeltiden giderimi ile sonuçlanır ve adsorpsiyon prosesi, söz konusu çözünenin katı yüzeyindeki konsantrasyonu ile çözeltideki konsantrasyonun dinamik dengesine ulaşılana kadar sürer.

Çözünenin bu iki fazdaki dağılımının en yaygın ifadesi, sabit sıcaklıkta konsantrasyonun (C) bir fonksiyonu olarak q_e ile sembolize edilir ve bu ifade katı adsorbentin kütlesi başına adsorplanan çözücünün kütlesi olarak tanımlanır. C ile q_e arasındaki bu ilişki, adsorpsiyon izotermi olarak adlandırılmaktadır. Adsorpsiyon izoterminin amacı, adsorbentin kapasitesini tayin etmektir. Genel olarak, adsorbent kütlesi başına adsorplanan çözünenin miktarı, artan konsantrasyonla doğru orantılı olsa da, bu ilişki lineer değildir. Adsorpsiyon izotermlerinden yaygın olarak bilinenler tek katmanlı adsorpsiyon izotermleri olarak Freundlich, Langmuir, çok katmanlı adsorpsiyon izotermi olarak ise BET (Brunauer, Emmet, Teller) sıralanabilmektedir.

Adsorpsiyonda hız belirleyici adım, tane difüzyonu veya film difüzyonu olabilmektedir. Film difüzyonu, çözünenin, adsorbentin dış yüzeyinde bulunan yüzey tabakasını aşabilme kabiliyetidir. Çözünenin adsorbentin porları içerisinde difüzyonu olayına ise tane difüzyonu denilmektedir. Karışımın iyi olduğu kesikli reaktörlerde tane difüzyonu hız belirleyici adım iken, sürekli akışlı reaktörlerde hızı belirleyen kritik adım, film difüzyonu olmaktadır.

Adsorpsiyon prosesi, atıksu ve içme suyu arıtımında, klasik yöntemlerle giderilemeyen türden (özellikle kararlı organik bileşikler) kirleticilerin tutulması için sıklıkla kullanılmaktadır.

Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

Adsorbatın Yapısı: Çözünenin sudaki çözünürlüğü, adsorpsiyon dengesini etkileyen önemli bir faktördür. Genel olarak, adsorbatın çözünürlüğü ile adsorpsiyon arasında ters bir ilişki olduğu düşünülmektedir (Lundelius Kuralı). Yani, bir adsorbat, suda ne kadar iyi çözülürse, katı faza adsorpsiyonu o kadar kötü olacaktır.

Bir organik bileşiğin zincir uzunluğu arttıkça (hidrokarbonluk) sudaki çözünürlüğü azalacak, dolayısıyla adsorpsiyon miktarı artacaktır (Traube Kuralı). Ayrıca, aktif karbon gibi porlu adsorbentlerde moleküler büyüklük oldukça önem teşkil etmektedir. Genellikle adsorpsiyon prosesi, aynı sınıfa ait daha küçük molekülde büyük moleküle oranla daha hızlı gerçekleşecektir.

Molekül geometrisi, denge durumunda zincir uzunluğu etkisine kıyasla adsorpsiyonda daha az etkiye sahiptir. Halkalı bileşiklerde fonksiyonel grubun yerinin adsorpsiyon gücüne etki ettiği gözlemlenmiş olup, bu gücün azalan sırayla orto>para>meta olduğu tespit edilmiştir.

İyonlaşmanın adsorpsiyona etkisi, araştırılan bir diğer unsurdur. Aktif karbonun genellikle net negatif yüzey yüküne sahip olmasının önem teşkil ettiği, belirli bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyonlaşma sonucu önemli değişikliklere uğradığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, yüklü türlerin minimum, nötral türlerin maksimum adsorpsiyona sahip olduğuna vurgu yapılmaktadır. Bunun yanı sıra bir bileşik ne kadar kompleks hale gelirse, iyonlaşmanın etkisi de o kadar azalmaktadır.

Adsorbentin Yapısı: Adsorbentin fizikokimyasal yapısının adsorpsiyonun hem hızı hem de kapasitesine önemli etkisi olduğu düşünülmektedir. Örneğin, aktif karbon üzerinde yüzyılı aşkın çalışmalar yapılmasına rağmen, yüzey fonksiyonel grupları hakkında hala oldukça az

bilgi bulunmaktadır. Bu fonksiyonel grupların yapısı, adsorpsiyona olumlu/olumsuz katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca adsorbentin por yapısı, uygun adsorpsiyon bölgelerinin kullanılabilirliği hakkında fikir vermektedir. Genel olarak makropor sistemi mikropor ve mezopora oranla toplam yüzey alanına ve adsorptif kapasiteye çok az katkı sağlamaktadır.

Yüzey Alanı: Adsorpsiyon, spesifik (özgül) yüzey alanıyla doğru orantılı olup; spesifik yüzey alanı, toplam yüzey alanının adsorpsiyona uygun kısmı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, adsorbent ne kadar ince ve porlu bir yapıda ise adsorbentin ağırlığı başına düşen adsorbat miktarı daha yüksek olacaktır. Porlu yapıya sahip olmayan bir adsorbent için adsorpsiyon kapasitesi partikül çapıyla ters orantılı iken, yüksek derecede porlu yapıdaki adsorbentin adsorpsiyonu göreceli olarak partikül çapından bağımsız olmalıdır.

pH: Adsorpsiyonun gerçekleştiği bir çözeltinin pH'ı, hidrojen ve hidroksil iyonları oldukça iyi adsorplandığından, adsorpsiyonun kapasitesini etkileyecektir. Ayrıca, çözelti pH'ı asidik veya bazik bir adsorbatın iyonlaşmasını da etkiler.

Genellikle tipik organik kirleticilerin adsorpsiyonu azalan pH ile artmaktadır. Bu olay, karbon yüzeyindeki negatif yüklerin hidrojen iyonu tarafından nötralize edilmesi ve karbonun uygun yüzey alanının artmasıyla ilişkilidir.

Sıcaklık: Adsorpsiyon reaksiyonları genellikle ekzotermiktir; bu nedenle adsorpsiyon olayı azalan sıcaklıkla artmaktadır. Sıcaklıktaki küçük değişimler adsorpsiyon prosesine önemli ölçüde etki etmemektedir.

Birden Çok Adsorbatın Bulunması: Su ve atıksu arıtımında adsorpsiyon uygulamasında, tek bir bileşik yerine genellikle birden çok bileşiğin bulunduğu karışım halindeki çözelti durumu söz konusudur. Bu bileşikler, ortak adsorpsiyonu geliştirebilir, birbirleriyle bağımsız hareket edebilir veya birbirlerine girişim yapabilirler. Yapılan çalışmalar, karışım halindeki çözeltilerde bir bileşiğin bir şekilde diğeriyle yarıştığını göstermektedir. Bu karşılıklı inhibisyon, adsorbe olan moleküllerin birbirlerine kıyasla molekül büyüklükleri, adsorbatların göreceli adsorptif ilgisi veya göreceli konsantrasyonlarıyla ile ilgili olabilir.

Atıksuların çoğu oldukça kompleks yapıda olup içerdikleri maddelerin adsorplanma kapasiteleri farklıdır. Kirleticilerin moleküler yapı, çözünürlük gibi özellikler adsorplanma kapasitesini etkiler. Çözünmüş maddenin çözünürlüğü arttıkça adsorplanabilirliği azalır. Dallı zincirli yapılar, düz zincirli yapılara kıyasla daha kolay adsorplanabilir, zincir (boyu) uzadıkça çözünürlük azalır. Adsorplanmayı etkileyen bazı gruplar ve etkileme tarzları Tablo 7.21'de verilmiştir.

Tablo 7.21. Moleküler yapı ve diğer faktörlerin adsorplanma kapasitesine etkisi [8]

İlgili grup	*Etkileme tarzı*
Hidroksil	*Genellikle adsorplanmayı azaltır, azalmanın derecesi ana molekülün yapısına bağlıdır*
Amino	*Etki hidroksile kıyasla biraz daha fazladır.*
Karbonil	*Etki karbonil grubunun bağlı olduğu ana maddeye göre değişir.*
	Glioksilik asit asetik asitten daha kolay adsorplanır, fakat daha yüksek yağ asitleri durumunda benzer durum görülmez.
Çifte bağ	*Karbonilde olduğu gibi değişken etkiler söz konusudur.*
Halojenler	*Değişken etki*
Sulfonik	*Genellikle adsorplanmayı düşürür.*
Nitro	*Adsorplanmayı arttırır.*

Kuvvetli iyonize çözeltiler zayıf iyonize olanlar kadar kolay adsorplanmazlar.
Büyük moleküller küçüklere kıyasla daha kolay tutunabilirler.
Düşük polariteli moleküller yüksek polaritedekilere kıyasla daha kolay tutunabilirler

7.5.4.1.Adsorpsiyonun Formülasyonu

Pratik uygulamalarda Freundlich izotermi kullanılır:

$$q_e = \frac{X}{m} = K_f C^{1/n} \tag{7.13}$$

Burada:

q_e : X/m, özgül tutulma, mg adsorbat/g adsorbent
X : adsorplanan maddenin (adsorbat) ağırlığı, mg
m : adsorbentin ağırlığı, g
C_e : çözeltide kalan madde (adsorbat) konsantrasyonu, mg/L
K_f, n : sıcaklık, adsorbent ve adsorplanacak maddeye (adsorbat) bağlı sabitler

Freundlich izotermindeki sabitler (K_f: kapasite faktörü, 1/n: şiddet parametresi) (7.13) denklemi lineerleştirilip ve C_e'ye karşı X/m grafiği çizilerek bulunur.

$$log \frac{X}{m} = log\, K_f + \frac{1}{n} log\, C_e \tag{7.14}$$

Çeşitli öncelikli kirleticiler için kontrol pH'da belirlenmiş K_f ve 1/n değerleri Tablo 7.22'de verilmiştir [1].

Tablo 7.22. Seçilen organik bileşikler için Freundlich adsorpsiyon izoterm sabitleri

Bileşik	*pH*	*K_f (mg/g)(L/ mg)$^{1/n}$*	*1/n*
Benzen	*5,3*	*1.0*	*1,6-2,9*
Bromoform	*5,3*	*19,6*	*0,52*
Karbon tetraklorür	*5,3*	*11*	*0,83*
Klorobenzen	*7,4*	*91*	*0,99*
Kloroetan	*5,3*	*0,59*	*0,95*
Kloroform	*5,3*	*2,6*	*0,73*
DDT	*5,3*	*322*	*0,5*
Dibromoklorometan	*5,3*	*4,8*	*0,34*
Diklorobromometan	*5,3*	*7,9*	*0,61*
1,2 dikloroetan	*5,3*	*3,6*	*0,83*
Etilbenzen	*7,3*	*53*	*0,79*
Heptaklor	*5,3*	*1,22*	*0,95*
Hekzakloroetan	*5,3*	*96,5*	*0,38*
Metilen klorür	*5,3*	*1,3*	*1,16*
N- dimetilnitrozamin	-	*$6{,}8*10^{-5}$*	*6,60*
N- nitrozodi-n-propilamin	-	*24*	*0,26*
N- nitrozodifenilamin	*3-9*	*220*	*0,37*
PCB	*5,3*	*14,1*	*1,03*
PCB 1221	*5,3*	*242*	*0,70*
PCB 1232	*5,3*	*630*	*0,73*
Fenol	*3-9*	*21*	*0,54*
Tetrakloroetilen	*5,3*	*51*	*0,56*
Toluen	*5,3*	*26,1*	*0,44*
1,1,1 trikloroetan	*5,3*	*2-2,48*	*0,34*
Trikloroetilen	*5,3*	*28*	*0,62*

Problem 7.2

Aktif karbon adsorpsiyonu verilerinin analizi. Aşağıdaki GAK (Granüler aktif karbon) test verileri için Freundlich ve Langmuir İzoterm sabitlerini belirleyiniz. Kesikli sistemde kullanılan sıvı hacmi 1 L'dir. Çözeltideki adsorbatın başlangıç konsantrasyonu 3,37 mg/L'dir. Denge, 7 gün sonra gözlenmiştir.

Tablo a. *Adsorbent kütlesi ve adsorbatın çözeltideki denge konsantrasyonu*

GAK Kütlesi, m, g	Adsorbatın çözeltideki denge konsantrasyonu Ce, mg/L
0.0	3,37
0,001	3,27
0,010	2,77
0,100	1,86
0,500	1,33

Çözüm.

Kesikli adsorpsiyon test verileri kullanılarak Freundlich ve Langmuir Adsorpsiyon İzotermlerini çizmek için gereken değerler elde edilir.

Tablo b. *İzoterm grafikleri için veriler*

Adsorbat konsantrasyonu, mg/L					
C_0	C_e	$C_0 - C_e$ C_e	m, g	X/m*, mg/g	C_e/(X/m)
3,37	3,37	0,00	0,000	-	-
3,37	3,27	0,10	0,001	100	0,0327
3,37	2,77	0,60	0,010	60	0,0462
3,37	1,86	1,51	0,100	15,1	0,1232
3,37	1,33	2,04	0,500	4,08	0,3260

$* \; q_e = \frac{X}{m} = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m}$

1. *Freundlich ve Langmuir Adsorpsiyon İzotermleri, ilk adımda belirlenen veriler kullanılarak çizilir.*

Şekil a. *Freundlich İzoterm Grafiği*

Logaritmik düzlemde log X/m değerlerine karşılık log C_e grafiği çizildiğinde grafiğin y eksenini kestiği nokta K_f değerini, eğimi ise 1/n değerini verir. Buradan K_f değeri 1,55 ve 1/n değeri 0,28 olarak bulunur.

log K_f = 0,1908 → K_f = 1,55

1/n = 3,558 → n=0.28 bulunur.

$$\frac{X}{m} = 1{,}55\, C_e^{0{,}28}$$

Langmuir izoterminin grafiği eğrisel (non-lineer) olduğu için, Langmuir adsorpsiyon izoterminin kullanımı uygun değildir.

Şekil b. *Langmuir İzorterm Grafiği*

Problem 7.3

Bir atıksuyu arıtmak için gereken aktif karbon miktarı

Çıkıştaki klorlama neticesinde oluşan kloroform konsantrasyonu 0,12 mg/L'dir. 4000 m^3/gün'lük çıkış debisinde kloroform konsantrasyonunu 0,05 mg/L'ye düşürebilmek için ne kadar toz aktif karbona gerek duyulmaktadır? Kloroform için Freundlich adsorpsiyon izoterm sabitleri şu şekildedir: K_f = 2,6 ve 1/n = 0,73.

Çözüm.

1. *V /m ifadesini elde etmek için Denklem (7.13) şu şekilde düzenlenir:*

$$q_e = \frac{X}{m} = kC^{1/n}$$

$$q_e = -\frac{V}{m}(C_e - C_0)$$

$$-\frac{V}{m} = \frac{k_f {C_e}^{1/n}}{(C_e - C_0)}$$

2. *İzoterm sabitlerini yerine koyarak m/V ifadesi çözülür:*

$$-\frac{V}{m} = \frac{k_f C_e^{\frac{1}{n}}}{(C_e - C_0)} = \frac{2.6\ (0{,}5)^{0{,}73}}{(0{,}05 - 0{,}12)} = -4{,}17\ L/g$$

m/V = 1/4,17 = 0,24 g/L

3. *4000 m^3/gün'lük debiyi arıtmak için gereken karbon miktarı bulunur:*

$$\text{Gereken PAC} = \frac{(0{,}24\ g/L)(4000\frac{m^3}{gün})(1000\frac{L}{m^3})}{1000\ g/kg} = 960\ kg/gün$$

7.5.4.2.Karışımın Adsorpsiyonu

Bir karışımda her bir maddenin adsorplanma kapasitesi tek bir maddenin adsorplanma kapasitesinden düşüktür ancak adsorbantın adsorplama kapasitesi, tek bir madde olması durumuna göre daha yüksektir. Adsorplama kapasitesi; kirleticilerin molekül büyüklüğü, adsorplanma eğilimleri ve konsantrasyonlarına bağlıdır. Endüstriyel uygulamalarda 1 saatin altındaki temas süreleri kullanılır. Adsorpsiyon hızı aktif karbon dozu ile artar.

7.5.4.3.Aktif Karbon Adsorpsiyonu Kinetiği

Atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan granüler ve toz aktif karbon (GAC ve PAC) kinetiği aşağıda özetlenmiştir.

Kütle Transfer Bölgesi (MTZ): Granüler aktif karbon yatağının sorpsiyonun gerçekleştiği kısmı kütle transfer bölgesi olarak adlandırılır (Şekil 7.9). MTZ çıkışında, kolondan geçen akışkandaki hedef kirletici konsantrasyonu minimum seviyeye düşer. Bu bölge dışındaki kısımda pratik olarak adsorpsiyon olmadığı kabul edilir. GAC filtresi (kolonu) çıkışındaki hedef kirletici (madde) konsantrasyonu, giriş konsantrasyonunun (C_0) %5'ine düştüğünde kırılma uygulaması durumunun gerçekleştiği kabul edilir. MTZ uzunluğu uygulanan hidrolik yük (m^3/m^2.dk) ve aktif karbon karakteristiklerine bağlıdır.

Şekil 7.9. Çıkan hacimle birlikte MTZ'nin gösterildiği tipik bir aktif karbon doyma eğrisi

Atıksu içindeki adsorplanamayan ve biyobozunur olmayan unsurların kırılma/doygunluk eğrilerini nasıl etkilediği Şekil 7.10'da görülmektedir.

Şekil 7.10. Adsorplanabilir, adsorplanamaz ve biyobozunur organik bileşenlerin aktif karbon kırılma grafiğinin üzerinde etkisi

Kütle transfer bölgesi veya etkili yatak (filtre) yüksekliği, H (cm) MTZ aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir [9].

$$H_{MTZ} = z\left[\frac{V_E - V_B}{V_E - 0{,}5(V_E - V_B)}\right] \tag{7.15}$$

Burada,

z : adsorpsiyon kolonu (yatağı) yüksekliği, m
V_E : doygun durumda (C/ $C_0 \approx 0{,}95$) kolondan geçen su miktarı, m^3
V_B : kırılma durumunda (C/ $C_0 \approx 0{,}05$) kolondan geçen su miktarı, m^3

dır. Kırılma eğrisi üzerindeki alan, kolondaki GAC üzerinde tutulan adsorbat madde miktarını verir.

Pratikte aktif karbon kolonlarının en alt kısmının adsorpsiyon kapasitesini kullanabilmenin en iyi yolu, iki veya daha fazla sayıda kolonun seri olarak işletilmesidir. Optimum debi, yatak yüksekliği ve aktif karbon malzemenin işletme kapasitesi dinamik kolon testleriyle belirlenir.

Aktif karbon adsorpsiyon kapasitesi: Kullanılacak aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi izoterm test verilerinin analiziyle belirlenir. $log\,(X/m) - log\,C_e$ grafiğinde $C_e = C_0$ 'a karşı gelen X/m değeri adsorpsiyon kapasitesine ($q_e = \frac{X}{m}$) karşı gelir.

Kırılma noktası (durumu) adsorpsiyon kapasitesi: GAC kolonunun kırılma durumu adsorpsiyon kapasitesi, $q_e = (X/m)_b$, teorik kapasitenin %25-50'sine karşı gelen $(X/m)_b$ değeri, küçük ölçekli kolon testleriyle belirlenebilir. $q_e = (X/m)_b$ bilindiğinde, kırılma noktası (durumu)'na kadar geçen süre, aşağıdaki denklemden t_b çözülerek bulunabilir, (1):

$$\left(\frac{X}{m}\right)_b = \frac{X_b}{m_{GAC}} = Q\left(C_0 - \frac{C_b}{2}\right)\frac{t_b}{m_{GAC}} \tag{7.16}$$

Burada,

$(X/m)_b$: arazi şartlarındaki kırılma noktası adsorpsiyon kapasitesini, g/g
X_b : kırılma noktasında (anında) GAC'da adsorblanan adsorbat miktarını, g
m_{GAC} : kolondaki GAC ağırlığını, g
Q : kolondan geçirilen akışkan debisini, m^3/gün
C_0 : girişteki organik madde konsantrasyonunu, g/m^3
C_b : kırılma anındaki organik madde konsantrasyonunu, g/m^3
t_b : kırılma anına kadar geçen süreyi, gün

gösterir. Bu denklem yeniden düzenlenerek t_b için;

$$t_b = \frac{\left(\frac{X}{m}\right)_{GAC}}{Q(C_0 - \frac{C_b}{2})} \tag{7.17}$$

elde edilir.

GAC Temas Reaktörü Tasarımı

GAC temas reaktörü tasarımında başlıca 4 faktör dikkate alınır: Temas süresi, hidrolik yük, kolon (yatak) derinliği ve kolon sayısı. GAC temas reaktörlerinin tasarım kriterleri Tablo 7.23'te GAC tipik özellikleri ise Tablo 7.24'te özetlenmiştir. GAC kolonu adsorpsiyonunda kırılma süresi tahmini ise aşağıdaki problemde açıklanmıştır [1].

Tablo 7.23. GAC temas reaktörlerine ait tipik tasarım değerleri

Parametre	*Sembol*	*Birim*	*Değer*
Hacimsel debi	V	m^3/sa	*50-400*
Yatak hacmi	V_b	m^3	*10-50*
Kesitsel alan	A_b	m^2	*5-30*
Uzunluk	D	m	*1,8-4*
Kullanılamayan fraksiyon	α	m^3/m^3	*0,38-0,42*
GAC yoğunluğu	ρ	kg/m^3	*350-550*
Yaklaşık hız	V_f	m/sa	*5-15*
Etkin temas süresi	t	*dk*	*2-10*
Boş yatak temas süresi	*EBCT*	*dk*	*5-30*
İşletim süresi	t	*gün*	*100-600*
Çıktı hacmi	V_L	m^3	*10-100*
Spesifik çıktı	V_{sp}	m^3/kg	*50-200*
Yatak hacimleri	*BV*	m^3/m^3	*2000-20000*

Tablo 7.24. GAC tipik özellikleri

Parametre	*Birim*	*Değer*
Toplam yüzey alanı	m^2/g	*700-1300*[a]
Yığın hacmi	kg/m^3	*400-440*[a]
Partükül yoğunluğu, suda ıslatılmış	*kg/L*	*1,3-1,5*[a]
Etkin boyut	*mm*	*0,8-0,9*[a]
Üniformluk sabiti	*UC*	*≤ 1.9*
Ortalama partikül çapı	*mm*	*1,5 – 1,7*
İyot numarası		*850 dk*
Aşınma numarası		*70 dk*
Kül	*%*	*maks. 8*
Nem	*%*	*maks.4-6*

[a] *Karbon için kaynak materyaline bağlıdır.*

Problem 7.4

Aktif karbon adsorpsiyonu kırılma zamanının belirlenmesi. Sabit yataklı aktif karbon adsorplayıcısı, hızlı kütle transfer oranına sahiptir ve kütle transfer bölgesi temelde keskin bir dalga cephesidir. Aşağıdaki verilerin uygulandığını varsayarak, 1000 L/dk'lık bir debiyi arıtmak için gereken karbon ihtiyacını ve yatak ömrünü belirleyiniz.

1. *Bileşik: Trikloroetilen (TCE)*
2. *Başlangıç konsantrasyonu, C_0 = 1 mg/L*
3. *Son konsantrasyon, C_s = 0,005 mg/L*
4. *GAC yoğunluğu = 450 g/L*
5. *Freundlich kapasite faktörü K_f = 28 (mg/g)(L/mg)$^{1/n}$*
6. *Freundlich yoğunluk parametresi, 1/n = 0.62*
7. *Boş yatak temas süresi, EBCT = 10 dk*

Çözüm.

1. *Toluen için GAC kullanım oranı tahmin edilir. GAC kullanım oranı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.*

$$\frac{m_{GAC}}{Q\ t} = \frac{C_0 - C_e}{q_e} = \frac{C_0 - C_e}{K_f {C_0}^{1/n}} = \frac{(1{,}0\ mg/L)}{28\left(\frac{mg}{g}\right)(\frac{L}{mg})^{0{,}62}(1{,}0\frac{mg}{L})^{0{,}62}} = 0{,}036\ g\ GAC/L$$

2. *10 dakikalık EBCT için gereken karbon ağırlığı belirlenir.*

$$Yataktaki\ GAC\ ağırlığı\ = Vb\ \rho GAC\ = EBCT\ Q\ \rho GAC$$

$$Gereken\ karbon\ = 10\ min\ (1000\ L/min)\ (450\ g/L)\ = 4{,}5 * 106\ g$$

3. *10 dk EBCT kullanılarak arıtılan su hacmi belirlenir.*

$$Arıtılan\ su\ hacmi\ = \frac{Verilen\ EBCT'nin\ GAC\ kütlesi}{GAC\ kullanım\ hızı}$$

$$Arıtılan\ su\ hacmi\ = \frac{4{,}5 * 10^6}{0{,}036\ g\ GAC/L} = \ 1{,}26\ x\ 10^8\ L$$

4. *Yatak ömrü belirlenir.*

$$Yatak\ ömrü\ = \frac{Verilen\ EBCT\ için\ arıtılan\ su\ hacmi}{Q}$$

$$Yatak\ ömrü = \frac{1{,}26 * 10^8 L}{1000 L/dk\ \ * 1440\ dk/gün}$$

***Not**: Bu örnekte, iki kolonun seri bağlı şekilde kullanılacağı varsayımına dayanılarak, temas tankındaki karbon tam kapasite ile kullanılmıştır. Eğer tek kolon kullanılmış olsaydı, yatak ömrüne ulaşmak için kırılma eğrisi kullanılmalıydı. Kolondaki biyolojik aktivite ihmal edilmiştir.*

Toz Aktif Karbon (PAC) Temas Reaktörü Tasarımı ve Analizi

Toz aktif karbon uygulamasında, aşağıda açıklandığı üzere, eklenmesi gereken karbon miktarını yaklaşık olarak tahmini için izoterm adsorpsiyon verileriyle birlikte kütle dengesi analizi kullanılabilir. Burada, olaya bilinmeyen birçok etkenin dahil olmasından dolayı, gerekli tasarım verilerini elde etmek için kolon ve laboratuvar ölçekli testler önerilmektedir.

Dengeye ulaşıldıktan sonra temas tankı civarında kütle dengesi yazılırsa (örneğin kesikli reaktör), son ifade şöyle olacaktır:

Şekil 7.11. Kesikli bir reaktörde adsorpsiyon

Adsorbe olan miktar = Başlangıçtaki adsorbat miktarı – Sondaki adsorbat miktarı

$$q_e\, m\ =\ V\, C_0 - V\, C_e \tag{7.18}$$

Burada,

q_e : dengeden sonraki adsorbent fazındaki konsantrasyon, mg adsorbat/g adsorbent
m : adsorbent kütlesi, g
V : reaktördeki su hacmi, L
C_0 : adsorbatın başlangıç konsantrasyonu, mg/L
C_e : Adsorpsiyon meydana geldikten sonra adsorbatın son denge konsantrasyonu, mg/L

q_e'nin C ile dengede olduğuna dikkat edilmelidir. Eğer Denklem (7.30) q_e için çözülürse, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$q_e = \frac{V\,(C_0 - C_e)}{m} \tag{7.19}$$

Denklem (7.30) tekrardan düzenlenirse,

$$\frac{V}{m} = \frac{q_e}{C_0 - C_e} \tag{7.20}$$

olur.

V /m terimi özgül hacim olarak tanımlanmıştır ve verilen karbon miktarı ile arıtılabilecek su hacmini temsil etmektedir. Özgül hacmin grafiksel olarak gösterimi aşağıdadır. Özgül hacme karşılık gelen değer, kullanılması gereken adsorbent dozu olur.

Şekil 7.12. Özgül hacmin grafiksel gösterimi

Problem 7.5

Toz aktif karbon (PAC) için doz ve maliyet tahmini

1000 L/dk debili arıtılmış atıksu, 5 mg/L TOK değerine sahip olduğu ölçülen kalıntı organiklerin konsantrasyonunu 1 mg/L değerine getirmek için PAC ile arıtılacaktır. Freundlich adsorpsiyon parametreleri daha önceden bulunmuştur. Aşağıdaki verilerin geçerli olduğunu varsayarak, söz konusu atıksu debisini arıtmak için gerekli PAC ihtiyacını belirleyiniz. Eğer PAC maliyeti \$0,5/kg ise, PAC'un rejenere edilmeyeceği varsayımıyla yıllık arıtma maliyetini hesaplayınız.

Bileşik = karışık organikler

1. *Başlangıç konsantrasyonu, C_0 = 5,0 mg/L*
2. *Son konsantrasyon, C_e = 1,0 mg/L*
3. *PAC yoğunluğu = 450 g/L*
4. *Freundlich kapasite faktörü, K_f = 150 (mg/g)(L/mg)$^{1/n}$*
5. *Freundlich yoğunluk parametresi, 1/n=0,5*

Çözüm.

İzoterm verisi temel alınarak PAC dozunu belirlenir. PAC dozu, Denklem (7.30) farklı şekilde yazılarak bulunabilir.

$$\frac{m}{V} = \frac{C_0 - C_e}{q_e}$$

q_e *için Denklem (7.13) çekip, verilen değerleri yerine yazarsak,*

$$\frac{m}{V} = \frac{[(5-1\ mg/L)]}{150\frac{mg}{g}(\frac{L}{mg})^{0,5}(1,0\frac{L}{mg})^{0,5}} = 0,0267\ g/L$$

PAC arıtımı için yıllık maliyetin hesaplanması;

$$\text{Yıllık maliyet} = \frac{(0,0267\ g/L)(1440\ dk/gün)(365\ gün/yıl)(0,50\$/kg)}{10^3\ g/kg}$$

Yıllık maliyet = 7008 $/yıl

***Not**: Küçük atıksu debileri için, karbon rejenerasyonu planlamak mali açıdan etkili değildir.*

7.5.4.4.Aktif Karbonun Özellikleri

Aktif karbon odun, lignin, bitümlü kömür, linyit ve petrol kalıntılarından yapılır. Atıksu arıtımında çoğunlukla orta uçuculukta bitümlü kömür veya linyitten üretilmiş Granül Aktif Karbon (GAK) kullanılır. Aktif karbonun üretildiği kaynak ve aktifleştirilme tarzına bağlı olarak özgün özellikleri vardır. Bitümlü kömürden yapılmış granül aktif karbonun gözenek boyutu küçük, yüzey alanı büyük, yığın yoğunluğu ise çok yüksektir. Linyitten üretilmiş aktif karbonun ise gözenek boyutu yüksek, yüzey alanı düşük yığın yoğunluğu (birim hacim ağırlığı) ise çok düşüktür.

Adsorpsiyon kapasitesi; atıksudaki KOİ, renk, fenol gibi kirleticilerin giderim derecesini gösterir. Adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan çeşitli testler vardır. Tat ve koku maddelerini gidermede fenol sayısı, düşük molekül ağırlıklı maddelerin ($< 2\mu m$) gideriminde iyot sayısı, yüksek molekül ağırlıklı maddelerin gideriminde ($1 - 50\mu m$) melas sayısı bağıntıları kullanılır. Genellikle atıksuda düşük molekül ağırlıklı organikler ağırlıklı ise yüksek iyot sayılı, yüksek molekül ağırlıklı organikler ağırlıklı ise yüksek melas sayılı aktif karbon ile daha etkin giderim sağlanabilir.

7.5.4.5.Sürekli Akışlı Karbon Filtreler

Karbon filtreler, filtre yatağından geçen su miktarı arttıkça madde giderimi artacağı için, kararlı olmayan proses olarak düşünülebilirler. GAK yatağında sorpsiyonun olduğu bölge, Kütle Transfer Bölgesi (KTB) olarak adlandırılır. Atıksu, yüksekliği KTB kadar olan bölgeden geçtiğinde sudaki kirletici konsantrasyonu minimuma inmiş olur. KTB'nin aşağısında daha fazla adsorpsiyon olmaz. Filtrenin üst tarafındaki granül karbon organik madde ile doyduğunda KTB, kırılma olana kadar aşağıya doğru kayar (Şekil 6.12). GAK yatağında KTB'nin oluşması için minimum bir temas süresi gereklidir. Boş yatak temas süresi çok kısa ise (hidrolik yükleme çok büyükse) KTB'nin uzunluğu GAK yatağı yüksekliğinden fazla olacağından adsorplanabilecek kirletici, aktif karbon tarafından tamamen giderilemeyecektir.

7.5.4.6.Karbon Rejenerasyonu

Kullanılmış (doymuş) karbon, ekonomik sebeplerden dolayı rejenere edilmektedir. Rejenerasyonda karbonun gözeneklerindeki adsorplanmış olan maddelerin uzaklaştırılması söz konusudur. Rejenerasyon; termal yollarla, buharla, çözücü ekstraksiyonu ile asit veya bazla muamele ile veya kimyasal oksitleme yöntemleri ile gerçekleştirilir. Termal rejenerasyon dışındakiler yerinde yapılabildiklerinden dolayı daha çok tercih edilirler. Çok bileşenli atıksuların adsorpsiyonunun yapıldığı aktif karbonun rejenerasyonunda, bu yöntemlerle yüksek

verim sağlanamaz. Rejenerasyon sırasında ağırlıkça %5-10 oranında karbon kaybı gerçekleşir. Buna ilaveten rejenere edilen karbonun kapasitesi, gözenek boyutundaki değişiklik ve gözeneklerde birikim gibi sebeplerle bir sonraki kullanımda bir önceki kullanıma göre düşmektedir. Çoğu kez rejenerasyon sayısının 6 ile sınırlandığı bilinmektedir.

7.5.5. İyon Değiştirme

İyon değiştirme, atıksudaki istenmeyen anyon ve katyonların giderilmesinde kullanılır. Katyonlar hidrojen veya sodyum ile anyonlar ise hidroksil iyonları ile yer değiştirir. İyon değiştirici reçineler, organik ve inorganik yapıdaki maddelere bağlı fonksiyonel gruplardan oluşmaktadır. Atıksu arıtımında kullanılan iyon değiştirici reçineler, pürüzlü üç boyutlu yapıların içine organik maddelerin polimerizasyonu ile yapılan sentetik reçinelerdir. Reçinelerin iyon değiştirme kapasitesi reçinenin birim kütlesindeki fonksiyonel grupların sayısı ile belirlenir.

İyon değiştirme reçineleri pozitif iyonları değiştiriyorsa katyonik, negatif iyonları değiştiriyorsa anyonik olarak adlandırılırlar. Katyon değiştirici reçineler sülfonik gibi asidik fonksiyonel grupları, anyon değiştirici reçineler ise amin gibi bazik fonksiyonel grupları içerirler. İyon değiştirici reçineler; kuvvetli asit, zayıf asit, kuvvetli baz, zayıf baz gibi fonksiyonel grubun yapısına göre sınıflandırılırlar. Asitlik veya bazlığın kuvveti fonksiyonel grubun iyonizasyon derecesine bağlıdır. Örneğin, sülfonik asit fonksiyonel gruplu bir reçine gibi yani kuvvetli asidik katyon değiştirici reçine gibi davranacaktır.

Diğer iyon değiştirici reçineler için en yaygın fonksiyonel gruplar zayıf asit olarak karboksil grubu (-COOH), kuvvetli baz olarak dört değerlikli amonyum grubu ($-R_3N^+OH^-$), zayıf baz olarak da amin grubudur ($-NH_2$ veya -RNH).

Reaksiyonlar kimyasal dengeye bağlı olup bir iyonun diğeri ile yer değiştirmesinden ibarettir. Sodyum çevrimli bir katyon değişimi reaksiyonu aşağıda verilmiştir:

$$Na_2\,R + Ca^{2+} \leftrightarrow Ca\,R + 2\,Na^+ \tag{7.21}$$

Burada R reçineyi temsil etmektedir. Sodyumun tümü kalsiyum ile yer değiştirdikten sonra, reçine yatağı içinden konsantre sodyum iyonu çözeltisi geçirilerek reçine rejenere edilir. Böylece reaksiyon tersine döner ve kalsiyumla sodyum yer değiştirir. Rejenerasyon için %5-10'luk tuz çözeltisi kullanılır:

$$2\,Na^+ + Ca\,R \leftrightarrow Na_2\,R + Ca^{2+} \tag{7.22}$$

Hidrojen çevrimli katyon değişiminde de benzer reaksiyonlar olur:

$$Ca^{2+} + H_2\,R \leftrightarrow Ca\,R + 2\,H^+ \tag{7.23}$$

%2 ve %10'luk H_2SO_4 ile

$$Ca\,R + 2\,H^+ \leftrightarrow H_2\,R + Ca^{2+} \tag{7.24}$$

Anyon değişiminde de anyonlar hidroksil iyonları ile yer değiştirir:

$$SO_4^{2-} + R\,(OH)_2 \leftrightarrow R\,SO_2 + 2\,OH^- \tag{7.25}$$

%5-10'luk sodyum hidroksit rejenerasyon için yeterlidir:

$$R\,SO_4 + 2\,OH^- \leftrightarrow R\,(OH)_2 + SO_4^{2-} \tag{7.26}$$

İyon değişiminde performans ve maliyet, reçinenin iyon değiştirme kapasitesi ve rejenerantın miktarına bağlıdır. Yatak kapasitesi, 1 litre yatak hacmi için eşdeğer olarak verilir. Bazı durumlarda yatak kapasitesi "kg $CaCO_3$/yatak hacmi" veya "iyon kütlesi/yatak hacmi" olarak

da verilir. Benzer şekilde, atıksudan giderilecek iyonun miktarı "eşdeğer/litre arıtılacak su" olarak gösterilir.

Sabit yataklı iyon değiştiricilerde yatağın işletme kapasitesi ile kullanılan rejenerant miktarı ilişkilidir.

Kompleks organik atıksu durumunda gerekli tasarım parametrelerini saptamak üzere laboratuvar ölçekli sistemlerde çalışma yapılması önerilmektedir. Deneysel çalışmalar sonunda reçine kullanımı ve rejenerant verimliliği arasındaki ilişki tespit edilerek sistemin optimum işletme düzeyi seçilir.

Endüstriyel atıksu arıtımında iyon değiştiricilerin kullanıldığı en önemli alan kaplama endüstrileridir. Kaplama endüstrisinde, atık kaplama banyolarında bulunan kullanılmış kromik asitin geri kazanımı için, kromik asit banyo suyundaki iyonlar (Fe, Cr^{+3}, Al gibi) katyon değiştirme reçinesinden geçirilir ve çıkış suyu, kaplama banyosunda tekrar kullanılır.

Atıksularda İyon Değişimi ile Arıtım

Atıksularda iyon değişimiyle arıtım birkaç işletimsel adımdan oluşmaktadır. Öncelikle uygun değişim yerleri dolarak kirletici çıkış suyunda gözükene kadar atıksu reçineden geçirilir. Bu proses "kırılma (breakthrough)" olarak adlandırılmaktadır. Bu noktada arıtım durdurulur ve kiri gidermek ve reçineyi regrade etmek amacıyla yatak geri yıkama işlemine tabii tutulur. Bunun ardından yatak rejenere edilir. Rejenerasyonun ardından, kalıntı rejenerantı gidermek için yatak su ile yıkanır/durulanır. Bu işlemin sonucunda yatak yeni bir arıtma döngüsüne hazırdır.

Şekil 7.13. Bir iyon değişim reçinesinin arıtım ve rejenerasyon döngüsü

Arıtma ve rejenerasyon döngüsü Şekil 7.13'te gösterilmiştir. Şekil 7.13'te, ABHG alanı, çözelti hacmindeki kırılma öncesi arıtılan iyonların miktarıdır. ABC alanı, kolondan sızan iyonların miktarı ve ACHG alanı değişim reçinesi ile giderilen iyonların miktarını göstermektedir. Reçine kullanımı, ACHG/K alanıdır. Burada K, reçinenin esas/nihai kapasitesidir. BCDEF alanı, rejenerasyon sırasında yataktan giderilen iyonların miktarını vermektedir. Buradan, rejenerasyon verimi BCDEF/R olacaktır ve R, rejenerantın konsantrasyonunun hacimle çarpımına karşılık gelecektir.

Sızıntıyı minimize etmek ve sıvının reçineyle temasını garantilemek için minimum yatak derinliği 61 ile 76 cm arasında olmalıdır. Arıtma debisi 0,27 – 0,67 $m^3/(dk.m^3)$ arasında değişebilmektedir, fakat kırılma yüksek debilerde daha hızlı gerçekleşecektir. Rejenerant debisi 0,13 ile 0,27 $m^3/(dk.m^3)$ arasındadır.

Deneysel Prosedür

Şekil 7.14. Laboratuvar ölçekli iyon değişim kolonu

Kompleks endüstriyel atıklardan iyonların giderimi için gerekli tasarım kriterlerini geliştirmek amacıyla laboratuvar skalalı iyon değişim kolonu işletmek oldukça önemli/gereklidir. Tipik bir laboratuvar düzeneği Şekil 7.14'te gösterilmektedir. Bu şekli temel alarak önerilen prosedür şu şekildedir:

1. 50 mL/dakikalık debiyle kolon 10 dakikalığına deiyonize su ile durulanmalıdır.
2. A rıtılacak atıksuyu içeren çözelti ile kolon debisi 50 mL/dk olacak şekilde ayarlanır.
3. A rıtılacak çözeltinin hacmi ölçülür.
4. Arıtma döngüsüne başlanır. İyon konsantrasyonu maksimum çıkış limitine ulaşıncaya kadar kırılma eğrisi geliştirilir.
5. Yatak genişliğinin %25'i kadar 5-10 dakika süreyle geri yıkama yapılır (Geri yıkama işlemi için distile su kullanılmalıdır).
6. Reçine için önerilen konsantrasyon ve hacimde 6 mL/dk'lık debiyle rejenerasyon gerçekleştirilir. Kullanılmış rejenerant toplanır ve geri kazanılmış iyonlar ölçülür.
7. Kolon distile su ile durulanır.

Birkaç işletimden sonra reçine kullanımı ve rejenerant verimi arasındaki ilişkiyi gözlemlemek ve optimum işletim seviyesini seçmek mümkündür.

Makroretiküler reçineler spesifik apolar organik bileşiklerin giderimi için kullanılmaktadır. Bu reçineler oldukça spesifiktir ve bir bileşiği veya bir grup bileşiği gidermek için formüle edilebilir. Reçineler solventlerle rejenere edilmektedir. Seçilen bazı bileşenlerin makroretiküler reçineler kullanılarak giderimi ile ilgili arıtma sonuçları Tablo 7.25'te verilmiştir.

Tablo 7.25. Seçilen bileşiklerin makroretiküler reçineyle giderimi

Bileşik	*Birim*	*Giriş*	*Çıkış*
Karbon tetraklorür	*µg/L*	*20450*	*490*
Hekzakloroetan	*µg/L*	*104*	*0,1*
2-Kloronaftalen	*µg/L*	*18*	*3*
Kloroform	*µg/L*	*1430*	*35*
Hekzaklorobütadien	*µg/L*	*266*	*<0,1*
Hekzaklorosiklopentadien	*µg/L*	*1127*	*1.5*
Naftalin	*µg/L*	*529*	*<3*
Tetrakloroetilen	*µg/L*	*34*	*0.3*
Toluen	*µg/L*	*2360*	*10*
Aldrin	*µg/L*	*84*	*0,3*
Dieldrin	*µg/L*	*28*	*0,2*
Kl ordan	*µg/L*	*217*	*<0,1*
Endrin	*µg/L*	*123*	*1,2*
Heptaklor	*µg/L*	*40*	*0,8*
Heptaklor epoksit	*µg/L*	*11*	*<0,1*

Kaplama Atığı Giderimi

İyon değişiminin endüstriyel atıklarda çoğunlukla kullanıldığı uygulama alanı, krom geri kazanımı ve su geri kullanımının sıklıkla başarılı olduğu kaplama endüstrisidir.

Kaplama banyolarındaki kullanılmış kromik asidin geri kazanımı için, kromik asit diğer iyonları (Fe^{+2},Cr^{+3}, Al vb.) gidermek için katyon değişim reçinesinden geçirilir. Çıkış suyu kaplama banyosuna veya depoya geri döndürülebilir. CrO_3'ün bozunmadan reçineden geçirilme konsantrasyonu en fazla 105 ile 120 kg/m^3 arasında olduğu için, banyonun seyreltilmeye ihtiyacı olabilir ve geri kazanılmış çözeltinin güçlenmesi için iyileştirmeye ihtiyacı olabilir.

Yıkama suları metal iyonlarını gidermek için öncelikli olarak bir katyon değiştirici reçineden geçirilebilir. Bu üniteden çıkan su, kromatı gidermek ve demineralize iyileştirme suyu eldesi için bir anyon değiştiriciden geçirilir. Yıkama suyunu ilk olarak katyon ünitesinden geçirip değişim reçinesinde metal oksitlerin çökelmesini engelleme işlemi tercih edilen bir yöntemdir. Anyon değiştirici sodyum hidroksit ile rejenere edilir; bu durum kullanılmış rejenerant çözeltisinde Na_2CrO_4 ile NaOH bileşiklerinin karışımıyla sonuçlanır. Bu karışım H_2CrO_4'ü geri kazanmak için bir katyon değiştiriciden geçirilir. Kullanılmış rejeneranttan geri kazanılan kromik asit konsantrasyon yüzdesi 4 ile 6 arasında olacaktır. Katyon değiştiriciden gelen kullanılmış rejenerant, kanalizasyona deşarj edilmeden önce nötralize edilmelidir ve metalik iyonlar çöktürülmelidir.

Çoğu metal iyonları rejenerant hacminin ilk %70 hacminde elüe edildiğinden, bir sonraki rejenerasyon asit rejenerantının son kısmının tekrardan kullanımı ile nötralizasyon ihtiyacı azaltılabilir. Benzer sebepten dolayı, kostik rejenerasyonun son kısmı, kullanılmış katyon rejenerantının nötralizasyonu için kullanılabilir.

Katyon ünitelerinde, rejenerasyon ihtiyaçları su saflaştırmadan daha fazladır, bunun nedeni atık çözeltide bulunan H^+ iyonlarıyla yarıştır. Su geri kullanımı için, rejenerasyonda 64 ile 80 kg/m^3 arasında H_2SO_4 gerekebilir. Fakat sodyum iyonlarının sızmasını engellemek için, kromik asit ile 400 kg/m^3 sülfürik asitin geri kazanımı gerekebilir. Kaplama tesisi için iyon değişim prosesinin akış diyagramı Şekil 7.15'te verilmiştir.

Şekil 7.15. Kromat giderimi için iyon değişim sistemi ve su geri kullanımı

7.5.6. Elektrokoagülasyon

7.5.6.1.Elektrokoagülasyonun Prensibi

Kimyasal koagülasyondan farklı olarak, elektrokoagülasyon prosesinde koagülan uygun "kurban" anot materyalinin elektrolitik oksidasyonu sonucu oluşmaktadır (Şekil 7.12). Bu proseste yüklü iyon türleri ile anottan çözünmüş olan metal iyonları, metal hidroksit floklarını oluşturmaktadır. Ancak elektrokoagülasyonda oluşan flokların özellikleri, kimyasal koagülasyon ile oluşan floklardan daha farklıdır; elektrokoagülasyonda oluşan floklar daha az su bağlama eğilimindedir başka bir ifadeyle daha az su içeriğine sahiptirler ve bu nedenle hacimleri de daha düşüktür. Floklar daha düşük dirence sahip olduklarından daha kolay filtre edilebilmektedirler.

Elektrokoagülasyonun mekanizması (Şekil 7.16), ortamın fizikokimyasal özelliğine ve iletkenliğe bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki kolloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin konsantrasyonu gibi özellikler de elektrokoagülasyon prosesini etkilemektedir. Oluşan kimyasal arıtma çamurunun yüzey yükleri de arıtma veriminde önemli bir rol oynamaktadır. Diğer atıksu işlemlerine göre elektrokoagülasyon prosesinin üstünlükleri ve zayıf yönleri aşağıda özetlenmektedir [10].

Şekil 7.16. Tipik bir elektrokoagülasyon hücresi

Elektrokoagülasyon prosesinin üstünlükleri:

- Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirmektedir.
- Atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtılması sonucu renksiz, kokusuz ve berrak sular elde edilmektedir.
- Oluşan çamur, metal oksit ve hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilmekte ve susuzlaştırılabilmektedir. Çamur miktarı bu nedenle daha azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte, daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağıl su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içermektedir. Bu suların tekrar kullanılması durumda düşük toplam katı madde seviyesi geri kazanım giderinin daha düşük olmasına katkıda bulunmaktadır.
- Elektrokoagülasyon prosesi en küçük kolloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptir çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırmaktadır.
- Elektrokoagülasyonda kimyasal madde kullanımından kaçınılmakta ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddelerin neden olabileceği ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi engellenmiş olmaktadır.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilmekte ve daha kolay ayrılmaları sağlanabilmektedir.
- Elektrokoagülasyon hücresi içerisindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilmekte ve böylece daha az bakım gerektirmektedir.
- Elektrokoagülasyon prosesi, elektrik kullanımının yeterli olmadığı kırsal alanlarda üniteye eklenen güneş panelleri vasıtasıyla da uygulanabilir.

Elektrokoagülasyon prosesinin zayıf yönleri:

- Çözünen elektrotların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.

- Bazı bölgelerde/yerleşim yerlerinde elektrik enerjisi pahalı olabilir.
- Elektrokoagülasyon prosesi ile kirletici maddelerin kısmi oksidasyonu sağlanmaktadır, istenmeyen ara ürünler (halojenli organik bileşikler, dezenfeksiyon ara ürünleri, vb.) meydana gelebilmektedir.
- Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir.
- Elektrokimyasal arıtma sisteminin çalışabilmesi için, atıksu çözeltilerinin belli bir iletkenlik değerine sahip olması gerekmektedir, bu nedenle bazı durumlarda (örneğin evsel atıksulara) elektrolit (genellikle NaCl) ilavesi yapılmaktadır. Elektrolit ilavesi sonucunda atıksuyun toplam çözünmüş madde miktarı yükselmektedir.
- Elektrolit olarak klorür (NaCl) ilave edildiğinde, teorik olarak anotta klorürün yükseltgenmesi sonucunda klor gazı (Cl_2) oluşabilir. pH değeri uygun olduğu takdirde hipokloröz asit ortamda organik kirleticilerle klorlü organik bileşenler (AOX) ve çeşitli dezenfeksiyon yan ürünleri oluşturabilir. Bunlar sularda istenmeyen, insan sağlığına ve sucul ortama son derece zararlı bileşiklerdir.
- Bazı durumlarda (yüksek pH, akım yoğunluğu) jelatinimsi Al veya Fe hidroksit çözünme eğiliminde olabilir.

Elektrokoagülasyonda, en yaygın olarak demir, paslanmaz çelik ve alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar ucuz, kolay temin edilebilir olmaları ve etkinliklerinin kanıtlanmış olması nedeniyle tercih edilmektedir [11].

Elektrokoagülasyon prosesinde genellikle üç ardışık aşamanın olduğu kabul edilmektedir [10];

- Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile koagülan türlerinin oluşumu,
- Kirleticilerin destablizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
- Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [12];

- Çözelti içinden geçen akım nedeniyle çözünen elektrotun çözünmesi ile meydana gelen iyonların etkileşimleri sonucu yüklü türlerin, oluşan iyonlar etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılması sağlanmaktadır.
- Sudaki mevcut iyonik türlerin yüklerinin nötralizasyonu elektrokimyasal olarak çözünen elektrotlar tarafından üretilen zıt iyonlarla sağlanmaktadır.

7.5.6.2.Proses Mekanizması

Basit bir elektrokoagülasyon pili, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Dış güç kaynağından bir güç uygulandığı zaman anot oksidasyona, katot redüksiyona uğramaktadır. Bu durumda anot elektrokimyasal olarak çözünecek ve katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için, kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olması gerekmektedir ve aralarında belli bir mesafenin olması gerekmektedir. M metali ile anot ve katottaki elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (26);

Anotta:

$$M(k) \rightarrow M^{n+}(ç) + ne^- \quad (7.27)$$

$$2H_2O(s) \rightarrow 4H^+(ç) + O_2(g) + 4e^- \quad (7.28)$$

Katotta:

$$M^{n+}(ç) + ne^- \rightarrow M(k) \quad (7.29)$$

$$2H_2O(s) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^- \quad (7.30)$$

şeklinde özetlenebilmektedir.

7.5.6.3.Elektrokoagülasyon Prosesine Etki Eden Başlıca Faktörler

Elektrokoagülasyon uygulamasında proses verimi üzerinde rol oynayan parametreler akım yoğunluğu, ortamda elektrolit olarak NaCl bulunması, pH ve sıcaklık olarak sıralanmaktadır. Bu parametrelerin elektrokoagülasyon uygulamasındaki etkileri aşağıda özetlenmiştir.

Akım Yoğunluğu

Elektrokoagülasyon sisteminde uygulanan akım miktarı, elektrotlardan çözünen Al^{3+} veya Fe^{2+} iyonlarının miktarını belirlemektedir. Alüminyum için elektrokimyasal eşdeğer kütle 335,6 mg/(A sa), demir için ise bu değer 1041 mg/(A sa)'tir. Yüksek akım değerleri küçük bir elektrokoagülasyon ünitesini ifade etmektedir. Çok yüksek akım değerlerinde, elektrik enerjisinin suyun ısıtılması için kullanılma olasılığı oldukça yüksektir ve prosesin verimi düşmektedir. Başka bir ifadeyle, çok büyük akım yoğunluğu değeri akım veriminde (birim enerji başına giderilen kirletici miktarı) önemli bir düşüşe neden olmaktadır. Elektrokoagülasyon sisteminin uzun süre bakım gerektirmeden kullanılabilmesi için akım yoğunluğu değerinin 20-25 A/m^2 arasında kalması önerilmektedir. Akım yoğunluğu seçimi yüksek akım verimi sağlamak üzere pH, sıcaklık ve debi gibi diğer işletme parametreleri ile birlikte yapılmalıdır. Akım verimi alüminyum elektrot için % 120-140 iken demir elektrot için % 100 civarındadır. Alüminyumda akım veriminin % 100'ün üzerinde olması özellikle ortamda klorür iyonları mevcut iken çukur korozyon etkisine bağlıdır. Akım verimi, akım yoğunluğunun yanı sıra ortamda bulunan anyonların türüne de bağlıdır [12], [13].

Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu

Elektrokoagülasyonun verimini arttırmak ve atıksuyun iletkenliğini istenilen seviyeye getirmek amacıyla sodyum nitrat, sodyum sülfat gibi inert tuzlar, sodyum ve potasyum klorür gibi halojenli tuzlar ya da deiyonize su kullanılmaktadır. Bu ayarlamalar, atıksuyun başlangıç pH'sında yaklaşık olarak 0.3 birimlik bir değişime neden olmaktadır [13], [14].

Potasyum klorürün elektrolit olarak kullanılması halinde boya molekülleri hızlı bir şekilde parçalanabilmekte, ancak başta hipoklorit olmak üzere yan reaksiyon ürünü olarak aktif klor ve klorlu organik bileşiklerin oluşma ihtimali ortaya çıkmaktadır. Olumsuz çevresel etkileri ve toksisiteleri nedeniyle istenmeyen bu bileşiklerin oluşumunu engellemek için organik bileşiklerin tamamen ayrışması sağlanmalıdır. Başka bir deyişle, yeterli derecede kadar uzun elektroliz zamanı gerekmektedir. Sodyum nitrat, sodyum sülfat ve mangan sülfat gibi inert tuzların elektrokoagülasyon yöntemiyle indigo boyalardan kaynaklanan rengin gideriminde kullanılması, gerek renk giderme seviyeleri gerekse enerji tüketimi açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Elektrokoagülasyonda sodyum metabisülfit (NaS_2O_5) kullanılması durumunda halojen içeren tuzlardan daha farklı bir mekanizma söz konusudur. Elektrik akımı S_2O_5'in S_2O_4'e dönüşümünü sağlamaktadır. S_2O_4 boya moleküllerini soluk sarı renkli leuco formuna dönüştüren indirgen bir maddedir. Bu indirgen maddenin boya çözeltisine eklenmesi neredeyse anında bir renk giderimi ile sonuçlanmaktadır. Ancak bu yöntem organik madde içeriğinde bir azalma olmaması ve boya moleküllerinin daha basit bir yapıya dönüşmemesi nedeniyle etkili bulunmamaktadır. Ayrıca leuco form kolaylıkla renkli forma oksitlenebilmektedir [15], [16].

Renk giderimi ve elektrik tüketimi açısından en iyi sonuçlar NaCl ile elde edilmektedir. Üstelik bu elektrolit boyama prosesinde kullanılması nedeniyle tekstil endüstrisi atıksularında genellikle halihazırda bulunmaktadır. NaCl genellikle arıtılacak su ya da atıksuyun iletkenliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik yükünün iletimindeki iyonik katkısının yanı sıra HCO_3^-, SO_4^{2-} gibi anyonların olumsuz etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Karbonat ya da sülfat iyonları elektrot yüzeyinde yalıtkan bir tabaka oluşturan kalsiyum veya magnezyum iyonlarının çökelmesine yol açabilmektedir [17]. Bu tabaka elektrotlar arasındaki potansiyeli aniden artırmakta ve akım veriminde önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle atıksu arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin işletilebilmesi için mevcut iyonlar arasında klorür miktarının %20 mertebelerinde olması tavsiye edilmektedir.

Sodyum klorür ilavesi, iletkenliği arttırması sebebiyle enerji tüketiminin azalmasına da yol açmaktadır. Ayrıca elektrokimyasal olarak üretilen klorun dezenfeksiyonda etkili olduğu bilinmektedir [13], [16].

Reaksiyon pH Değeri

Su ve atıksu arıtımında elektrokoagülasyon uygulamasının gerçekleştirildiği pH değeri, sistem verimi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. pH, elektrokoagülasyon esnasında oluşan metal hidroksitlerin çözünürlüğünü ve yükünü belirleyen önemli bir proses parametresidir. Çok asidik ve bazik pH değerlerinde metal hidroksit çözünürlüklerinde belirgin artışlar meydana geleceğinden yumak (flok) oluşumunda ciddi azalmalar gözlenecektir. Bu ise proses veriminde belirgin düşüşlere neden olabilmektedir. Buna karşın ortamda elektrolit olarak NaCl bulunması durumumda, anotta klor ve hipokloröz asidi meydana gelmektedir [10], [13]. Bu reaksiyonlar sonucunda asidik pH'lar daha kuvvetli oksidan olan HOCl oluşumuna imkan tanıyacaktır. Nötr veya hafif alkali pH'larda ise OCl^- hakim tür olacaktır. Buna karşın çok yüksek pH'larda (pH>11) OCl_3^- ve OCl_4^- oluşumları nedeniyle oksidasyon gücünde önemli düşüşler meydana gelecektir. Alüminyum elektrotların akım verimlerinin asidik veya alkali koşullarda nötr koşullara göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Arıtma performansı kirleticinin yapısına bağlı olmakla birlikte en iyi kirletici giderimi pH 7 civarında elde edilmektedir. Güç tüketimi ise iletkenlikteki değişim nedeniyle nötr pH'da daha yüksektir. İletkenliğin yüksek olduğu durumlarda ise pH etkisi önemli olmamaktadır [11]. Elektrokoagülasyon ile arıtım sonrası çıkış suyunun pH'sı asidik atıksular için artma, alkali atıksular için azalma eğiliminde olması elektrokoagülasyon prosesinin üstünlüklerinden bir tanesidir. Asidik koşullarda pH'taki bu artışın nedeninin katotlarda oluşan hidrojen olduğu tespit edilmiştir. Aslında hidrojen oluşumunun yanında anot yakınlarında $Al(OH)_3$ oluşumu da H^+ oluşturması nedeniyle pH'ı düşürmektedir. Ayrıca oksijen oluşum reaksiyonu da pH düşüşüne neden olabilmektedir. Asidik atıksudaki pH artışının, hidrojen kabarcıklarının oluşumu sırasında CO_2 oluşumu, Al^{3+} ile diğer anyonların çökelti oluşturması ve H^+ oluşturan reaksiyonlar için dengenin sola kayması şeklinde izah edilmektedir. Alkali koşullardaki pH düşüşünün ise diğer katyonlarla hidroksit çökeltilerinin oluşması ve $Al(OH)_4^-$ oluşumu sonucu meydana geldiği düşünülmektedir [13]. Alüminyum elektrot kullanıldığında en iyi kirletici giderim veriminin nötr pH civarında elde edildiği tespit edilmiştir.

Elektrot Malzemesi

Elektrokoagülasyonda kullanılan elektrod malzemeler genellikle alüminyum ve demirdir (paslanmaz çelik). Demir elektrod, halojen bağlı organik bileşikleri oksitlemede çok denenmiş ve başarıyla uygulanmış olmasının yanında, tekstil endüstrisinde ve tuz içeriği yüksek atıksularda başarılı kullanımı ve elektro-oksidasyon için diğer anot malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetli olması nedeniyle tercih edilen bir elektrot malzemesidir [18]. Elektrotlar plaka şeklinde yapılabilmektedir ve plaka yüzeylerinin düzenli olarak durulanması faydalı olmaktadır. Sisteme verilen kirletici miktarının giderimi için gerekli metal iyonu miktarı

bellidir ve genellikle atıksu arıtımı için demir/çelik, su arıtımı için daha ziyade alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır. Demir, alüminyuma oranla daha ucuz bir malzemedir. Alüminyum plakalar atıksu arıtımında, Al^{3+} iyonunun yüksek koagülasyon verimi nedeniyle tek başına veya demir plakalarla kombinasyon halinde uygulama alanı bulmaktadır. Suda önemli miktarda Ca^{2+} veya Mg^{2+} (sertlik) iyonları bulunduğu takdirde katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılması tavsiye edilmektedir [13]. Elektrot konfigürasyonu çubuklar şeklinde de olabilmektedir.

Elektrotlararası Mesafe

Elektrokoagülasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamakla birlikte, elektrotlar arası mesafe arttırıldığında proses verimi de az miktarda artış göstermektedir. Bu değişim muhtemelen elektrostatik etkilerin elektrotlar arası mesafeye bağlı olması nedeniyle meydana gelmektedir. Bu mesafe arttığı zaman üretilen iyonların hareketi yavaşlamakta ve flok oluşturma ihtimalleri artmaktadır. Ayrıca bu floklar, tekstil endüstrisi atıksuları örneği için daha fazla boya adsorplama yeteneğine sahiptir [12].

Reaksiyon Süresi

Elektroliz süresince pozitif elektrot anodik reaksiyonlara maruz kalırken katodik reaksiyonlar negatif elektrotta meydana gelmektedir. Elektrotlardan salınan iyonlar partiküllerin yüklerini nötralize etmekte ve böylece koagülasyon başlamaktadır. Elektroliz süresinin artması durumunda iyon konsantrasyonunda ve iyonların hidroksit floklarında artış meydana gelmektedir.

Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılan uygulamalarında, örneğin tekstil endüstrisi atıksuyu arıtımında, alüminyum elektrotlarla çökelme problemleri ve daha yüksek askıda katı madde düzeyleri, demir elektrotlar kullanıldığında ise hızlı çökelme ve düşül askıda katı madde seviyeleri gözlenmektedir [19]. Genel olarak elektrokoagülasyon prosesinde reaksiyon süreleri oldukça kısadır, pek çok uygulamada reaksiyon dakikalar mertebesinde tamamlanmaktadır.

Sıcaklık

Elektrokoagülasyon yüz yıldan fazla bir zamandır bilinmesine rağmen sıcaklığın bu yöntem üzerindeki etkisi çok fazla araştırılmamıştır. Ancak elektrokoagülasyon reaksiyon hızı da diğer kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi çözeltinin sıcaklığı arttığında artmaktadır. Sıcaklık 27°C'yi geçtiğinde, üretilen iyonların hareketi oldukça artmakta ve bu iyonların yumaklaşma ve metal hidroksit flokları oluşturma şansı azalmaktadır. Sonuç olarak da proses veriminde belli bir sıcaklığın üzerinde önemli bir azalma gözlenmektedir.

Alüminyumun için akım verimi, başlangıçta sıcaklık ile birlikte maksimum akım veriminin bulunduğu 60°C'ye kadar artmaktadır. Sıcaklık artışının daha fazla devam etmesi akım veriminde düşmeye neden olmaktadır. Akım veriminin sıcaklıkla artması elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit film tabakasının bozunmasıyla artan aktiviteye bağlanmaktadır. Sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşmasıyla alüminyum hidroksit jelinin büyük gözeneklerinde bir daralma gözlenmekte ve bu daralma elektrot yüzeyinde birikmeye daha elverişli flokların oluşumuna yol açmaktadır. Akım verimine benzer bir şekilde ancak daha düşük bir sıcaklıkta enerji tüketimi de maksimum değere ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[2] Metcalf & Eddy (1991). Wastewater Engineering, Treatment, DisposaL anD Reuse, McGraw-Hill International Editions.

[3] Qasim S. R. (1999). Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operation. Lancaster, Pa. : Technomic Pub. Co.

[4] Davis, M.L. (çev. edit. Toröz, İ.) (2015). Su ve Atıksu Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları. Nobel Akademik Yayıncılık. Ankara.

[5] Water Environmental Federation (1998). Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal, A special publication.

[6] Baker, R.W. (2004). Membrane Technology and applications, 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd. England.

[7] American Water Works Association (AWWA) (2007). Reverse Osmosis and Nanofiltration (M46): AWWA Manual of Practice, 2nd Edition.

[8] Eckenfelder, W.W. Jr. (1989). Industrial Water Pollution Control. McGraw-Hill International Editions.

[9] Weber, W. J. (1972). Physicochemical processes for water quality control. Wiley-Interscience, New York.

[10] Mollah, M.Y., Schennach, R., Parga, J.R. ve Cocke, D.L. (2001). Electrocoagulation (EC) - science and applications. J. Hazard. Mater., B84, 29-41.

[11] Chen, X., Chen, G. ve Yue, P.L. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Sep. Purif. Technol., 19, 65-76.

[12] Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, J. Hazard. Mater., B114, 199-210.

[13] Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Sep. Purif. Technol., 38, 11-41.

[14] Kobya, M., Can, O. T. ve Bayramoğlu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. J. Hazard. Mater., 100, 163-178.

[15] Fernandes, A., Mora, A., Magrinho, M., Lopes, A. ve Gonçalves, I. (2004). Electrochemical degradation of C. I. Acid Orange 7. Dyes Pigments, 61, 287-296.

[16] Cameselle, C., Pazos, M. ve Sanroman, M.A. (2005). Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. Chemosphere, 60, 817-822.

[17] Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M. N., Leclerc, J. P., Yaacoubi, A., Benhammou, A. ve Nejmeddine, A. (2005). Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. Chem. Eng. Proc., 44, 461-470.

[18] Golder, A.K., Hridaya, N., Samanta, A.N. ve Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. J. Hazard. Mater., 137, 134-140.

[19] Can, O. T., Kobya, M., Demirbaş, E. ve Bayramoğlu, M. (2005). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. Chemosphere, 62, 181-187.

[20] Ahn, K.H., Song, K.G. (1999). Treatment of Domestic Wastewater Using Microfiltration for Reuse of Wastewater. Desalination, 126, 7-14.

[21] Altınbaş, U. (2001). Nutrient removal from low strength domestic wastewater in sequencing batch biofilm reactor, Water Science and Technology, Vol.44, No.1, pp 181-186.

[22] Arceivala, S.J. (2002). Çevre Kirliliği Kontrolünde Atıksu Arıtımı, Tata McGraw –Hill Publishing company limited.

[23] Barkley, N.P., Farrell, C. and Williams, T. (1993). Electro-Pure Alternating Current Electrocoagulation, EPA/540/S -93/504.

[24] Bilstad T. (1997). Membrane Operations. Wat. Sci. Tech. Vol. 36, No.2-3, 17-24.

[25] Ciardelli, G., Corsi, L., Marcucci, M. (2000). Membrane Separation for Wastewater Reuse in the Textile Industry, Resources, Conservation and Recycling 31, 189-197.

[26] Ernst, M., and Jekel, M. (1999). Advenced Treatment Combination for Groundwater Recharge of Municipal Wastewater by Nanofiltration and Ozonation. Wat.Sci.Tech. 40, No.4-5, 277-284.

[27] Gonçalves, R.F. and Rogalla, F. (1992). "Biological phosphorus removal in fixed films reactors" " Water Science and Technology, Vol. 25, No.12, pp.165-174.

[28] Gonçalves, R.F. and Rogalla, F. (1992). "Continous biological phosphorus removal in a biofilm reactor", Water Science and Technology, Vol. 26, No.9-11, pp.2027-2030.

[29] Gonçalves, R.F. and Rogalla, F. (1994). "Continuous biological phosphorus uptake in submerged biofilters with nitrogen removal" Water Science and Technology, Vol. 29, No.10-11, pp.135-143.

[30] Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J.L.C., Arvin, E. (1997). "Wastewater Treatment: Biological and Chemical Prosesses" Second edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[31] http://www.apexprocess.com.au/coagulation2.htm

[32] http://www.kaselco.com

[33] http://www.kinetico.com/industrl/microfil.htm

[34] http://www.powellwater.com

[35] Hultman, B., Jönsson, K., Plaza, E. (1994). "Combined nitrogen and phosphorus removal in a fullscale continuous up-flow sand filter" Water Science and Technology, Vol. 29, No.10-11, pp.127-134.

[36] İleri, R. (2000). Çevre Biyoteknolojisi, Değişim yayınları.

[37] Shimizu, T., Tambo, N., Kudo, K., Ozawa, G., Hamaguchi, T. (1994). "An anaerobic fluidized pellet bed bioreactor process for simultaneous removal of organic, nitrogenous and phosphorus substances" Water Research, Vol.28, No.9, pp.1943-1952.

[38] Yalçın, F., Koyuncu, I., Öztürk, İ., and Topacık, D. (1999). Pilot Scale UF and RO Studies on Water Reuse in Corrugated Board Industry. Wat. Sci. Tech. Vol.40, No.4-5, 303-310.

[39] Jolley, R. L., Condie, L. W., Johnson, J. D., Katz,S. Mattice, J. S. And Jacobs, V. A. (1990). Water Chlorination, Volume VI: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects, volüme 6. Proceedings, Sixth Conference on Water Chlorination – Environmental Impact and Health Effects, Oak Ridge, TN, May 3-8, 1987. Lewis Pulishers, Chelsea, MI.

8. ATIKSULARIN HAVASIZ ARITIMI

[1]*Dr. Hale Özgün, Dr. Recep Kaan Dereli, Yrd. Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin ve Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Havasız çürütme, çamur stabilizasyonunda kullanılan en eski prosestir. Günümüzde havasız atıksu arıtımından çıkan konsantre çamurların stabilizasyonunun yanı sıra bazı organik endüstriyel atıksuların arıtımında da kullanılmaktadır. Havasız arıtıma prosesleri, yüksek miktarda organik kirlilik içeren atıksuların arıtımında oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Kuvvetli atıkların arıtımında havalı arıtma proseslerine kıyasla çok daha ekonomik olduğu belirlenen havasız arıtım prosesleri son yıllarda evsel atıksu ve organik katı atıkların arıtımında da kullanılmaktadır.

Havasız arıtma prosesleri organik maddelerin oksijensiz ortamda biyokimyasal olarak ayrıştırılması esasına dayanmaktadır. Arıtma esnasında oluşan biyogaz yaklaşık olarak % 65-85 metan ve % 15-35 karbondioksit karışımından oluşmaktadır. Havasız arıtma teknolojilerinin ticarileştirilmesi 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve II. Dünya Savaşı sonrası enerji kaynaklarında yaşanan kriz nedeni ile uygulamalarda hızlı bir artış yaşanmıştır [1].

Havasız çamur çürütücüler standart-hızlı ve yüksek-hızlı olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Standart-hızlı olanlarda reaktörde karıştırma ve ısıtma yoktur. Hidrolik bekletme süresi 30-60 gündür ve çamur yaşına eşittir. Yüksek-hızlı havasız reaktörlerde ise karıştırma ve ısıtma yapılır. Hidrolik bekletme süreleri 20 günün altında tutulur. Kuvvetli organik atıkların anaerobik olarak arıtıldığı yüksek hızlı reaktörlerde ise 1 günden az hidrolik bekletme sürelerinde dahi yüksek verimle karbonlu organik madde giderimi sağlanabilmektedir. Yüksek-hızlı havasız reaktör teknolojisi düşük çamur üretimi, yüksek organik yükleme hızının uygulanabilirliği, az yer kaplama ve net enerji üretimi sayesinde, özellikle organik endüstriyel atıksuların arıtımında, ekonomik olarak verimli ve sürdürülebilir bir teknolojidir [2].

8.1. Havasız Arıtmaya Genel Bakış

Atıksu içerisindeki organik maddelerin havasız ortamda ayrışması en basit haliyle iki temel aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada (hidroliz ve asit fermantasyonu), organik maddelerin asit bakterileri tarafından organik asitlere, alkollere ve CO_2'ye dönüşümü gerçekleşmektedir. İkinci aşama (metan oluşumu) ise asit bakterilerinin parçalama reaksiyonları sonucunda oluşan ürünlerin, metanojenler tarafından metan, CO_2 ve suya dönüştürülmesini içermektedir.

Bu prosesler sonucu oluşan metan gazının kalorifik değeri yüksektir ve enerji kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Havasız arıtma esnasında yağlar, proteinler, karbonhidratlar, aminoasitler ve organik asitler gibi kompleks veya monomer yapıda olan çeşitli organik maddeler parçalanabilmektedir. Bu farklı reaksiyonlar sonucunda oluşacak metan miktarları da farklılık göstermektedir. Örneğin; yağların ayrışması sonucunda yüksek metan yüzdesine sahip biyogaz elde edilebilirken, protein ve karbonhidratların parçalanmasında daha az miktarda biyogaz ve metan yüzdesi elde edilmektedir [3].

8.1.1. Havasız Arıtma Sistemlerinin Üstünlükleri

Havasız prosesler, ilk uygulamalarda ön arıtma ünitelerinden veya biyolojik arıtma proseslerinden oluşan, yüksek miktarda su (%95) ve organik madde ihtiva eden çamurların arıtılmasında kullanılmıştır. Bu proseslerde çamurun çürütülmesiyle stabilizasyon sonucu çamur hacminde azalma ve patojen mikroorganizmaların giderilmesi sağlanabilmektedir.

Yüksek organik madde ($BOİ_5$>1000-1500 mg/L) ve düşük katı madde içeren konsantre atıksuların arıtılmasında aerobik proseslerin uygulanmasının pahalı oluşu havasız proseslerin

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

gelişmesine neden olmuştur [3]. Havasız arıtma teknolojisinin başlıca üstünlükleri ana başlıklarla Tablo 8.1'de verilmektedir.

Tablo 8.1. Havasız biyoteknolojinin üstün özellikleri [4]

Üstünlükler
Proses stabilitesinin sağlanabilmesi
Biyokütle atığının bertaraf maliyetinin düşüklüğü
Besi maddesi sağlama maliyetinin düşüklüğü
İnşa alanı ihtiyacının azlığı
Enerjinin korunması ile ekolojik ve ekonomik fayda sağlanması
İşletme kontrolü gereksiniminin minimize edilmiş olması
Oluşan gazın hava kirlenmesi açısından kontrol edilebilir olması
Havasız şartlarda biyolojik olarak parçalanamayan maddelerin parçalanabilmesi
Atıksudaki mevsimsel değişiklerde arıtmanın stabilitesinin sağlanabilmesi

Havasız ve havalı biyoteknolojiler karşılaştırıldığında, havasız arıtmanın birçok üstün yönü olduğu görülmektedir. İlk olarak, havasız proseslerde biyolojik büyüme hızı aerobik sistemlere göre daha düşüktür. Havasız proseslerde organik maddenin sadece % 5-15'i biyokütleye dönüşmektedir. Bu durum, arıtma sonrasında biyolojik çamur bertarafının aerobik sistemlere göre daha kolay ve düşük maliyetli olacağını göstermektedir.

Biyolojik proseslerde biyokütle sentezi için ortamda fosfor ve azot gibi temel besi maddeleri mutlaka bulunmalıdır. Endüstriyel atıksular her zaman bu maddeleri yeterli oranda ihtiva etmediklerinden biyolojik arıtma öncesi besi maddesi ilavesi gerekmektedir. Ancak havasız sistemlerde biyolojik büyüme hızının düşük olmasına bağlı olarak ilave besi maddesi ihtiyacı da daha az olmaktadır.

Havasız arıtma esnasında metan gazının oluşması sistemin diğer bir üstünlüğüdür. Metan; elektrik veya ısı enerjisi üretimi için kullanılabilir bir enerji kaynağıdır ve enerji eşdeğeri standart şartlarda (0°C , 760 mm Hg basıncı) 35,8 kJ/L'dir. Havalı sistemlerin işletilmesi esnasındaki yüksek enerji ihtiyacına karşın, havasız sistemlerde hem enerji sarfiyatı daha az olmakta, hem de sistem kullanılabilir enerji kaynağı üretmektedir.

Havasız sistemler çok yüksek organik yüklemelerde çalıştırılabilmektedir. Buna karşın, havalı sistemlerde oksijen transferi sınırlı olduğundan yüksek organik yükler uygulanamamaktadır. Bu durumda, KOİ değeri 5000 mg/L'den büyük olan atıksuların arıtılmasında havasız sistemlerin kullanılması daha verimli bir arıtma sağlamaktadır [5].

8.1.2. Havasız Arıtma Sistemlerinin Kısıtları

Havasız arıtma biyoteknolojisinin genel olarak olumsuz özellikleri Tablo 8.2'de verilmektedir. Havasız arıtmanın kısıtlarının başında mikroorganizma büyüme hızının düşük olması gelmektedir. Havasız arıtma için önemli olan metanojenlerin çoğalma hızı, havalı arıtmadaki mikroorganizmalara göre yarı yarıya daha azdır. Buna bağlı olarak, havasız proseslerde hem başlangıçta sistemin dengeye gelme süresi uzun olmakta, hem de olumsuz çevre şartlarından dolayı sistemde biyokütle kaybı yaşanması durumunda sistemin tekrar eski haline gelmesi uzun sürmektedir.

Tablo 8.2. Anaerobik biyoteknolojinin olumsuz özellikleri [4]

Olumsuzluklar
Biyokütle gelişimi için uzun başlangıç evresinin gereksinimi
Seyreltik atıksularda yeterli alkalinitenin üretilememesi
Bazı durumlarda çıkış suyunda istenilen standart değerlerin sağlanamaması
Seyreltik atıksuların arıtılması durumunda oluşan biyogaz miktarının az olması ve elde edilen enerjinin sistemi ısıtmaya yetmemesi
Aşırı sülfat içeren atıksularda koku probleminin olması
Nitrifikasyonun mümkün olmaması
Metanojenlerin toksik maddelere ve çevre şartlarına aşırı duyarlı olması
Düşük sıcaklıklarda kinetik hızların daha da düşük olması
Biyokütlenin maksimum aktivitesi için gerekli olan azot konsantrasyonunun daha fazla olması

Havasız sistemlerin diğer bir olumsuz tarafı atıksuda sülfat bileşiklerinin olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Sülfatların indirgenmesi veya proteinlerin parçalanması sonucu ortaya çıkan H_2S hem toksik hem de korozif niteliktedir. Ayrıca, gazdaki H_2S istenmeyen kötü kokulara neden olmaktadır. Biyogazın yakılması durumunda H_2S'in SO_2'ye oksitlenmesi ile koku problemi azalmaktadır. Ancak, bu durumda da hava kirletici parametre olan SO_2 meydana gelmektedir. Bu nedenle, Havasız arıtmada H_2S oluşumu her zaman kontrol altında tutulmalıdır.

Anaerobik ayrışma esnasında ara ürün olarak organik asitlerin oluşması ortamın pH değerini sürekli düşürmektedir. Metan üreten bakterilerin yaşayabileceği pH aralığı 6,5-8,0 olduğundan sistemde sürekli pH kontrolü yapılmalı ve tampon maddesi ilave edilmelidir. Havasız arıtmada bu ihtiyacın sağlanması havalı sistemlere göre hem daha hassas hem de daha maliyetli olmaktadır.

Bunlara ek olarak, KOİ değeri 1000 mg/L'den az olan seyreltik atıksuların havasız proseslerde arıtılması durumunda havalı sistemlere göre daha düşük arıtma verimi elde edilmektedir. Ancak, gelişmekte olan ülkelerde evsel atıksuların arıtılmasında havasız sistemler, istenilen çıkış standart değerleri elde edilememesine rağmen yukarıda belirtilen faydalar ve sulama suyu olarak yararlanma imkanı dolayısıyla kullanılmaktadır [5].

8.2. Havasız Arıtmanın Esasları

8.2.1. Mikrobiyolojik Prosesler

Havasız arıtma proseslerinde kompleks organik bileşiklerin metan gazına dönüştürülmesinde çeşitli tür ve özellikte mikroorganizma grupları yer almaktadır. Bu kompleks organiklerin havasız ayrıştırılması hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar Şekil 8.1'de gösterilmektedir.

Şekil 8.1. Anaerobik proseslerdeki karbon dönüşümü

Birinci aşama olan hidroliz kademesinde, katı veya çözünmüş halde olan yağ, polisakkarit, protein ve nükleik asit gibi kompleks organik maddeler daha basit yapıya dönüştürülür. Hidroliz hızını etkileyen en önemli faktörler pH, sıcaklık ve çamur yaşıdır. Yağ, selüloz ve lignin gibi hidroliz hızı yavaş olan maddeler içeren atıksuların havasız arıtımında hidroliz kademesi hız sınırlayıcıdır.

Asit üretimi olan ikinci kademede, asetojenik bakteriler birinci kademe hidroliz ürünlerini asetik, bütirik, izobütirik, valerik ve izovalerik asit gibi ikiden daha fazla karbonlu yağ asitlerine dönüştürürler. Kararlı şartlarda yağ asitleri konsantrasyonu oldukça düşük seviyelerdedir (100-300 mg HAc/L) [6]. Kararlı olmayan şartlarda, örneğin havasız reaktörün devreye alınması aşamasında uçucu asit konsantrasyonu 1000-1500 mg HAc/L'ye ulaşabilir.

Üçüncü aşama olan metan üretimi kademesinde diğer iki kademede oluşan ürünler metan üreten arkelerce metan gazına dönüştürülür. Metan üretimi yavaş bir süreç olup havasız arıtmada hız sınırlayıcı safhadır. Metan, asetik asidin parçalanması ve/veya H_2 ile CO_2'in sentezi sonucu üretilir. Oluşan metanın yaklaşık %30'u H_2 ve CO_2'den, %70'i ise asetik asidin parçalanmasından oluşmaktadır. Hidrojenden metan oluşumu, hidrojenin elektron verici ve karbondioksitin elektron alıcı olarak kullanılması ile gerçekleşmektedir. Asetattan metan oluşumu ise; fermantasyon reaksiyonları sonucu astetatın, metil grubundan metanın, karboksil grubundan da karbondioksitin oluşması ile gerçekleşmektedir. Bu kompleks ve birbirlerine etki eden prokaryotik organizmalar literatürde temel olarak asit bakterileri ve metanojenler (arkeler) olarak tanımlanmaktadır.

Kompleks organiklerin metan gazına dönüştürülmesi esnasında organik asit ve hidrojen oluşum hızı, metan oluşum hızına göre daha yüksektir. Bunun sebebi, ilk aşamada gerçekleşen fermantasyon reaksiyonlarında oluşan serbest enerjinin metan oluşumundakinden daha fazla olmasıdır. Bu nedenle, metanojenlerin çoğalma hızları düşüktür ve proseste hız kısıtlayıcıdır. Ancak, hidrolizi zor olan kompleks yapıdaki organikleri içeren atıksu veya çamurun ayrıştırılmasında hidroliz aşaması hız kısıtlayıcı aşama olmaktadır [5].

8.2.2. Mikrobiyolojik Yapı

Anaerobik bozunma prosesi süresince birbirleriyle etkileşim halinde olan mikroorganizmaların birinci grubu, organik polimer ve yağların, monosakkaritler ve aminoasitler gibi daha basit ve temel yapılara hidroliz edilmesinden sorumludur. İkinci grup anaerobik bakteriler ise parçalanmış ürünleri organik asitlere dönüştürürler. Bu gruptaki mikroorganizmalar metanojik olmayan, fakültatif ve zorunlu anaerobik bakterilerdir. Bunlar literatürde "asitojenler" veya "asit üreticiler" olarak adlandırılırlar. Bu hidroliz ve fermantasyon bakterilerine *Clostridium spp., P eptococcus anaerobus, Bifidobacterium spp., Desulphovibrio spp., Corynebacterium spp., L actobacillus, Actinomyces, Staphylococcus* ve *Escherichia coli* gibi örnekler verilebilir. Üçüncü grup mikroorganizmalar da temel olarak, hidrojen (H_2 + CO_2) ve asetik asitten, metan gazı ve CO_2 üretenlerdir. Diğer substrat kaynakları format, metanol ve metilaminlerdir. Bu mikroorganizmaların gerçekleştirdiği metan oluşum reaksiyonları (8.1)-(8.5)'te verilmektedir. Bu organizmalar anaerobiktirler ve "metanojenler (arkea)" veya " metan üreticiler" olarak adlandırılırlar. Bu organizmalarda, çubuksu olan *Methanobacterium* ve *Methanobacillus* ile küresel olan *Methanococcus* ve *Methanosarcina* proseste baskın durumdadır.

(H_2 ve CO_2 için) $$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (8.1)$$

(format için) $$4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O \quad (8.2)$$

(asetik asit için) $$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (8.3)$$

(metanol için) $$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO2 + 2H_2O \quad (8.4)$$

(metilamin için) $$4(CH_3)_3N + H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 6H_2O + 4NH_3 \quad (8.5)$$

Havasız arıtma prosesleri içerisinde birbirleriyle ilişki halinde olan tüm bu mikroorganizmalar arasındaki enerji akımı vardır. Sistem stabilitesinin amaçlanan şekilde elde edilebilmesi için hidroliz ve fermantasyon bakterileriyle metanojenlerin birbirleriyle dinamik dengede olmaları gereklidir. Bu stabilitenin sağlanabilmesi temel olarak, ortamda oksijenin ve inhibe edici kimyasalların bulunmamasına ve gerekli çevre şartlarının sağlanmasına bağlıdır [7].

8.2.3. Biyoreaksiyonlar

Havasız arıtma proseslerinde organik maddelerin parçalanması çok sayıda mikrobiyal popülasyonun katkısı ile gerçekleşmektedir. Bakteri türlerinin çok olması parçalanmadaki reaksiyon adımlarını da çeşitli ve kompleks hale getirmektedir. Parçalanma reaksiyonlarındaki adımların KOİ akım yüzdeleriyle gösterimi Şekil 8.1'de verilmektedir. Şekil 8.1'de rol alan biyoreaksiyonların serbest enerji değerleri Tablo 8.3'te verilmektedir. Bu reaksiyonları sağlayan mikroorganizma popülasyonlarının dağılımı substrat yapısına, proses süresince oluşan ara ürünlerin konsantrasyonlarına ve pH, sıcaklık, H_2 konsantrasyonu gibi çevresel şartlara bağlıdır.

Anaerobik bozunmanın son kademesinde, asetik asitin metana dönüşümü metanojenler tarafından sağlanır. Bunlar asetik asiti kullanarak metan üreten arkelerdir (AMA) ve en önemlileri *Methanothrix* ile *Methanosarcina*'dır. Her iki mikroorganizmanın çoğalma hızı düşüktür ve ikilenme süreleri yaklaşık olarak 24 saattir. Ayrıca bunların aktiviteleri ortamdaki hidrojenin varlığına bağlıdır. Karbondioksitten metan oluşumu ise hidrojen kullanan metanojenler (HMB) tarafından gerçekleştirilen metanojik solunum ile olur. Bunlar AMA'lara göre daha hızlı çoğalırlar ve ikilenme süreleri 4 ila 6 saat arasındadır [1].

Tablo 8.3. Bazı anaerobik biyoreaksiyonların serbest enerji değerleri [1]

Oksidasyon Reaksiyonları	***Reaksiyon***	***ΔG_0, kJ***
propiyonat → asetat	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$	*+76,1*
bütirat → asetat	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	*+48,1*
etanol → asetat	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	*+9,6*
laktat → asetat	$CHCHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HC\ O_3^- + H^+ + 2H_2$	*-4,2*
laktat → propiyonat	$3CHCHOHCOO^- \rightarrow 2CH_3CH_2COO^- + CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^-$	*-165*
laktat → bütirat	$2CHCHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3CH_2CH_2COO^- + 2HCO_3^- + 2H_2$	*-56*
asetat → metan	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow HC\ O_3^- + CH_4$	*-31*
glikoz → asetat	$C_6H_{12}O_6 + 4H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + 2HCO_3^- + 4H^+ + 4H_2$	*-206*
glikoz → etanol	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2HCO_3^- + 2H^+$	*-226*
glikoz → laktat	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CHCHOHCOO^- + 2H^+$	*-198*
glikoz → propiyonat	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COO^- + 2H_2O + 2H^+$	*-358*
Solunum Reaksiyonları		
$HC\ O_3^-$ → asetat	$HC\ O_3^- + 4H_2 + H^+ \rightarrow CH_3COO^- + 4H_2O$	*-104,6*
$HC\ O_3^-$ → metan	$HC\ O_3^- + 4H_2 + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	*-135,6*
sülfat → sülfit	$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$ $CH_3COO^- + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$	*-151,9* *-59,9*
nitrat → amonyak	$NO_3^- + 4H_2 + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$ $CH_3COO^- + NO^- + H^+ + H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + NH_4^+$	*-599,6* *-511,4*
nitrat → azot gazı	$2NO_3^- + 5H_2 + 2H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O$	*-1120,5*

8.2.4. Mikroorganizmalar Arasındaki Karşılıklı İlişkiler

Havasız arıtmada 3 grup bakterinin ortak çalışması gerekmektedir. Asetat kullanan metanojenler, fermantasyon bakterileri ile müşterek çalışarak asetik asit konsantrasyonunu ve pH değerini kontrol ederler. Asetat kullanan metanojenlerin çoğalma hızları fermantasyon bakterilerine göre daha yavaş olduğundan organik yükün artması durumunda asit üretimi istenilen düzeyde gerçekleşebildiği halde, metan üretimi aynı hızda olmayabilir ve reaktörde aşırı asit birikimi ile karşılaşılabilir.

Gaz fazındaki H_2 konsantrasyonunun artması halinde hidrojen kullanan metanojenlerce CO_2 ve H_2'den CH_4 üretimi azalmaktadır. Organik madde ortama ani olarak verildiğinde fermantasyon bakterileri bu şok yüke kısa sürede uyum göstererek asetik asit ve hidrojen gazı üretirler. Ancak, bu durum pH'ı düşürür ve metanojenlerin rol oynadığı reaksiyonların hızını yavaşlatarak ortamda H_2 birikmesine neden olur.

Kompleks organik maddelerin metana dönüştürülmesinde hidrojen üreten ve hidrojen kullanan mikroorganizmaların yine müşterek çalışması önemlidir. Buna göre, propiyonik asitin, asetik asit ve hidrojene parçalanabilmesi için ortamdaki H_2'nin kısmi basıncının 10^{-4} atmosferi (100 mg/L) aşmaması gerekmektedir. Bu düşük basınç ortamında hidrojen kullanan metanojenler için gerekli enerji, kısmi basıncın 1 atm olması haline göre önemli ölçüde azaltılmış olmakta ve sonuç olarak reaksiyon kolaylaşmaktadır. Diğer bir ifadeyle, birim hacim H_2'yi kullanmak için gerekli bakteri miktarı daha az olmaktadır. Bu nedenle, H_2 kullanan metan arkelerinin maksimum hızla faaliyeti için H_2 kısmi basıncının $10^{-4} - 10^{-6}$ atm aralığında tutulması büyük önem taşımaktadır [6].

Ortamda elektron vericisi olarak sülfatın bulunması durumunda, sülfat indirgeyen bakteriler de aktif hale gelmektedir. Sülfatın sülfide indirgenmesi esnasında hidrojen kullanımı olur. Bu durumda, sülfat indirgeyen bakteriler, metanojen ve homoasitojenlerle rekabete girerler. Ortamda H_2 konsantrasyonunun kısıtlı olması durumunda, rekabet halinde olan bu bakterilerin

aktiviteleri, sülfat indirgeyenler > metanojenler > homoasitojenler şeklinde sıralanmaktadır ve prosesteki biyolojik dengenin bozulma riski vardır [8].

8.2.5. Metanojen Popülasyonun pH İle Değişimi

Anaerobik arıtmada pH temel proses kontrol parametrelerindendir. Metanojenler pH değişimine hassastırlar ve buna bağlı olarak da, metan üretimindeki reaksiyonları değişiklik göstermektedir. Metan gazının hidrojen veya asetik asit kullanılarak meydana gelme yüzdeleri en ufak pH değişimi ile farklılık gösterir. Biyoreaksiyon adımlarındaki bu değişim Şekil 8.2'de verilmektedir. Burada pH'ın ≈7,0 değeri ve pH'ın 5,0-6,0 aralığındaki değerleri için metanolün parçalanma reaksiyonlarındaki baskın adımlar gösterilmektedir.

Şekil 8.2. Metanolden metan üretimi (a) pH ≈ 7,0 için, (b) pH = 5,0-6,0 için [9]

Metanolden metan üretimi aşamalarında pH ≈ 7,0 değeri için I. ve II. adımların baskın olduğu ve ortamda asetik asit birikiminin yaşanmadığı belirlenmiş, buna karşılık, pH 5,0-6,0 aralığında ise metan oluşumunda hidrojen kullanan metanojenlerin daha aktif olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ortamda asetik asit birikmesi gözlenmiş ve bunun nedeninin düşük pH değerlerinde asetik asitten metan oluşumunu sağlayan metanojenlerin aktivitesinin düşmesi olduğu saptanmıştır [9].

8.2.6. Temel Proses Kinetiği

8.2.6.1.Mikroorganizma Reaksiyon Kinetiği

Biyolojik sistemlerde reaksiyonlar mikroorganizmalarca gerçekleştirildiğinden reaktör kinetiği mikrobiyal aktiviteye bağlıdır. Bu nedenle, proses davranışlarının tahmininde mikrobiyal büyüme, substrat kullanımı ve ürün oluşumu iyi bilinmelidir.

Biyokütle Çoğalma Hızı:

Ortamda mikroorganizmalar için enerji, karbon kaynağı ve elektron alıcısı gereksinimlerinin tam olması durumunda biyokütle çoğalma hızı [1]:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \tag{8.6}$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir.

Burada;

X : biyokütle konsantrasyonu (mg UAKM/L)
μ : biyokütle özgül çoğalma hız sabiti (gün^{-1})

Substrat Kullanım Hızı:

Substrat kullanım hızı, biyokütle konsantrasyonuna bağlı olarak, birinci derece kinetik ile aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir [10]:

$$\frac{dS}{dt} = \mathrm{q\,X} \tag{8.7}$$

Burada;

q : substrat kullanım hızı sabiti (gün^{-1})

Substrat kullanımı ile biyokütle çoğalması arasındaki ilişki:

$$Y = \frac{dX/dt}{dS/dt} \tag{8.8}$$

şeklinde verilmektedir. Burada;

Y : biyokütle dönüşüm oranı (mg UAKM/mg KOİ)

Denklem (8.6), (8.7) ve (8.8)'e bağlı olarak;

$$Y = \mu/q \tag{8.9}$$

olmaktadır.

Biyokütle Ölüm Hızı:

Biyokütle ölüm kinetiği, biyokütle konsantrasyonuna bağlı olarak:

$$\frac{dX}{dt} = \mathrm{b\,X} \tag{8.10}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;

b : biyokütle içsel solunum hızı (gün^{-1})

Net Biyokütle Değişimi:

Net biyokütle değişimi çoğalma hızı ile ölüm hızı toplanarak belirlenir ve Denklem (8.11) ile ifade edilmektedir:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{net} = Y\left(\frac{dS}{dt}\right) - b\,X \tag{8.11}$$

8.2.6.2.Mikroorganizma Çoğalma Kinetiği

Anaerobik proseslerde substrat kompleks yapıda olduğundan ve buna bağlı olarak çeşitli mikroorganizma türleri görev yaptığından, çoğalma kinetiği farklı şekillerde ifade edilmektedir

Monod İfadesi:

Mikroorganizma çoğalma hızı zamanla hız kısıtlayıcı olan substrat konsantrasyonuna bağlı olarak ifade edilmektedir:

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S}{Ks + S} \tag{8.12}$$

şeklinde verilmektedir. Burada;

μ_{maks} : mikroorganizmaların maksimum çoğalma hız sabiti (gün^{-1})
S : substrat konsantrasyonu (mg KOİ/L)
Ks : yarı doygunluk sabiti (KOİ/KOİ$_{hücre}$)

Denklem (8.12) substratın kısıtlayıcı olmadığı durumda ($S >> K_S$)

$$\mu = \mu_{maks} \tag{8.13}$$

ve substratın kısıtlayıcı olduğu durumda ise ($S << K_S$)

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S}{Ks} \tag{8.14}$$

olmaktadır.

Contois İfadesi:

Mikrobiyal popülasyon yoğunluğunu belirleyen kütle transferinin büyüme hızı üzerine etkisini yansıtan mikroorganizma çoğalma hızı:

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S}{K\,X + S} \tag{8.15}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada;

K : kinetik sabit

Chen ve Hashimoto İfadesi:

Giriş substrat konsantrasyonu etkisinin Contois ifadesine ilavesi ile geliştirilmiştir:

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S}{K\,S_0 + (1 - K)\,S_0} \tag{8.16}$$

Burada;

S_0 : giriş substrat konsantrasyonu (mg KOİ/L)

Çoklu Substrat Kullanım İfadesi:

Ortamda iki farklı substratın olması durumunda iki ayrı substrat kısıtlayıcı denklem tanımlanmıştır ve ifade Denklem (8.17) ile verilmektedir:

$$\mu = \mu_{maks} \frac{S_1}{K_{s1}\,S_1} \frac{S_2}{K_{s2}\,S_2} \tag{8.17}$$

8.2.6.3.Kinetik ve Stokiyometrik S abitler

Proseslerin tam olarak matematiksel ifadelerinin yazılabilmesi için kinetik ve stokiyometrik sabitlerin değerleri belirlenmelidir. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonucunda bazı organik maddelere ait sabitler belirlenmiştir ve Tablo 8.4 ile Tablo 8.5'te verilmiştir [1].

Hidroliz aşamasının birinci derece reaksiyon ifadesindeki denklem sabitinin (K) literatürdeki değerleri, farklı organik maddeler için Tablo 8.4'te verilmektedir. Monomerlerin fermantasyonunda aminoasit ve şeker substratları için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen fermantasyon sabitleri ise Tablo 8.5'te verilmektedir.

Tablo 8.4. Hidroliz sabiti değerleri

Organik Madde	*K (gün^{-1})*
Karbonhidratlar	*0,5-2*
Yağlar	*0,1-0,7*
Proteinler	*0,25-0,8*

Tablo 8.5. Fermantasyonun kinetik ve stokiyometrik sabitleri

Sabitler	*Değer*
μ_{maks} *(gün^{-1})*	*3-9*
q_{maks} *(g KOİ/g KOİ gün)*	*24-120*
Ks (mg/L)	*300-1400*
Y (g UAKM/g KOİ)	*0,1-0,06*
b (gün^{-1})	*0,02-0,3*

Hidrojen üreten asitojenler için uzun zincirli yağ asitlerinin veya uçucu yağ asitlerinin kullanılması durumuna göre sabitler Tablo 8.6'da verilmektedir [1]. Metanojenler için ise stokiyometrik ve kinetik sabitler metan üretiminde hidrojenin veya asetatın kullanılmasına göre değişik değerler almaktadır. Bu değerler Tablo 8.7'de verilmektedir [1].

Tablo 8.6. Asitojenler için kinetik ve stokiyometrik sabitler

Sabitler	*Kısa Zincirli Yağ Asitleri*	*Uçucu Yağ Asitleri*
μ_{maks} *(gün^{-1})*	*0,1-0,5*	*0,3-1,3*
q_{maks} *(g KOİ/g KOİ gün)*	*2-20*	*5-20*
Ks (mg/L)	*100-4000*	*100-4000*
Y (g UAKM/g KOİ)	*0,04-0,1*	*0,02-0,07*
b (gün^{-1})	*0,01*	*0,01-0,04*

Tablo 8.7. Metanojenler için kinetik ve stokiyometrik sabitler

Sabitler	*Kısa Zincirli Yağ Asitleri*	*Uçucu Yağ Asitleri*
μ_{maks} *(gün^{-1})*	*0,1-0,4*	*1-4*
q_{maks} *(g KOİ/g KOİ gün)*	*2-7*	*25-35*
Ks (mg/L)	*50-600*	*0,01-0,1*
Y (g UAKM/g KOİ)	*0,02-0,05*	*0,01-0,04*
b (gün^{-1})	*0,02-0,04*	*0,01-0,04*

8.2.7. Biyogaz Üretimi

Havasız arıtma prosesinde son ürün olarak üretilen metanın KOİ eşdeğeri aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanabilir:

$$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O \qquad (8.18)$$

Denkleme göre standart şartlar altında (0°C , 1 atm basınçta) 1 mol CH_4'ün (22,4 litre) oksidasyonu için 2 mol (64 g) O_2 gereklidir. Standart şartlarda giderilen 1 g KOİ için 0,35 L CH_4 üretilir. Bu miktar, 35°C sıcaklık ve 1 atm basınçta 0,395 L CH_4/gr $KOİ_{giderilen}$'e tekabül etmektedir.

Mezofilik işletme şartlarında endüstriyel ölçekli havasız arıtma tesislerinde 0,2-0,5 m^3 gaz/kg $KOİ_{giderilen}$ mertebesinde biyogaz oluşmaktadır. Biyogazın enerji değeri 6,5-8 kWsa/m^3 olup,

% 65-80 oranında metan içermektedir (Tablo 8.8). Yakma ekipmanında ortalama (elektrik + ısı) verim % 80 alınarak, giderilen 1 kg KOİ'nin enerji eşdeğeri:

$0{,}4 * 0{,}80 * (6{,}5 \approx 8) \approx\ 2{,}1 - 2{,}6$ kWsa olarak bulunur.

Tablo 8.8. Çeşitli atıklardan üretilen biyogazların CH_4 içeriği ve enerji içerikleri

Biyogaz tipi	*CH_4, %*	*Enerji İçeriği, kWsa/m^3*
Çamur çürütücü gazı	*60-70*	*6-7*
Havasız endüstriyel atıksu arıtma tesisi gazı	*50-85*	*5-8,5*
Çiftlik atıklarının havasız arıtımından çıkan gaz	*55-75*	*5,5-7,5*
Çöp depolama sahası gazı	*35-55*	*3,5-5,5*

Elektrik enerjisine dönüşüm verimi klasik içten yanmalı motorlarda % 30-35, gaz türbinlerinde ise %50 civarındadır.

8.2.8. Havasız Arıtımda Alkalinite İhtiyacı

Havasız reaktörlerde, CO_2 kısmi basıncı ile ortamdaki karbonat konsantrasyonu arasında Denklem (8.19)'daki ilişki vardır.

$$[H_2CO_3] = k_H\ P_{CO2} \tag{8.19}$$

$$k_1 = \frac{[HCO_3^-]\ [H^+]}{H_2CO_3} \tag{8.20}$$

$$[H^+] = \frac{k_1\ k_H\ P_{CO2}}{HCO_3^-} \tag{8.21}$$

T =35°C'de:

İyonik güç (IG) = 0,2 için $k_1 = 10^{-6}$

IG = 0 için $k_1 = 0{,}48 * 10^{-6}$

$k_H = 0{,}0246$ mol/L atm

$[H^+] = 12{,}8 * 10^{-4}\ [P_{CO2}/B_{Alk}]$, IG = 0,2

$[H^+] = 6{,}2 * 10^{-4}\ [P_{CO2}/B_{Alk}]$, IG = 0

Toplam alkalinite bikarbonat alkalinitesi ve uçucu asit alkalinitesi arasında (7.21)'de verilen bağıntı geçerlidir:

$$TA = B_{Alk} + (0{,}83)\ (0{,}85)\ TUA \tag{8.22}$$

Burada;

B_{Alk} : bikarbonat alkalinitesi, mg $CaCO_3$/L
TUA : toplam uçucu asit alkalinitesi, mg HAc/L
0,85 : pH=4'te titre edilen TUA'nın % 85'ini
0,83 : $CaCO_3$ (ea)/HAc(ea)=50/60
ea : eşdeğer ağırlık

TUA alkalinitesi H_2CO_3'ün tamponlanmasında katkı sağlar, ancak iyonize olmamış uçucu asitlerin tamponlanmasında yetersiz kalır. Bu yüzden TUA alkalinitesinin tampon etkisi ihmal edilir. Bikarbonat alkalinitesi önem taşır. Bikarbonat alkalinitesi hesaplanırken asit titrasyonu pH=4,0-4,2 yerine 5,8'de kesilir. Bu pH'ta $B_{Alkalinitesi}$'nin % 80'i, TUA alkalinitesinin ise çok küçük bir kısmı titre edilmiş olur.

Havasız reaktörlerde pH>6,2-6,5 ise belli miktarda rezerv alkalinite vardır. Rezerv alkalinite sadece $B_{Alkalinitesi}$'ni yansıtır.

Havasız arıtma sistemlerinde alkalinite ihtiyacını azaltmak üzere:

- Arıtılmış su geri devri
- Üretilen biyogazın bünyesindeki CO_2'nin alkali sıvı çözeltilerde (kireç, kostik) absorblandıktan sonra reaktör tabanından geri beslenmesi
- Termofilik şartlarda işletme
- Faz ayrımı

gibi yöntemler uygulanır.

8.2.9. Sülfatın Havasız Arıtmaya Etkisi

Bazı endüstriyel atıksularda (örneğin maya üretim atıksuyu) ve evsel atıksularda bulunan sülfat iyonları havasız arıtım sırasında sülfür iyonlarına dönüşür. Sülfür iyonlarının havasız arıtımı inhibe etmesi yanı sıra, arıtma ekipmanlarında korozyona ve kokuya yol açması sebebiyle, sülfat parametresi atıksuların havasız ayrıştırılması sırasında dikkatle izlenmelidir. Yüksek miktarda sülfat içeren endüstriyel atıksuların arıtımında faz ayrımına dayanan bir ön arıtma yaklaşımı (iki kademeli arıtım) uygulanabilir [11].

Havasız ayrışma sırasında ortamdaki sülfat iyonları sülfat indirgeyen bakterilerin (SRB) artmasına neden olur. Sülfat indirgeyen bakteriler metan indirgeyen bakterilerle aynı substrat için (H_2 ve asetat) yarışırlar. Sülfatın asetik asit kullanarak hidrojen ve sülfüre dönüşümü reaksiyonu [6]:

$$CH_3COOH+SO_4^{-2}\rightarrow H_2S+2HCO_3^- \qquad (8.23)$$

Genel reaksiyon ise Denklem (8.24)'deki gibi yazılabilir:

$$2C + SO_4^{-2} + 2H_2O \rightarrow H_2S + 2HCO_3^- \qquad (8.24)$$

Sülfat indirgeyici bakteriler asetat dışında şekerler, alkoller, poliol, gliserol, aminoasitler, fenolik bileşikler, propiyonik asit, peynir altı suyu, laktik asit, sitrik asit, ve evsel atıksu gibi substratları da kullanırlar [5], [8].

Sülfat indirgenmesinden dolayı iki tür inhibisyon olur [4]: i) substrat için rekabetten dolayı inhibisyon, ii) çözünmüş sülfür iyonlarının metanojenlerin hücre fonksiyonlarını etkilemelerinden dolayı olan inhibisyon.

Sıvı fazda ortam pH'ına bağlı olarak H_2S, S^{-2} ve H^+ iyonları arasında bir denge vardır:

$$H_2S \leftrightarrow 2H^+ + S^{-2} \qquad (8.25)$$

Nispeten asidik ortamda S 'nin büyük bölümü daha az toksik olan H_2S halindedir. Atıksudaki KOİ/SO_4 oranı >10 ise oluşan sülfürün büyük bölümü H_2S formunda ve gaz fazda, KOİ/SO_4<10 ise oluşan sülfürün büyük bölümü S^{-2} formunda ve sıvı fazda bulunur. Havasız arıtılmış suda bulunan S^{-2} ani oksijen kullanımına yol açacağından arıtılmış suyun yüzey sularına deşarjında dikkate alınmalıdır.

8.3. Havasız Arıtma Teknolojileri

Havasız reaktörler üst kısmı kapalı ve hava ile temas olmayacak şekilde inşa edilirler. Tank içerisinde karışım, atıksuyun tabandan beslenmesi, oluşan biyogazın hareketi veya geri devri, mekanik karıştırıcılar ve/veya çamur geri devri yoluyla sağlanmaktadır. Ayrışmanın daha hızlı

ve tam olması için reaktör ısıtılır. Bunun için gerekli olan enerji, proses esnasında üretilen biyogazdan sağlanabilmektedir. Tüm reaktörlerde sıvı-katı-gaz fazlarının birbirlerinde ayrılması amaçlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yüksek-hızlı havasız reaktörler Şekil 8.3'te verilmektedir.

8.3.1. Havasız Reaktör Tipleri

Anaerobik reaktör tipleri; mikroorganizmaların askıda çoğaldığı reaktörler ve biyofilm reaktörler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

8.3.1.1.Askıda Çoğalan Sistemler

Askıda çoğalan sistemlerin başlıca uygulamaları:

- Klasik havasız çürütücüler
- Havasız temas reaktörleri
- Membranlı havasız reaktörler
- Havasız çamur yataklı reaktörler

Bu sistemlerin reaktör tipleri Şekil 8.3'te verilmektedir.

Klasik anaerobik çürütücüler; tam karışımlı ve geri devirsiz reaktörlerdir. Geri devirsiz olduklarından çamur yaşı hidrolik bekletme süresine eşittir. Yavaş çoğalan metan arkelerinin sistemden yıkanmaması için çamur yaşı en az 10 gün olmalıdır. Bu nedenle, 15-20 günlük hidrolik bekletme sürelerinde işletilirler ve buna bağlı olarak, reaktör hacimleri büyüktür. Hem hacmin büyüklüğü, hem de çıkış suyundaki askıda katı madde konsantrasyonunun yüksekliği bu sistemlerin en önemli mahzurlarındandır. Uygulamada, atıksuların arıtılmasından ziyade arıtma çamurlarının çürütülmesi için kullanılırlar.

Şekil 8.3. Askıda çoğalan reaktör tipleri [6]

Havasız temas reaktörleri, klasik anaerobik çürütücülere çökeltim tankı ilavesi ile geliştirilmiştir. Çökeltim tankının olması, sisteme geri devir yapılabilmesini mümkün kıldığından daha uzun çamur yaşlarında işletilebilirler. Böylece, hidrolik bekletme süresi azaltılarak reaktör hacimleri küçültülmektedir [6]. Bu sistemlerde yaşanan en önemli problem çamurun çöktürülmesidir. Çökeltim tankına reaktör çıkış suyu ile aktarılan biyokütle çökelme esnasında da biyogaz oluşturmaya devam eder ve çökelme istenilen etkinliğe ulaşamaz [5]. Çökeltim verimini arttırmak için vakumlu gaz ayırıcı, termal şok veya plakalı çökelticiler kullanılmaktadır.

Membranlı havasız reaktörlerde ana reaktör tam karışımlı bir anaerobik reaktör olup katı madde ayrımı için çökeltme yerine ultrafiltrasyon birimi kullanılır. Membran üzerinde akarken suyu alınan biyokütle sisteme geri döndürülerek çamur yaşı istenilen seviyede tutulmaktadır. Genelde KOİ konsantrasyonu 10.000 mg/L'nin üzerindeki konsantre ve debisi küçük endüstriyel atıksular için uygun sistemlerdir.

Havasız çamur yataklı reaktörlerde (HÇYR) arıtma, reaktörün alt kısmındaki granüler çamur yatağı ile bunun üst kesimindeki çamur örtüsünde gerçekleşir. Beslenen atığın organik madde muhtevasına bağlı olarak kuvvetli atıklarda çamur yatağı, seyreltik atıklarda ise çamur örtüsü arıtmada ağırlıklı rol oynamaktadır [6]. Atıksu reaktöre tabandan ve uygun yukarı akım hızında verilerek reaktörde çamur yatağının genleşmesi sağlanır. Bunun sonucu olarak, granüler çamur ile atıksuyun teması arttırılmış olur. Çamur yatağının genleşmesi ile etkin çökelmenin birlikte sağlanabilmesi için gerekli yukarı akış hızı 0,5-3 m/sa'tir. Ancak, gerekli karışımın sağlanamadığı durumlarda bu değer 6 m/sa'e kadar arttırılabilir [12]. Yapılan araştırmalar sonucunda, granüler çamur oluşumunun 15 mg/L Ca^{2+} ile arttırılabileceği ve 5-10 mg/L Fe^{2+} ilavesi ile de filamentli bakterilerin oluşumunun engellenebileceği bulunmuştur. Kararlı işletim halindeki bir reaktörün çamur yatağında 100-150 g/L konsantrasyonunda çamur bulunabilmektedir. Bu da, yüksek organik yüklemelerde çalışmayı mümkün kılmaktadır. Pilot tesislerde yapılan çalışmalarda, 15-40 kg KOİ/m^3.gün aralığındaki yüklemelerde 3-8 saatlik bekletme süreleri ile etkin giderme verimlerinin sağlanabileceği tespit edilmiştir.

HÇYR sisteminde anaerobik ayrışma, atıksu çamur yatağından yukarı çıkarken gerçekleşir ve bu esnada biyogaz üretimi olur. Oluşan biyogaz reaktörün sıvı-katı-gaz ayırıcı birimine ulaştığında ortamdan ayrılır. Bu esnada, yukarı ulaşan biyokütle de sıvı fazdan ayrılarak tekrar çamur yatağına döner ve çıkışta katı madde gözlenmez.

Reaktörün proses stabilitesi, çamur çökelmesinde yaşanan problemlerden veya granüler çamurun aktivitesinin düşmesinden kolayca etkilenmektedir. Çamurun çökelmesinde yaşanan problemler çamur yatağının homojenliğini bozar ve çamurun aşırı kabararak sistemden kaçmasına neden olur. Atıksu içerisindeki inorganik bileşenlerin artması ise granüler çamurun aktivitesinin düşmesine neden olabilmektedir. Ayrıca, giriş suyunda askıda katı madde ve yağ muhtevasının artması tıkanma, çamur yatağında kanallanma ve köpük oluşumu gibi işletme problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

8.3.1.2.Biyofilm Sistemleri

Biyofilm sistemlerinin başlıca uygulamaları:

- Havasız akışkan yataklı reaktörler (HAYR)
- Havasız filtreler (HF)
- Havasız döner diskler
- Perdeli (dolgulu) reaktörler

Bu sistemlerin reaktör tipleri Şekil 8.4'te verilmektedir.

Şekil 8.4. Biyofilm sistemlerinin reaktör tipleri [6]

Havasız akışkan yataklı reaktörlerde (HAYR) biyokütle akışkan haldeki, 0,1-0,6 mm çaplı kum, antrasit, aktif karbon gibi ince tanecikli yatak malzemesi üzerinde tutunur. Akışkan haldeki yatak malzemesinin üzerinde 30.000 mg/L gibi yüksek konsantrasyonlarda biyokütle tutulabilmektedir. HAYR'ler 40-60 kg KOİ/m^3gün gibi çok yüksek organik yükler

uygulanabilen ve hidrolik bekletme süresi 1,5-3 saate kadar indirilebilen sistemlerdir. Bunların en büyük mahzuru, yatağın akışkan tutulabilmesi için gerekli olan geri devirdeki terfi maliyetidir.

Havasız filtreler; içerisinde kırma taş veya plastik dolgu malzemesi bulunan reaktörlerdir. Yukarı veya aşağı akışlı olarak işletilebilirler. Dolgu malzemesi bakterilerin tutunması için yüzeyi arttırır. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar sonucunda, filtre içerisindeki mevcut biyokütlenin takriben %60'ının filtre malzemesinin boşluklarında bulunduğu ve arıtmanın büyük bir kısmının burada gerçekleştiği tespit edilmiştir. 100.000 mg/L konsantrasyonlarında biyokütle filtre içinde tutulabilmektedir. Çeşitli inhibitörler karşısında biyokütle kaybı sınırlı olup, sistemin yeni durumlara uyum sağlaması daha rahat olabilmektedir. Buna karşılık, biyofilm teşekkülünün zaman alması, yüksek oranda askıda katı madde ihtiva eden atıksularda tıkanma, kanallanma ve kısa devre ihtimalleri oluşu ve özellikle dolgu malzemesinin pahalı olması bu reaktörlerin önemli mahzurlarındandır [6].

8.3.1.3.Diğer Sistemler

Farklı olarak uygulanan diğer reaktör tiplerinin başlıcaları:

- Hibrit filtreler
- İki kademeli reaktörler
- Havasız kompost reaktörleri

Bu uygulama tipleri Şekil 8.5'te verilmektedir.

Hibrit filtreler; alt kısım havasız çamur yatağı üst kısım ise havasız filtre olarak teşkil edilir. Filtre kısmındaki dolgu malzemesi yüksekliği 2 m'den az olmayacak şekilde filtre kısmı toplam hacmin %50-70'ini kapsamalıdır. Bu reaktörlerde biyolojik arıtmanın büyük kısmı çamur yatağında gerçekleşir. Üst kısımdaki filtre yapısı sıvı ve katı fazların ayrımını sağlar ve biyokütle kaçışını engeller. Ancak son uygulamalarda dolgu malzemesi içinden geçen biyogazdan dolayı çökelmede istenilen etkinliğin sağlanamadığı saptanmıştır. Bu nedenle, dolgulu kısmın reaktör dışında ayrıca teşkilinin daha faydalı olacağı belirtilmiştir. Havasız çamur yataklı filtrenin 5-10 kg KOİ/m^3gün'lük organik yüklerde başarıyla çalışan birçok kurulu örneği bulunmaktadır.

İki kademeli reaktörlerde, asit ve metan üretimi ayrı reaktörlerde gerçekleştirilir. Faz ayırımının uygulanmasıyla havasız arıtmada organik yükün % 50'ye yakın oranda arttırılması mümkündür. Böyle bir uygulama ile toplam hacimde % 30-40 oranında bir küçülme sağlanabilmektedir. Tam karışımlı bir havasız tank veya derin havasız lagün asit reaktörü olarak kullanılabilir [6].

Havasız reaktörlerin, tek veya iki kademeli işletme tipine göre genel karşılaştırılması Tablo 8.9'da verilmektedir.

Tablo 8.9. Tek ve iki kademeli işletmenin mukayesesi [6]

Üstünlükler	***Tek kademeli***	***İki kademeli***
	Daha az yatırım maliyeti *İşletme ve kontrol kolaylığı*	*Daha hızlı işletmeye alma* *Prosesin daha kararlı olması* *Arıtma veriminin daha yüksek oluşu* *Katı organik maddelerin daha iyi ayrışması*
Kısıtlar		
	Daha uzun sürede işletmeye alma *Daha kararsız proses* *Organik yük değişimlerine daha hassas oluşu*	*Daha yüksek yatırım maliyeti* *Kontrolün daha zor oluşu* *Dikkatli pH kontrolü gerekliliği*

8.3.2. Havasız Reaktörlerin Karşılaştırılması

Hacimsel organik yükün olabildiğince yükseltilmesi, havasız reaktör hacminin küçültülmesi ve karşılaşılan problemlerin giderilmesi için geliştirilen havasız arıtma sistemlerinin organik yük ve KOİ giderme verimleri bakımından karşılaştırılmaları Tablo 8.10'da verilmektedir.

Tablo 8.10. Havasız arıtma sistemlerinin, organik yük ve verim bakımından karşılaştırılması [6]

Reaktör Tipi	*Organik yük (kg KOİ/m^3.gün)*	*KOİ giderme verimi (%)*
Havasız temas reaktörü	*1-6*	*80-95*
Havasız filtre	*1-18*	*80-95*
Havasız akışkan yataklı reaktör	*1-60*	*80-90*
Havasız çamur yataklı reaktör	*5-15*	*85-95*
Membranlı havasız reaktör	*1-30*	*85-95*

Endüstriyel atıksuların arıtımı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan havasız çamur yataklı reaktörler, havasız filtreler ve havasız akışkan yataklı reaktörlerde yaşanan en önemli işletme sorunları Tablo 8.11'de verilmektedir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan reaktörlerin genel fayda ve kısıtları Tablo 8.12'de belirtilmektedir.

Tablo 8.11. Endüstriyel atıksuların arıtımı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan havasız çamur yataklı reaktörler, havasız filtreler ve havasız akışkan yataklı reaktörlerde yaşanan en önemli işletme sorunları

HÇYR	*HF*	*HAYR*
• *Yatak genleşmesinin kontrol güçlüğü*	• *Giriş akımının üniform dağıtılma zorluğu*	• *Yatak genleşmesini kontrol güçlüğü*
• *Değişken giriş suyu özelliklerine bağlı proses stabilitesi sorunu*	• *Yatakta tıkanma ve kanallanma riski*	• *Giriş akımını üniform dağıtma güçlüğü*
• *Şok yüklerde biyokütle kaybı*	• *Filtrenin periyodik olarak geri yıkanması gerekliliği*	• *Biyopartikül kaçışı*
• *İnert katı madde birikimi*	• *İnert katı madde birikimi*	• *Akışkanlanma özelliklerinin değişkenliği*
• *Biyokütle yüzmesi*	• *Çıkışta AKM ayırma (çökelme) ihtiyacı*	• *Biyofilm kopması*
		• *Vanalarda arıza*
		Sürekli geri devir gereği

8.4. İşletmeye Alma ve Proses Kontrolü

Havasız arıtma süreçlerinde birçok faktör arıtma verimini etkilemektedir. Bunlar; hidrolik bekletme süresi (θ_h), çamur yaşı ve hacimsel organik yükleme (L_v) gibi yükleme faktörleri, sıcaklık, pH, besi maddesi, toksik maddeler gibi çevresel faktörler veya karıştırma ve atıksu özellikleri gibi işletme faktörleridir [12].

Tablo 8.12. Havasız reaktörlerin üstünlük ve kısıtları [12]

Reaktör Tipi	*Avantajları*	*Kısıtları*
Klasik havasız çürütücü	*Farklı atıksular için uygundur. Yüksek askıda katı madde içeren atıksularda etkili olarak uygulanır. Tam karışım ile homojen ortam kolaylıkla sağlanır. Verim çamur stabilitesine bağlı değildir. Özellikle biyolojik çamurda etkili arıtım sağlar.*	*Geniş reaktör hacmi gereklidir. Parçalanamayan organik madde girişi ile çıkış kalitesi düşer. Aşırı biyokütle olması çıkış kalitesini düşürür. Düşük çamur yaşlarında stabilite ve verim çok düşer. Mekanik karıştırıcı gereklidir.*
Havasız temas reaktörü	*Konsantre atıksular için uygundur. Tam karışım ile homojen ortam kolaylıkla sağlanır. Diğerlerine göre daha yüksek kaliteli çıkış suyu elde edilir. Klasik havasız çürütücüye göre reaktör hacmi azdır. Özellikle biyolojik çamurda etkili arıtım sağlar. Proses kontrolü kolaylıkla yapılır.*	*Biyokütle stabilitesi etkin verim için kritiktir. Sistem mekanik olarak komplekstir. Düşük hidrolik bekletme sürelerinde stabilite sağlanamaz.*
Havasız çamur yataklı reaktör	*Yüksek biyokütle konsantrasyonları ve uzun çamur yaşları sağlanır. Yüksek hacimsel organik yükleme yapılabildiğinden hacimleri çok daha azdır.*	*Verim granüler çamur oluşumuna bağlıdır. Atıksu askıda katı madde içerirse çok düşük yüklerde çalışılır. Deneyime bağlı olarak reaktör tipi değişir. Proses kontrolü tam sağlanamaz. Düşük hidrolik bekletme sürelerinde stabilite sağlanamaz*
Havasız akışkan yataklı reaktör	*Yüksek biyokütle konsantrasyonları ve uzun çamur yaşları sağlanır. Yüksek hacimsel organik yükleme yapılabildiğinden hacimleri çok daha azdır. Çok iyi kütle transferi mevcuttur. Yüksek kalitede çıkış sağlanır. İnşa alanı ihtiyacı çok azdır. Verim granüler çamur oluşumundan bağımsızdır. Etkin karışım sağlanır. Proses kontrollüdür.*	*Uzun başlangıç evresi gerekli Çamur yatağının akışkanlaşması ve genleşmesi için yüksek enerji gereklidir. Mekaniksel olarak komplekstir. Dolgu malzemesi maliyeti vardır. Düşük hidrolik bekletme sürelerinde stabilite sağlanamaz.*
Havasız filtre	*Yüksek biyokütle konsantrasyonları ve uzun çamur yaşları sağlanır. Yüksek hacimsel organik yükleme yapılabildiğinden hacimleri çok daha azdır. Yüksek kalitede çıkış sağlanır. Mekaniği kolaydır. İnşa alanı ihtiyacı çok azdır. Verim granüler çamur oluşumundan bağımsızdır. Etkin karışım sağlanır.*	*Askıda katı madde birikimi verimi düşürür. Yüksek askıda katı madde içeren atıksular için uygun değildir. Proses kontrolü tam sağlanamaz. Dolgu malzemesi maliyeti vardır. Düşük hidrolik bekletme sürelerinde stabilite sağlanamaz.*
Hibrit filtre	*Yüksek biyokütle konsantrasyonları ve uzun çamur yaşları sağlanır. Yüksek hacimsel organik yükleme yapılabildiğinden hacimleri çok daha azdır. Yüksek kalitede çıkış sağlanır. Mekaniği kolaydır. İnşa alanı ihtiyacı çok azdır. Verim granüler çamur oluşumuna az da olsa bağlıdır.*	*Askıda katı madde içeren atıksularda düşük yükler uygulanır. Proses kontrolü tam sağlanamaz. Düşük hidrolik bekletme sürelerinde stabilite sağlanamaz.*

8.4.1. İşletmeye Alma

Başarılı işletmeye alma aşaması ve uygun işletilme ile anaerobik sistemler mikrobiyal olarak dengeye gelir ve stabil verimler elde edilir. Bu dengenin kurulması öncelikle uygun aşının kullanılmasıyla olur. Daha sonra, işletmeye alma süresince organik asit oluşumunun ve pH'ın sürekli kontrolü gereklidir [5].

Düşük hızlı reaktörlerde (L_v=1-5 kg KOİ/m^3.gün) işletmeye alma süresi daha düşük biyokütle konsantrasyonlarında ve daha kısa sürelerde tamamlanır. Buna karşılık, yüksek hızlı (L_v=5-25 kg KOİ/m^3.gün) havasız sistemler için daha yüksek reaktör biyokütle konsantrasyonlarına ihtiyaç vardır. İşletmeye alma süresini etkileyen başlıca faktörler aşağıda verilmiştir:

- Hedeflenen organik yük ve/veya biyokütle konsantrasyonu

- Aşı çamurunun reaktörde kalan kısmının oranı
- Biyokütle birikme verimi
- Giren atığın biyokütleye dönüşüm verimi

Çamur yükü (F/M) 0,5-1 kg KOİ/kg UKM gün için düşük ve yüksek hızlı havasız reaktörlerde olması gereken aktif biyokütle konsantrasyonları sırasıyla 2000-10000 mg/L ve 10000-50000 mg/L aralıklarında kalmalıdır. Düşük biyokütle sentezi (Y), aşı özellikleri ve biyokütle birikme verimine bağlı olarak yüksek hızlı havasız sistemlerde kararlı mikrobiyolojik denge haline ulaşılabilmesi için, 2-6 aylık süreler gerekebilir. Termofilik reaktörlerde, Y değerleri daha da düşük olduğundan bu süre bir yıla ulaşabilmektedir.

Anaerobik sistemlerin işletmeye alınma devresinde karşılaşılan esas problem arıtılacak atıksuya uygun mikroorganizma topluluğunun yetiştirilememesidir. Uygun nitelikte aşı olması halinde sistemi devreye alma süresi kısalır. İstenilen özellikte aşı yok ise evsel atıksu arıtma tesisi çürütücülerinden veya Imhoff tankından alınan çamurla ve hayvan gübresi ile aşılama yapılabilir. Böyle durumlarda alıştırma devresi 3-5 ay sürebilir. Metanojenlerin çoğalma hızının düşük olması nedeniyle sistemin, arzu edilen organik yüklerde, kararlı işletme durumuna ulaşması 4-8 ay alabilir. Termofilik sistemlerde bu süre daha da uzamaktadır. Ancak, yeterli miktarda uygun niteliklere sahip aşı varsa anaerobik reaktörler 30-45 gün içinde kararlı işletme şartlarına ulaştırılabilir.

Yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktörlerde, granül aşı kullanılmaması halinde 1-2 kg KOİ/m^3.gün'lük organik yükle sistem alıştırılmaya başlanır. Reaktördeki toplam uçucu asit (TUA) konsantrasyonu 1500 mg/L'yi geçmeyecek şekilde organik yük kademeli olarak arttırılarak, 20-30 gün sonra 5 kg KOİ/m^3.gün'e çıkartılır. Yüksek biyolojik aktivitesi olan ağır granüler çamur elde edilebilmesi için organik yükün 5 kg KOİ/m^3gün'den fazla olması gerekmektedir. Normal şartlarda, atığın türüne de bağlı olmakla birlikte 40 gün sonunda bu yüke ulaşılabilir.

Anaerobik reaktörlerde işletmeye alma süresinin kısaltılabilmesi için bu dönemdeki biyokütle kaybının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek oranda geri devir uygulanabilir veya sistemi terk eden biyokütle, geçici olarak kurulan bir ultrafiltrasyon biriminde tutularak reaktöre geri döndürülebilir [6].

Optimum Çevre Şartları

Havasız arıtmayı gerçekleştiren mikroorganizma topluluğunun kapasitesinden en verimli şekilde yararlanabilmek için reaktörde optimum çevre şartlarının sağlanması gerekir. Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartlarının genel değerlendirmesi Tablo 8.13'te verilmektedir.

Sıcaklık faktörü anaerobik reaktörleri hem kinetik, hem de termodinamik açıdan etkiler. Anaerobik proseslerde, sıcaklık artışı ile biyokütlenin çoğalma hızının artması ve parçalanma reaksiyonlarının daha çabuk olması nedeniyle, proses verimi sıcaklık ile artış göstermektedir. Şekil 7.5'te anaerobik arıtma prosesi hızının sıcaklık ile değişimi gösterilmektedir. Şekilde, sıcaklığın 35°C ve 55°C olduğu durumlarda (pik noktalar) verimin en yüksek değerde olduğu gözlenmektedir.

Termofilik sıcaklıklarda çalışmak biyolojik ayrışabilirliği yüksek olan atıksuların arıtımında problem ortaya çıkarabilmektedir. Sıcaklık artışı ile artan kinetik aktivite ve çoğalma hızı, asitojenlerin metanojenlerden daha hızlı asit üretmesine neden olur ve mikroorganizmalar arasındaki dengeyi bozarak ortamda asit birikmesine yol açabilir.

Tablo 8.13. Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları [6]

Parametre	*Optimum Şartlar*
Arıtılan atığın bileşimi	*Karbon, temel besi elementleri (N, P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalı, O_2, NO_3, H_2O_2, SO_4 gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler içermemeli*
KOİ/N/P	*300/5/1*
pH	*6,5-8,2*
Sıcaklık	*25-40 (35-37)°C~ 50-60 (55)°C*
Alkalinite	*1000-4000 (2000) mg/L $CaCO_3$*
TUA	*<1000-1500 mg/L (asetik asit olarak)*
TUA/Alkalinite	*<0,1*

Şekil 8.5. Anaerobik parçalanma prosesi için sıcaklık aralıkları [1]

Yüksek sıcaklıklarda reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesi, uygulamada sıcaklık artışı ile en düşük bekleme sürelerinin düşürülebilmesine imkan sağlamaktadır [12]. Havasız çamur yataklı reaktörler için tasarım yükünün sıcaklıkla değişimi Tablo 8.14'te verilmektedir.

Tablo 8.14. Havasız çamur yataklı sistemlerde tasarım yükünün sıcaklıkla değişimi [6]

Sıcaklık (°C)	*Tasarım Yükü (kg KOİ/m^{3}gün)*
40	*15-25*
30	*10-15*
20	*5-10*
15	*2-5*
10	*1-3*

Metanojenler için optimum pH aralığı 6,5-8,2 kabul edilir. pH>8 için aktivitenin aniden düşmesi ortamdaki serbest amonyak miktarıyla ilgilidir. pH<5,5 halinde ise hem metan, hem de asit bakterileri inhibisyona uğrarlar. Metanojenlerin reaktif aktivitelerinin (asetat kullanım hızlarının) pH ile değişimi Şekil 8.6'da verilmektedir. Havasız arıtmada, işletmeye alma ve aşırı yükleme devreleri dışında genellikle pH kontrolü gerekmez.

Havasız ayrışma esnasında reaktör içinde pH, CO_2 ve alkalinite parametreleri birbirlerine bağlı parametrelerdir. Dolayısıyla bunlardan ikisinin bilinmesi diğerinin tahminini mümkün kılar.

Şekil 8.6. Metanojenleri reaktif aktivitelerinin (R) pH ile değişimi

Ortamda işletme esnasında TUA/Alkalinite oranı 0,1 değerini aşmamalıdır. Ortamın pH'ının düşmesi ve bunun sonucu olarak alkalinitenin azalması durumunda, sistemin alkalinitesinin ilave kimyasallar ile arttırılması gereklidir. Yaygın olarak kullanılan kimyasallara örnek olarak $Ca(OH)_2$, $NaHCO_3$, Na_2CO_3, NaOH, NH_3 veya NH_4HCO_3 verilebilir.

Tüm biyolojik sistemlerde olduğu gibi anaerobik proseslerde de biyokütle sentezi için ortamda besi maddelerinin ve iz elementlerin mevcut olması gereklidir. Arıtılan atığın KOİ/N/P bakımından dengeli olması çok önemlidir. Gerekli olması halinde, H_3PO_4, amonyum fosfat gibi kimyasal maddeler ilave edilerek bu denge sağlanır. Alıştırma devresinde KOİ/N/P oranı 300/5/1~500/5/1 arasında tutulmalıdır. Kararlı hale gelen sistemde ise 700/5/1 oranı uygulanabilir. Ayrıca, çamur yaşının çok uzun tutulduğu durumlarda bu oran uygun şekilde düşürülebilir.

Azot (N) ve fosfor (P) gibi makro nütrientlerin yanı sıra Na, K , Mg, Fe, S , Ni, Co, Mo, Se ve W gibi iz elementleri de proses için gereklidir. Özellikle tüm çevre şartlarının optimum olduğu durumda etkin KOİ giderimi ve düşük UA seviyeleri elde edilemezse, iz elementin eksikliği söz konusu olabilir. Bu durumda, Fe, Co ve Ni gibi üç önemli iz elementinin, reaktörde 0,1 mg/L konsantrasyonu elde edilecek miktarlarda, özel formüller halinde dozlanması gereklidir. Tablo 8.15'te anaerobik arıtma için gerekli besi maddeleri verilmektedir.

Havasız arıtmada kararlılığın sağlanabilmesi için ortamda kesinlikle serbest oksijen bulunmamalıdır. Oksijen kimyasal olarak bağlı olsa bile arıtma sürecini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle, NO_3^-, H_2O_2, SO_4^{2-}, HS^- vb. maddeler havasız sistemlerin verimini olumsuz yönde etkiler.

Atıksu içerisinde aşırı miktarda sülfat olması durumunda, sülfat indirgeyen bakteriler baskın duruma gelir ve reaksiyon sonucunda ara ürün olarak H_2S ortaya çıkar. Ortaya çıkan H_2S'in yüksek konsantrasyonları havasız arıtmada inhibisyon etkisi yapmaktadır.

Yüksek seviyede NH_4 veya protein ihtiva eden atıksularda NH_3 toksisitesi de önemli bir sorundur. Su ortamındaki serbest (iyonize olmamış) NH_3 yüzdesi, pH ve sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle, amonyak inhibisyonunda sıcaklık ve pH gibi ortam şartları inhibisyon derecesini etkilemektedir.

Tablo 8.15. Anaerobik arıtma için nütrient ihtiyacı [5]

Elementler	*İhtiyaç (mg/g KOİ)*	*Maksimum Konsantrasyonlar (mg/L)*	*Eklenen Formları*
Makro besi maddeleri			
Azot	*5-15*	*50*	NH_3, NH_4Cl, NH_4HCO_3
Fosfor	*0,8-2,5*	*10*	NaH_2PO_4, H_3PO_4
Sülfür	*1-3*	*5*	$MgSO_4.7H_2O$
Mikro besi maddeleri			
Demir (Fe)	*0,03*	*10*	$FeCl_2.4H_2O$
Kobalt (Co)	*0,003*	*0,02*	$CoCl_2.2H_2O$
Nikel (Ni)	*0,004*	*0,02*	$NiCl_2.6H_2O$
Çinko (Zn)	*0,02*	*0,02*	$ZnCl_2$
Bakır (Cu)	*0,004*	*0,02*	$CuCl_2.2H_2O$
Mangan (Mn)	*0,004*	*0,02*	$MnCl_2.4H_2O$
Molibdat (Mo)	*0,004*	*0,05*	$NaMoO_4.2H_2O$
Selenyum (Se)	*0,004*	*0,08*	Na_2SeO_3
Tungsten (W)	*0,004*	*0,02*	$NaWO_4.2H_2O$
Boron (B)	*0,004*	*0,02*	H_3BO_3
Genel Katotlar			
Sodyum (Na)		*100-200*	$NaCl$, $NaHCO_3$
Potasyum (K)		*200-400*	KCl
Kalsiyum (Ca)		*100-200*	$CaCl_2.2H_2O$
Magnezyum (Mg)		*75-250*	$MgCl_2$

Mikroorganizmaların faaliyetlerini yavaşlatan veya durduran zararlı maddelerin, daha sonraki evrelerde olduğu gibi, alıştırma evresinde de dikkatli kontrolü gerekir. Bu tür zararlı maddelerin anaerobik ayrışma sürecini ileri derecede yavaşlatan konsantrasyonları Tablo 8.16'da verilmektedir. Zehirli ve zararlı maddelerin etkisinin giderilmesi için kaynağında kontrol, seyreltme veya mikroorganizmalara yeterli alışma sürelerinin sağlanması gereklidir [6].

Tablo 8.16. Zararlı maddelerin anaerobik ayrışma sürecini engelleyen konsantrasyonları [6]

Madde	*Zararlı Konsantrasyon Seviyesi (mg/L)*
NH_4, NH_3	*1500-2000 (pH>7,5 halinde)*
Çözünmüş H_2S, HS^-, S_2^-	*100-150*
Na	*4000-6000*
K	*3000-5000*
Ca_2^+	*3000-5000*
CN^-	*0,5-1*
Alkil benzen sülfonat	*500-700*

8.4.2. Havasız Süreçlerin İzlenmesi ve Kontrolü

Havasız ayrışmanın istenilen düzeyde olabilmesi için arıtma sisteminin sürekli izlenmesi ve kararsızlıklara karşı gerekli tedbirlerin zamanında alınması gerekir. Etkili bir işletme ve izleme sonucu, yüksek verimli arıtmanın sağlanması, metana dönüşüm oranının yüksek olması ve olabildiğince az arıtma çamuru oluşması gibi yararlı sonuçlar elde edilir [6].

8.4.2.1.Proses Kontrolü

Proses kontrolünün amacı, arıtma sistemindeki düzensizlikleri mümkün olan en erken sürede tespit etmektir. Havasız arıtmada proses kontrolü bakımından dikkatle izlenmesi gereken parametreler Tablo 8.17'de verilmektedir. Prosesin izlenmesi amacıyla, bu parametrelere ilaveten özellikle çamur yaşı ve atık kompozisyonun da kontrolü gereklidir.

Tablo 8.17. Havasız arıtma proses kontrolü için izlenmesi gereken parametreler [1]

Sıvı fazda	*Gaz fazında*
UA	
pH	
Alkalinite	*Gaz üretim hızı*
L_V	*Metan veya CO_2 üretim hızı*
KOİ	*Biyogazdaki CO_2 yüzdesi*
Sıvı seviyesi	*Biyogazdaki H_2 yüzdesi*
Çözünmüş H_2	

Kararlılığını kaybeden bir anaerobik reaktörde sistemin dengesizliği ilk olarak TUA konsantrasyonunun artması sonucu pH'ta ani bir düşüş ile kendini gösterir. pH'taki düşüşten bir süre sonra alkalinite de ani azalma gözlenir. Bu esnada gaz üretiminin yavaşlaması nedeniyle gaz debisinde azalma ve gazdaki metan yüzdesinde düşüş olur. Bunların sonucu olarak reaktör çıkışındaki KOİ konsantrasyonu yükselir ve sistemin verimi düşer [6].

8.4.2.2.Prosesteki Kararsızlıklar

Havasız sistemlerde prosesteki kararsızlığa sebep olan faktörler başlıca iki ana kısımdan oluşur. Bunlardan, ekipman arızaları, sıcaklıktaki ani değişme, organik yükteki ani artış ve atığın bileşimindeki değişiklikler kısa süreli kararsızlıklar; atıksu içerisindeki zararlı maddeler, arıtılan atıksuyun veya reaktörün pH'ındaki ani düşüş veya alışma evresindeki mikroorganizma çoğalma hızının yavaş oluşu gibi değişikler de uzun süreli kararsızlıklar olarak ifade edilir.

Proses stabilitesi kaybolan bir anaerobik reaktörün tekrar kararlı hale gelmesi için öncelikle pH 7 civarına getirilir. Karasızlığa neden olan etkenler belirlenir ve uygun tedbirler uygulanır. Sistem kararlı duruma gelinceye kadar pH dikkatlice izlenir. Karasızlık sonucu düşen pH değerini uygun seviyeye yükseltmek için uygulanabilecek çeşitli çözümlerden biri kireç ilavesidir. Kireç, reaktörde pH'ın 6,5'ten daha düşük olması durumunda uygulanmalıdır. Aksi takdirde, kireç suda çözünmez ve ilave edilen kireç $CaCO_3$ olarak sistemde çökelir. Kireç kullanımının diğer bir mahzuru, kalsiyumun ortamdaki fosforu orta fosfat halinde kendine bağlamasıdır. Bunun sonucunda, ortamda besi maddesi eksikliği meydana gelir. Bu sakıncalarından dolayı özellikle endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde pH aşırı düşmediği sürece, kireç ile pH kontrolü yapılmaz. Bunun yerine genellikle NaOH ve $NaHCO_3$ birlikte kullanılır. Ancak bu durumda da Na konsantrasyonunun üst eşik değerlere ulaşmamasına dikkat edilmelidir. Na konsantrasyonunda problem yaşanması durumunda $NaHCO_3$ yerine $KHCO_3$ veya NH_4HCO_3 kullanılır.

Bazı karasızlık durumlarında reaktörde pH'ın artırılmasına ve organik yükün azaltılmasına rağmen sistemde uçucu asit konsantrasyonu düşmeyebilir. Bu durum, uçucu asidin propiyonik asit ağırlıklı olduğuna işaret eder. Bu durumda, reaktör iyice seyreltilmiş atıksu veya yangın suyu (temiz su) ile beslenerek yıkanır. Uçucu asit konsantrasyonu normal seviyeye geldikten sonra organik yükleme kademeli olarak arttırılır.

Gaz debisindeki düşme ve CH_4 yüzdesindeki azalma havasız reaktörlerde kararsız durumun iyi bir göstergesidir. İyi işletilen reaktörlerde metan yüzdesi %70'in üzerindedir. Bu değer %65'in altında ise sistem dengesi bozulmuş demektir [6].

8.5. Evsel Atıksuların Havasız Arıtımı

Yakın zamana kadar havasız arıtma proseslerinin 20°C'nin altındaki sıcaklıklar ve seyreltik atıksular için uygun olmadığı düşünülmekteydi. Günümüzde geliştirilen reaktör tipleri ile düşük sıcaklıktaki ve seyreltik atıksuların havasız olarak arıtımı yüksek hidrolik yüklemelerde ve çok iyi karışım sağlanarak mümkün olmaktadır. Evsel ve diğer seyreltik atıksuların havasız arıtımı ile ilgili literatür verileri Tablo 8.18'de verilmiştir.

Tablo 8.18. Evsel ve seyreltik atıksuların havasız arıtımı literatür verileri [13], [14], [15]

$KOİ_{giriş}$ (mg/L)	*Sıcaklık(°C)*	*HBS (saat)*	*KOİ giderimi (%)*	*Reaktör Tipi*
1183	*18-32*	*8*	*51-63*	*HÇYR*
380	*24*	*5*	*45-60*	*HÇYR*
600	*20*	*20,3*	*75-80 ($BOİ_5$)*	*HÇYR*
563	*20-30*	*6*	*74*	*HÇYR*
150-550	*11-19*	*6,2-18*	*31-49*	*HÇYR*
205-326	*7-27*	*12-42*	*31-56*	*HÇYR*
391	*16-19*	*1,5-5*	*30*	*HAYR*
188-459	*18-28*	*5-15*	*60*	*HÇYR*
1531	*18-25*	*23-27*	*51*	*HÇYR*
267	*25*	*8*	*75-82*	*HÇYR*
100-900	*10-18*	*9-16*	*46-60*	*HÇYR*
≤30-700	*19*	*12,8*	*67*	*PHR*
816	*27*	*6*	*57*	*HÇYR*
195	*27*	*6*	*53*	*HÇYR*
369	*13*	*0,75*	*66*	*HAYR*
505-914	*22-28*	*8*	*67,5*	*PHR*
456	*13*	*8*	*67*	*HÇYR*
700-1000	*25*	*4*	*89*	*HÇYR*
310	*15*	*12*	*48*	*HÇYR*
563	*30*	*9,7*	*67*	*HÇYR*
402	*23*	*7*	*74*	*HÇYR*
259,5	*15-20*	*2,6*	*52-87*	*MHR*
302,1	*10-15*	*8*	*56,6-57,7*	*MHR*
500	*15-25*	*12*	*>85*	*MHR*

HBS: Hidrolik bekletme süresi, HÇYR: Havasız çamur yataklı reaktör, HAYR: Havasız akışkan yataklı reaktör, PHR: Perdeli havasız reaktör, MHR: Membranlı havasız reaktör

Havasız arıtma sistemleri, uzun süre atıksu beslemesi ve ısıtma yapılmadan bekletildiğinde hiçbir koku problemi olmaz ve mikroorganizmaların yeniden aktif hale gelmesi çok kısa sürede gerçekleşir. Bu yüzden mevsimlik atıksu oluşumunun söz konusu olduğu turistik tesislerin atıksularının arıtımı için çok uygundur. Ancak evsel atıksuların KOİ konsantrasyonu düşük olduğundan, oluşan biyogaz ekonomik olarak değerlendirilemez.

Evsel atıksuların havasız arıtımında HF ve HÇYR'ler yaygın olarak kullanılır. $BOİ_5$ konsantrasyonu 200-300 mg/L olan evsel atıksuların 20°C'nin üzerinde arıtıldığı HÇYR'ler için önerilen tasarım değerleri Tablo 8.19'da verilmiştir.

Evsel atıksuların havasız arıtımı sırasında oluşan çamurun fazlası reaktörden çekilerek susuzlaştırıldıktan sonra gübre olarak kullanılabilir. Havasız ayrışma sırasında atıksudaki azot ve fosfor önemli ölçüde giderilmediğinden arıtılmış su kontrollü olarak sulamada kullanılabilir.

Havasız arıtma teknolojilerinin evsel/endüstriyel atıksuların arıtımı ile organik atık ve çamurların arıtımında kullanımı hakkında daha geniş bilgi için Kaynak [6]'ya başvurulabilir.

Tablo 8.19. Evsel atıksuların HÇYR'lerde arıtımı için önerilen tasarım değerleri [6]

Parametre	*Değer*
Hidrolik bekletme süresi	*Ortalama debide > 8-10 saat* *Pik debide > 4 saat*
Çamur yaşı	*30-50 gün*
Çamur yükü (F/ M)	*0,3-1,0 kg KOİ/kg UKM gün (çamur yatağı hacmi için)*
Hacimsel organik yük (Lv)	*1-3 kg KOİ/m^{3}gün*
BOİ5 (KOİ) giderim verimi	*% 75-85 (74-78)*
Yukarı akış hızı (u=Q/A)	*0,5 m/sa (ortalama), 1,2 m/sa (pik)*
Çamur üretimi	*0,15-0,25 kg TKM/m^3 debi*
Biyogaz üretimi	*0,1 m^3 biyogaz (% 75 CH4) ≈ 1,4 kW sa enerji*
N, P giderimi	*% 5-10*

Problemler.

Bu kısımdaki örnek sorular Metcalf & Eddy [7] ve Metcalf & Eddy [16]'dan uyarlanmıştır. Tasarım örnekleri hakkında daha ayrıntılı bilgi için Öztürk [6]'ya başvurulabilir.

Problem 8.1

Bir anaerobik temas reaktörü (anaerobik reaktör + çökeltim tankı) için aşağıda verilen bilgileri kullanarak, reaktör boyutunu, üretilecek gaz miktarını, üretilecek çamur miktarını, alkalinite ve besi maddesi ihtiyaçlarını hesaplayınız. Anaerobik prosesin % 90 KOİ giderimi yaptığı kabul edilecektir.

Tablo a. *Atıksu karakterizasyonu*

Parametre	*Birim*	*Değer*
Debi	*m^3/gün*	*350*
KOİ	*g/m^3*	*6000*
KOİ$_{çözünmüş}$	*g/m^3*	*4000*
KOİ/AKM	*g/g*	*1,8*
AKM'nin parçalanabilen kısmı	*%*	*80*
Azot	*g/m^3*	*10*
Fosfor	*g/m^3*	*20*
Alkalinite	*g $CaCO_3$/m^3*	*500*
Sıcaklık	*°C*	*25*

Tasarım parametreleri ve kabuller:

- *AKM$_{çıkış}$ = 150 g/m^3*
- *Çamur yaşı hesabında emniyet faktörü = 1,5*
- *UAKM/AKM = 0,85*
- *f_d = 0,15 g inert UAKM/g UAKM (reaktör içinde)*
- *Kinetik katsayılar: uygun kinetik katsayıların seçimi için Metcalf ve Eddy [7] ve Öztürk [6]'ya bakılabilir.*
- *Besi maddesi ihtiyacı (UAKM üzerinden): N = % 12, P = % 2,4*
- *Reaktör içinde AKM = 6000 mg/L*
- *Çökelme hızı = 24 m/gün*
- *Biyogaz bileşimi: %65 metan, %35 karbondioksit*

Çözüm.

Çamur yaşının (SRT) belirlenmesi:

%90 KOİ giderimi ile

$KO\dot{I}_{çıkış} = (1 - 0{,}9)(6000\ g/m^3) = 600\ g/m^3$

Kabul edilen $AKM_{çıkış} = 150\ g/m^3$ *olduğuna göre;*

$$\text{Çıkıştaki AKM'den kaynaklanan } KO\dot{I} = (150\ mg/L)(1{,}8\ g\ KO\dot{I}/g\ AKM) = 270\ g/m^3$$

Çıkışta müsaade edilebilecek $KO\dot{I}_{çözünmüş} = 600 - 270 = 330\ g/m^3$

$$SRT = (\frac{\mu_m\ S_e}{K_s + S_e} - k_d)^{-1}$$

Seçilen kinetik katsayılar:

$\mu m = 0{,}2\ g/g * gün$

$Ks = 900\ mg/L$

$kd = 0{,}03\ g/g * gün$

$$SRT = (\frac{0{,}2\ 330}{900 + 330} - 0{,}03)^{-1}$$

$SRT = 42{,}3\ gün$

$Tasarım\ SRT = 42{,}3 * (1{,}5) \approx 63\ gün$

Çamur miktarı:

Parçalanmadan kalan AKM konsantrasyonu:

$Çözünmeyen\ KO\dot{I} = 6000 - 4000 = 2000\ g\ /m^3$

$Çözünmeyen\ KO\dot{I}'nin\ AKM\ eşdeğeri = 2000/(1{,}8) = 1111\ g\ AKM/m^3$

AKM'nin parçalanabilen kısmı soruda % 80 olarak verildiğine göre;

$Parçalanamayan\ AKM = 1111 * (0{,}2) = 222\ g\ AKM/m^3$

Çamur oluşumu:

$$P_{X,AKM} = \frac{Q\ Y\ (S_0 - S)}{[1 + k_d\ SRT]\ 0{,}85} + \frac{f_d\ k_d\ Q\ Y\ (S_0 - S)\ SRT}{[1 + k_d\ SRT]\ 0{,}85} + inert\ AKM$$

$S_0 - S = KO\dot{I}_{giderilen} = KO\dot{I}_{giriş} - KO\dot{I}_{parçalanmayan\ AKM} - KO\dot{I}_{çıkış\ çözünmüş}$

$S_0 - S = 6000 - [(222) * (1{,}8)] - 330 = 5270\ g\ KO\dot{I}/m^3$

Seçilen katsayılar:

$Y = 0{,}08\ g\ UAKM/g\ KO\dot{I}$

$kd = 0{,}03\ g/g * gün$

$$P_{X,AKM} = \frac{300 * 0{,}08 * 5270}{[1 + 0{,}03 * 63] * 0{,}85} + \frac{0{,}15 * 0{,}03 * 300 * 0{,}08 * 5270 * 63}{[1 + 0{,}03 * 63] * 0{,}85} + 300 * (222)$$

$P_{X,AKM} = 132{,}685\ g\ AKM/gün$

Reaktör hacmi ve hidrolik bekletme süresi (θ):

$V = (P_{X,AKM} * SRT)/X = 132{,}685 * 63/6000 = 1393\ m^3$

$\theta = V/Q = 1393/300 = 4{,}64\ gün$

Toplam gaz üretimi ve enerji içeriği:

35°C'de metan hacmi = 0,4 m³ CH_4/kg KOİ kabul edilirse, 25°C'de metan hacmi;

$0{,}4 * (273{,}15 + 25)/(273{,}15 + 35) = 0{,}39\ m^3\ CH_4/kg\ KO\dot{I}$

$Toplam\ CH4\ üretimi = 0{,}39 * 5270 * 300/(1\ kg/1000\ g) = 616{,}6\ m^3\ CH_4/gün$

$Toplam\ gaz\ üretimi = 616{,}6/(0{,}65\ m^3\ CH_4/m^3\ gaz) = 948{,}6\ m^3/gün$

Gazın enerji içeriği:

25°C'de 1 mol gazın hacmi 24,5 L ise;

$mol\ CH4/gün = 616{,}6/[(24{,}5) * (1\ m^3/1000\ L)] = 25{,}167\ mol/gün$

$metanın\ kütlesi\ =\ 25{,}167 * (16\ g\ CH_4/mol) =\ 4{,}03 * 10^5\ \ g/gün$

$enerji\ içeriği = 4{,}03 * 10^5 * (50{,}1\ \ kJ/g) =\ 20{,}2 * 106\ \ kJ/gün$

(bu ısı anaerobik reaktörün ısıtılması için kullanılabilir) 10

Besi maddesi ihtiyacı:

$$Biyokütle\ üretimi = \frac{Q\ Y\ (S_0 - S)}{[1 + k_d\ SRT]\ 0{,}85} + \frac{f_d\ k_d\ Q\ Y\ (S_0 - S)\ SRT}{[1 + k_d\ SRT]\ 0{,}85} = 66{,}085\ \ g/gün$$

$N\ ihtiyacı\ =\ 66{,}085 * (0{,}12\ g/g) * (0{,}85) =\ 6741\ \ g/gün$

$P\ ihtiyacı\ =\ 66{,}085 * (0{,}024\ g/g) * (0{,}85)\ =\ 1348\ \ g/gün$

Girişteki besi maddesi miktarı:

$N = 10\ \ g/m^3 * (300\ \ m^3/gün) = 3000\ \ g/gün$

$P = 20\ \ g/m^3 * (300\ m^3/gün) = 6000\ \ g/gün$

Buna göre girişte yeterli fosfor bulunmaktadır; fakat azot ilavesi gereklidir.

$N\ ilavesi = 6741 - 3000\ =\ 3741\ \ g/gün$

Alkalinite ihtiyacı:

% 35 CO_2 için minimum alkalinite ihtiyacı 1500 mg $CaCO_3$/L olarak kabul edilirse [7],

$1500 - 500 = 1000\ \ mg\ CaCO_3/L$ *ilave edilmesi gerekmektedir. Bu da $NaHCO_3$ olarak;*

$[(84\ \ g\ NaHCO_3/eq).(1000\ g/m^3)]/(50\ g\ CaCO3/eq)\ =\ 1680\ \ g\ NaHCO_3/m^3$

$NaHCO_3/gün = 1680 * 300 * (1\ kg/1000\ g)\ =\ 504\ \ kg/gün$

Çökeltim tankı çapı:

$Alan\ =\ Q/çökelme\ hızı = 300/24\ =\ 12{,}5\ m^2$

$Çap = 4\ m$

Problem 8.2

Şeker pancarı endüstrisi atıksuyunu arıtmak üzere bir HÇYR tasarlanacaktır. Atıksu karakterizasyonu aşağıdaki tabloda verilmekte olup % 90 KOİ giderimi istenmektedir. Aşağıdaki verileri kullanarak HÇYR'yi tasarlayınız.

Atıksu karakterizasyonu

Parametre	***Birim***	***Değer***
Debi	$m^3/gün$	*500*
KOİ	g/m^3	*12000*
AKM	g/m^3	*600*
Parçalanmayan UAKM	g/m^3	*500*
Alkalinite	$g\ CaCO_3/m^3$	*500*
Sıcaklık	℃	*25*

Tasarım parametreleri ve kabuller:

- *Y_H = 0,08 g UAKM/g KOİ*
- *k_d = 0,03 g UAKM/g UAKM.gün*
- *f_d = 0,10 g inert UAKM/g UAKM (reaktör içinde)*
- *Kinetik katsayılar: uygun kinetik katsayıların seçimi için Metcalf ve Eddy [7] ve Öztürk [6]'ya bakılabilir.*
- *0°C'de metanın enerji eşdeğeri = 38,846 kJ/m^3*
- *Biyogazın metan içeriği = % 65*
- *Reaktör yüksekliği = 8 m*
- *Çamur yatağı üzerindeki su yüksekliği = 0,5 m*

- *Gaz-katı ayırıcının yüksekliği = 2,5 m*
- *Reaktör uzunluğu/reaktör genişliği = 2*
- *Maksimum yukarı akış hızı = 1 m/sa*
- *Reaktörde ortalama katı madde konsantrasyonu = 30 kg UAKM/m^3*
- *Organik yükleme hızı = 8 kg KOİ/m^3.gün*

Çözüm.

Reaktör hacminin hesabı:

Maksimum yukarı akış hızına göre;

$A = Q/u = 500/[(1\ m/sa) * (24\ sa/1\ gün)]\ =\ 20{,}8\ m^2$

$V_u = 20{,}8 * (8\ m) = 166{,}7\ m^3$

Organik yükleme hızına göre;

$V_{OLR}O = Q\ \ S_0/OLR = 500 * 12/8 =\ 750\ m^3$

Reaktör hacmi olarak organik yüklemeye göre belirlenen değer kullanılacaktır.

Hidrolik bekletme süresinin belirlenmesi:

$\theta\ =\ V/Q\ =\ 750/500\ =\ 1{,}5\ gün$

Reaktör boyutları:

$Reaktör\ alanı\ =\ L\,W\ =\ 2W * W$

$A = V/H = 750/8 = 93{,}75\ m^2 = 2W^2 \rightarrow W = 6{,}85\ m, L = 13{,}7\ m$

Toplam reaktör yüksekliği:

$H_T = 8\ m + 0{,}5\ m + 2{,}5\ m = 11\ m$

$Reaktör\ boyutları = 13{,}7\ m * 6{,}85\ m * 11\ m$

Çamur yaşı (SRT) hesabı:

$X\,V = P_x\ SRT$

$$P_{X,AKM} = \frac{Q\ Y\ (S_0 - S)}{[1 + k_d\ SRT]} + \frac{f_d\ k_d\ Q\ Y\ (S_0 - S)\ SRT}{[1 + k_d\ SRT]} + inert\ UAKM * Q$$

İki denklem eşitlenir ise;

$$X\,V = \frac{Q\ Y\ (S_0 - S)\ SRT\ [1 + f_d\ k_d\ SRT]}{[1 + k_d\ SRT]} + inert\ UAKM * Q * SRT$$

$S_0 - S =\ 0{,}9 * S_0 =\ 0{,}9 * (12000) = 10800\ g\ KOİ/m^3$

$$30000 * 750 = \frac{500 * 0{,}08 * 10800 * SRT * [1 + 0{,}01 * 0{,}03 * SRT]}{[1 + 0{,}03 * SRT]} + 500 * 500 * SRT$$

$SRT\ =\ 50{,}2\ gün$

Günlük çamur üretimi:

$P_x =\ X\,V/SRT\ =\ (30000 * 750 * (1\ kg/1000\ g))/50{,}2 = 448{,}2\ kg\ UAKM/gün$

Günlük atılacak fazla çamur miktarı:

$P_x =\ Q\ Xe\ +\ X\ Qw \rightarrow Qw = (448200 - (500 * 0{,}12))/30000\ =\ 14{,}9\ m^3/gün$

Metan üretimi:

$P_{x,bio} =\ P_{x,UAKM} = -(inert\ UAKM)Q$

$P_{x,bio} =\ 448200 - 500 * 500 = 198200\ g\ UAKM/gün$

Metana dönüşen KOİ = KOİ$_{giderilen}$ - KOİ$_{biyokütle}$

$KO\dot{I}_{CH_4} = 500 * 10800 - (1{,}42\ g\ KO\dot{I}/g\ UAKM)(198200\ g\ UAKM/gün) = 5118{,}556\ kg\ KO\dot{I}_{CH_4}/gün$

Standart şartlarda;

$5118556 * (0{,}35\ L\ CH4/g\ KO\dot{I}) * (1\ m3/1000\ L) = 1719{,}5\ m^3\ CH_4/gün\ (0°C'de)$

$1719{,}5 * [(273{,}15 + 25)/(273{,}15)] = 1955\ m^3\ CH_4/gün\ (25°C'de)$

Toplam biyogaz üretimi (metan yüzdesi: %65):

$Toplam\ gaz\ üretimi = 1955/0{,}65 = 3008\ m^3\ biyogaz/gün$

$Üretilen\ metanın\ enerji\ içeriği = (38846\ kJ/m^3) * (1719{,}5\ m^3\ CH_4/gün) = 66{,}8 * 10^6\ kJ/gün$

Alkalinite ihtiyacı:

pH = 7, T = 25℃ *ve % 35* CO_2 *için alkalinite ihtiyacı 2678 mg* $CaCO_3$*/L olarak kabul edilirse [7],*

$2678 - 500 = 2178\ mg\ CaCO_3/L\ ilave\ edilmesi\ gerekmektedir.$

Problem 8.3

Kuvvetli atıksuların arıtımı için kullanılacak bir aktif çamur prosesi için ihtiyaç duyulan enerjiy miktarını, bir anaerobik proses kullanılması durumunda üretilecek enerji miktarı ile kıyaslayınız. Net enerjiyi arıtılan atıksu hacmi başına pozitif veya negatif üretim olarak ve kJ/m^3 *biriminde ifade ediniz. Hesaplamalarınızı farklı* $KO\dot{I}_{giderilen}$ *konsantrasyonları (3800, 4200, 6000, 8000, 10000 mg/L) için yaparak, karşılaştırmayı tablo halinde gösteriniz. Debiyi 400 m*^{3}*/gün kabul ediniz.*

Kabuller:

- *Anaerobik arıtma prosesinden elde edilecek net enerji = metandan üretilen enerji – atıksu sıcaklığını 20* C^0*'den 30* C^0*'ye yükseltmek için gerekli enerji.*
- A_n *(net oksijen ihtiyacı) = 0,8 g* O_2*/g* $KO\dot{I}_{giderilen}$
- *Havalandırma için oksijen transfer verimi (OTE) = 1,52 kg* O_2*/kWsa*
- *Isıtma için metan kullanımı durumunda net ısı kaybı = % 20*
- *Suyun ısı kapasitesi = 4,2 kJ/*C^0*.kg*
- *Standart şartlarda metanın enerji içeriği = 38846 kJ/m*^{3}
- *Standart şartlarda metan üretimi = 0,35 m*^{3} CH_4*/kg* $COD_{giderilen}$

Çözüm.

Aerobik proseste havalandırma için gereken enerji ihtiyacı:

$(E_{AER}/Q) = (KO\dot{I}_{giderilen})(An)(3600\ kJ/kWh)/OTE$

E_{AER} *: oksijen transferi için günlük enerji ihtiyacı, kJ/gün*
Q *: debi, m*^{3}*/gün*

$E_{AER}/Q = (3{,}8\ kg\ KO\dot{I}/m^3)\ (0{,}8\ kg\ O_2/kg\ KO\dot{I}_{giderilen})\ [1/(1{,}52\ kg\ O_2/kWsa)]\ (3600\ kJ/kWsa)$

$E_{AER}/Q = 7200\ kJ/m^3$

Anaerobik proseste net enerji üretimi:

Atıksu sıcaklığı 20℃*'den 30*℃*'ye yükseltilecektir. Isıtmada metan kullanım verimi (%20 ısı kaybı kabulüyle) %80 alınmıştır.*

$$E_{AER}/Q = (3{,}8\ kg\ KO\dot{I}/m^3)(0{,}35\ m^3\ CH_4/kg\ KO\dot{I}_{giderilen})(35846\ kJ/m^3\ CH_4) - (10°C)(4{,}2\ kJ/°C\ kg)(1000\ kg/m^3\ H_2O)(1/0{,}80)$$

$E_{AER}/Q = -4825\ kJ/m^3$

Üretilen metan miktarı:

$Metan\ üretimi = (KO\dot{I}_{giderilen})\ Q\ (0{,}35\ m^3\ CH_4/kg\ KO\dot{I}_{giderilen})[(273{,}15°C + 30°C/(273{,}15°C)]$

$= 590{,}4\ m^3\ CH_4/gün$

Özet Tablo

KOİ$_{giderilen}$ (mg/L)	***Havalandırma enerjisi (kJ/m^3)***	***Net anaerobik arıtım enerjisi (kJ/m^3)***	***Metan üretimi (m^3/gün)***
3800	*-7200*	*-4830*	*590*
4200	*-7960*	*190*	*650*
6000	*-11370*	*22780*	*930*
8000	*-15160*	*47870*	*1240*
10000	*-18950*	*72960*	*1550*

KAYNAKLAR

[1] Alvarez J., editor (2003). Biomethanation of the organic fraction of municipal solid wastes. Iwa Publishing, London.

[2] van Lier, J.B., van der Zee, F.P., Frijters, C.T.M.J., Ersahin, M.E. (2015). Celebrating 40 Years Anaerobic Sludge Bed Reactors for İndustrial Wastewater Treatment, Reviews in Environmental Science and Bio/technology, 14, 681-702.

[3] UNIDO (1992). Anaerobic Treatment, How to Staff Manufacturing Industries, File:z18, Austria.

[4] Speece, R.E. (1996). Anaerobic Biyotechnology For Industrial Wastewaters, pp. 3, 6, 36, Archae Press, USA.

[5] Rittmann, B.E. and McCarty, P.L. (2001). Environmental Biotechnology: Principles and Applications, pp. 570-596, McGraw-Hill, Inc., New York.

[6] Öztürk, İ. (2007). Anaerobik Arıtma ve U ygulamaları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

[7] Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill.

[8] Weijma, J., Gubbels, F., HulshoffPol, L.W., Stams, A.J. M., Lens, P. and Lettinga, G. (2002). Competition For H2 Between Sulfate Reducers, Methanogens and Homoacetogens In A Gas-Lift Reactor, Water Science and Technology, 45, 10, 75-8.

[9] Bhatti, Z.I., Furukawa, K. and Fujita, M. (1996). Feasibility Of Methanolic Waste Treatment In UASB Reactors, Wat. Res., 30, 11, 2559-2568.

[10] Horan, M.J. (1990). Biological Wastewater Treatment Systems Theory and Operation, pp. 168, John Wiley&Sons, England

[11] Ersahin, M.E., Ozgun, H., Dereli, R.K., Ozturk, I. (2011). Anaerobic Treatment of Industrial Effluents: An Overview of Applications: *Einschlag, F.S.G (editör), Waste Water - Treatment and Reutilization*, InTech, Hindistan

[12] Annachhatre, A.P. (1996). Anaerobic Treatment Of Industrial Wastewaters, Resources, Conservation and Recycling, 16, 161-166.

[13] Gomec, C.Y. (2010). High-rate Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater at Ambient Operating Temperatures: A Review on Benefits and Drawbacks, Journal of Environmental Science and Health Part A, 45, 1169-1184

[14] van Lier, J.B., Mahmoud, N., Zeeman, G. (2008). Anaerobic Biological Wastewater Treatment: *Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjamovic, D. (editörler), Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*, IWA Publishing, Londra, İngiltere.

[15] Ozgun, H., Dereli, R.K., Ersahin, M.E., Kinaci, C., Spanjers, H., van Lier, J.B., 2013. A Review of Anaerobic Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment: İntegration Options, Limitations and Expectations, Separation and Purification Technology, 118, 89-104.

[16] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[17] Grady, C.P.L., Daigger, G.T. and Lim, H.C. (1999). Biological Wastewater Treatment, pp. 619, 626, 630, Marcel Dekker, Inc., New York.

9. ÇAMURLARIN İŞLENMESİ, ARITILMASI VE UZAKLAŞTIRILMASI

[1]*Doç. Dr. Çiğdem Yangın Gömeç ve Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Atıksu arıtma tesislerinde kirleticiler, farklı ünitelerde işlenmeleri sırasında çeşitli formlara dönüştürülmektedir. Bu kirleticiler; ızgaralarda tutulan katı maddeler, kum tutuculardaki biriken kum vb. inorganik katı maddeler, köpük tabakasından sıyrılan maddeler, çökelme havuzlarında çökeltilerek uzaklaştırılan katılar ve stabilize olmuş biyokatılar şeklinde daha konsantre hale getirilmektedir. Su ve atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi sırasında veya sonrasında ortaya çıkan bu yan ürünler, 'Arıtma Çamurları' olarak isimlendirilmektedir. Uygulanan arıtmanın tipine ve amacına göre, arıtma çamurları farklılık gösterir. Çamur tipleri; (i) Çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön-çökeltim çamurları, (ii) Kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu oluşan kimyasal çamurlar, (iii) Biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve (iv) İçme suyu arıtma işlemleri sonucu oluşan inorganik çamurlar olarak sıralanmaktadır.

Arıtma sırasında uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler sebebiyle atıksularda bulunan ağır metaller, biyolojik olarak zor ayrışabilen eser organik bileşikler ve potansiyel olarak hastalık yapıcı patojen organizmalar (virüsler, bakteriler, vb.) çamur ile birlikte çökelerek konsantre hale gelirler. Diğer taraftan, çamurlar azot ve fosfor gibi besi maddelerince (nütrientler) zengindir. Ayrıca atıksu çamurları özellikle toprağın yok olduğu veya erozyona uğradığı durumlarda kullanılabilecek yararlı organik maddeleri içermektedir. Organik madde ve nütrientler gibi iki temel içerik, arıtma çamurlarının işlem gördükten ve arıtıldıktan sonra gübre ve toprak iyileştirici olarak arazide kullanımına olanak sağlar.

Arıtma işlemi sonunda çıkan çamur hacimce yüksek miktarlarda olup, işlenmesi ve bertarafı atıksu arıtma tesislerinde (AAT) oldukça karmaşık bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çamur probleminin karmaşık olmasının başlıca sebepleri; (i) Arıtılmamış atıksu içindeki önemli miktarlarda koku veren maddeler, (ii) Biyolojik arıtmada oluşan ve uzaklaştırılması gereken çamurun, ham atıksu içerisindeki organik maddelerden farklı bir yapıda, bozunma ve kokuşma eğiliminde olması, (iii) Çamurun sadece küçük bir kısmının katı madde, büyük bir kısmının ise sudan oluşması ve bu yüzden de büyük hacimler işgal etmesi olarak özetlenebilir.

9.1. Çamur Kaynakları, Özellikleri ve Miktarları

Arıtma çamurlarının işlenmesi, arıtılması ve bertarafı için gerekli sistemlerin tasarımları öncesi AAT'de oluşan çamur kaynağının, özelliklerinin ve miktarının bilinmesi gerekmektedir.

9.1.1. Çamur Kaynakları

Çamurların arıtıldığı sistemler; arıtılan çamurun kaynağına, uygulanan prosesin tipine ve işletme şartlarına göre değişiklik gösterir. Çamur kaynakları da arıtma tesisinde yer alan arıtma birimlerine göre farklılık gösterir. Örneğin, tam karışımlı bir aktif çamur prosesinde çamur eğer havalandırma havuzundan uzaklaştırılıyorsa; çamur kaynağının havalandırma havuzu olduğu söylenir. Diğer taraftan fazla çamur, aktif çamur prosesinin geri devir hattından atılırsa çamur kaynağı son-çökeltim tankı olarak düşünülür. Yoğunlaştırma, çürütme, şartlandırma ve susuzlaştırma için kullanılan prosesler de birer çamur kaynağıdır. Çamur kaynaklarının farklılığına sebep olan çamur işleme, arıtma ve uzaklaştırma yöntemlerinin gösterildiği genelleştirilmiş akım şeması Şekil 9.1a'da gösterilmektedir. Son yıllarda, ham çamurlara, yoğunlaştırılmış çamurlara ve susuzlaştırılmış çamurlara uygulanan güncel proseslerin yer aldığı genelleştirilmiş akım şeması ise Şekil 9.1b'de gösterilmektedir.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Şekil 9.1a. Çamur işleme, arıtma ve uzaklaştırma yöntemlerinin genelleştirilmiş akım şeması [1]

Şekil 9.1b. Çamur işleme, arıtma ve uzaklaştırma yöntemlerinin genelleştirilmiş akım şeması [2]

9.1.2. Çamur Özellikleri

Çamur arıtımı ve nihai uzaklaştırma yöntemlerinin belirlenmesinde, çamurun içeriğini ve ihtiva ettiği katı maddelerin özelliğini bilmek çok önemlidir. Örneğin, çamurların kimyasal özelliklerinden biri olan nutrient (besi maddesi) içerikleri, nihai uzaklaştırmada en önemli parametredir. Çamurların toprak şartlandırıcı olarak kullanılacağı yerlerde azot, fosfor ve potasyum içeriklerini esas alan gübre değeri önem kazanır. pH, alkalinite ve organik asit içerikleri ise anaerobik çürütme prosesinde etkili bir stabilizasyonun sağlanabilmesinde mutlaka izlenmesi gereken parametrelerdir. Ağır metaller, pestisit ve hidrokarbonlar ise yakma ve araziye serme uygulamalarından önce zararsız hale getirilmelidir. Çamurların faydalı kullanım amaçlarını ve araziye serilmelerini etkileyen özellikleri ise organik içerikleri (genellikle uçucu katı madde olarak ifade edilirler), nütrientler, patojen mikroorganizmalar, metaller ve zehirli organik bileşiklerdir.

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile çamurların işlenmesi, arıtılması ve uzaklaştırılması sırasında kullanılan proseslerin kontrolü ve bu proseslerin performanslarının izlenmesi kolaylaşmaktadır. Bu aynı zamanda çamurun kaynağı, sistemdeki çamur yaşı ve proses tipi ile de yakından ilgilidir. AAT'de yer alan arıtma sistemlerinden kaynaklanan katı madde, çamur ve biyokatıların özellikleri Tablo 9.1'de verilmektedir.

9.1.3. Çamurların Genel Bileşimi

Nihai bertaraf yönteminin belirlenmesinde makro ve mikro besi maddeleri de dahil olmak üzere, arıtma çamurlarının kimyasal bileşimlerinin bilinmesi çok önemlidir. Örneğin; anaerobik (havasız) çürütücülerin işletilmeleri sırasında; pH, alkalinite ve organik asit içeriklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Nihai uzaklaştırma alternatifi olarak yakma ve arazi uygulaması gibi yöntemlerin uygulanması durumunda; çamurdaki ağır metal, pestisit ve hidrokarbonlar ölçülmelidir. Ayrıca, yakma gibi ısıl (termal) yöntemler kullanılacak ise çamurun enerji içeriği hesaplanmalıdır. Ham (arıtılmamış) çamurun ve çürütülmüş biyokatıların kimyasal kompozisyonu Tablo 9.2'de verilmektedir. Çamurun arazide bertarafı ve faydalı kullanımını etkileyen başlıca özellikleri, organik içeriği (uçucu katı olarak ölçülür), besi maddeleri, patojenler, metaller ve toksik organiklerdir. Çamurun arazide kullanılması durumunda, gübre özelliği (azot, fosfor ve potasyum içeriği) önem kazanır. Ticari gübre ve arıtma çamurundaki nutrient seviyeleri kıyaslanırsa; azot, fosfor ve potasyum tarımda kullanılan gübre de sırasıyla %5, %10 ve %10; stabilize olmuş bir aktif çamurda ise sırasıyla %3,3, %2,3 ve % 0,3 oranlarındadır. Besi maddesi konsantrasyonu toprak ve bitkinin özelliğine göre değişiklik gösterse bile arazi uygulaması yapılan çamur, bitkilerin büyümesi için gerekli besi maddelerini karşılayabilir. Ancak, arazi uygulamasında araziye serilebilecek çamur miktarı, çamurun yapısındaki ağır metal konsantrasyonlarına (Tablo 9.3) bağlıdır.

Tablo 9.1. Arıtma birimlerinden kaynaklanan çamur, katı ve biyokatıların özellikleri

Çamur, Katı Madde veya Biyokatılar	***Açıklama***
Izgara ve elekte tutulan atıklar	*Büyük boyutlu organik/inorganik maddelerin tutulmasında kullanılır. Organik madde içeriği sistemin yapısına ve mevsime göre değişim gösterir.*
Kum	*Hızlı çökelme özelliğine sahip, ağır inorganik katılardan oluşmaktadır. İşletme şartlarına bağlı olarak yağ/gres gibi organik maddeleri içerebilirler.*
Köpük/yağ	*Ön (birincil) çökeltim ve son (ikincil) çökeltim havuzlarının yüzeyinden sıyrılarak uzaklaştırılan yüzen maddeleri içerir. Köpük, yağ, bitkisel ve mineral yağlar, hayvansal katı yağlar, parafin, sabun, yiyecek artıkları, sebze ve meyve kabukları, saç, kâğıt ve karton, izmarit, plastik maddeler, kum ve benzeri maddeleri içerir.*
Ön-çökeltim çamuru	*Ön-çökeltim havuzundan çıkan çamur, gri ve yapışkan olup; çoğu zaman yoğun kokuludur. Bu çamur kolaylıkla çürütülebilir.*
Kimyasal çöktürme çamuru	*Metal tuzları ile yapılan çöktürme tankından çıkan çamur; koyu renkli, demir içeriği yüksek ve kırmızı renklidir. Kokusu ön-çöktürme çamuru kadar yoğun değildir. Demir veya alum hidratlarından dolayı çamur jelatinimsi yapıdadır. Çamurun tank içerisinde uzun süre bırakılması sonucunda yoğunluğu artar, ön-çöktürme çamuru gibi çürümeye uğrar ve önemli miktarda gaz çıkışı olur.*
Aktif (Biyolojik) çamur	*Kahverengi renklidir ve ağırlıklı olarak floklardan oluşmaktadır. Koyu renkli olması durumunda septik şartlar oluşmuş demektir. Çamurun rengi normalden daha açık ise havalandırmanın yetersiz olduğu anlaşılır ve bunun sonucunda katılar yavaşça çökelme eğilimindedir. İyi şartlardaki çamur doğal toprak kokusundadır. Aktif çamur kolaylıkla septikleşmeye meyilli olup; çürük yumurta kokusu yayabilir. Tek başına veya ön-çökeltim çamuruyla karışmış olan aktif çamur kolayca çürüyebilir.*
Damlatmalı filtre çamuru	*Kahverengimsi, floklu ve taze olduğunda nispeten kokusuzdur. Diğer çürütülmemiş çamurlara kıyasla daha yavaş ayrışmaya uğrar. Bu çamurların çürütülmesi kolaydır.*
Aerobik çürütülmüş çamur	*Kahverengi ve koyu kahverengi rengindedir. Floklu özelliktedir. Kokusu kötü olmayıp; genellikle küf kokuludur. İyi çürütülmüş çamur kurutma yataklarında kolaylıkla susuzlaştırılabilir.*
Anaerobik çürütülmüş çamur	*Koyu kahveden siyaha yakın renkte olup; çok miktarda gaz içerir. Çürütmenin tam olarak gerçekleşmesi durumunda kokusu kötü değildir. Kokusu nispeten belirgin, sıcak katran, yanmış lastik veya mühür mumu gibidir. Ön-çökeltim çamuru havasız olarak çürütüldüğü zaman, aktif çamura kıyasla iki kat daha fazla metan gazı üretilir. Çamur ince tabaka halinde gözenekli/geçirgen yataklara serildiğinde, katılar ilk olarak gazlar tarafından yüzeye taşınarak; nispeten berrak bir su bırakırlar. Daha sonra su hızlı bir şekilde drene olur ve katılar yatak üzerinde yavaşça çökerler. Çamur kurudukça, gaz ortamdan uzaklaşır ve verimli bahçe toprağı kokusuna benzeyen, çatlamış yüzeye sahip bir toprak özelliği gösterir.*
Kompost ürünü	*Koyu kahve-siyah renklidir. Ancak kompostlaşmada kullanılan odun kırıntıları gibi yardımcı ürünler veya geri devrettirilen kompost sebebiyle rengi değişebilir. İyi kompostlaşmış katıların kokusu hiç rahatsız edici değildir ve ticari değere sahip bahçe tipi toprak şartlandırıcısı kokusuna benzemektedir.*
Foseptik (septik tank) çamuru	*Siyah renklidir. İyi çürütülmemesi durumunda hidrojen sülfür ve diğer gazlardan dolayı kötü koku yayar. Bu sebeple, bu durumdaki çamurun kurutulmasında ciddi koku problemi ile karşılaşılır*

Tablo 9.2. Ham çamurun ve çürütülmüş biyokatıların kimyasal bileşimi [1]

Parametre	*Birim*	*Ham Ön-Çökeltim Çamuru*		*Çürütülmüş Ön-Çökeltim Çamuru*		*Ham Atık Aktif Çamur*
		Aralık	*Değer*	*Aralık*	*Değer*	*Aralık*
Toplam Kuru Katı Madde (TKM)	*%*	*5-9*	*6*	*2-5*	*4*	*0,8-1,2*
Uçucu Katı Madde (UKM)	*TKM'nin %'si*	*60-80*	*65*	*30-60*	*40*	*59-88*
Yağ-Gres	*TKM'nin %'si*					
Çözünmüş Eter		*6-30*	*-*	*5-20*	*18*	*-*
Ekstrakte Eter		*7-35*	*-*	*-*	*-*	*5-12*
Protein	*TKM'nin %'si*	*20-30*	*25*	*15-20*	*18*	*32-41*
Azot (N)	*TKM'nin %'si*	*1,5-4,0*	*2,5*	*1,6-3,0*	*3,0*	*2,4-5,0*
Fosfor (P_2O_5)	*TKM'nin %'si*	*0,8-2,8*	*1,6*	*1,5-4,0*	*2,5*	*2,8-11*
Potasyum (K_2O)	*TKM'nin %'si*	*0-1,0*	*0,4*	*0-3,0*	*1,0*	*0,5-0,7*
Selüloz	*TKM'nin %'si*	*8-15*	*10*	*8-15*	*10*	*-*
Demir (sülfit şeklinde değil)	*-*	*2,0-4,0*	*2,5*	*3,0-8,0*	*4,0*	*-*
Silika (SiO_2)	*TKM'nin %'si*	*15-20*	*-*	*10-20*	*-*	*-*
pH	*-*	*5-8*	*6*	*6,5-7,5*	*7*	*6,5-8*
Alkalinite	*mg $CaCO_3$/L*	*500-1500*	*600*	*2500-3500*	*3000*	*580-1100*
Organik Asitler	*mg HAc/L*	*200-2000*	*500*	*100-600*	*200*	*1100-1700*
Enerji İçeriği	*kJ/kg AKM*	*23000-29000*	*25000*	*9000-14000*	*12000*	*19000-23000*

Tablo 9.3. Atıksu çamurlarındaki metal içerikleri [1]

Metal	*Kuru Katılar (mg/kg)*	
	Aralık	*Medyan*
Arsenik	*1,1-230*	*10*
Kadmiyum	*1-3410*	*10*
Krom	*10-99000*	*500*
Kobalt	*11,3-2490*	*30*
Bakır	*84-17000*	*800*
Demir	*1000-154000*	*17000*
Kurşun	*13-26000*	*500*
Mangan	*32-9870*	*260*
Cıva	*0,6-56*	*6*
Molibden	*0,1-214*	*4*
Nikel	*2-5300*	*80*
Selenyum	*1,7-17,2*	*5*
Teneke	*2,6-329*	*14*
Çinko	*101-49000*	*1700*

9.1.4. Çamurlarda Hacim-Kütle İlişkisi

Çamur hacmi esas olarak su içeriği ile çok az da katı madde (KM) karakterine bağlıdır. Örneğin %10 KM çamur, ağırlıkça %90 su içeriyor demektir. Çamurdaki katı madde, sabit (mineral) ve uçucu (organik) katı olmak üzere ikiye ayrılır. Katı madde, sabit (mineral) katı ve uçucu organik katıdan oluşmuş ise katı maddenin özgül ağırlığı (9.1)'de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\frac{W_s}{S_s\,\rho_w} = \frac{W_f}{S_f\,\rho_w} + \frac{W_v}{S_v\,\rho_w} \tag{9.1}$$

Burada;

W_s :Katıların ağırlığı
S_s :Katıların özgül ağırlığı
ρ_w :Suyun yoğunluğu
W_f :Sabit katıların (mineral madde) ağırlığı
S_f :Sabit katıların özgül ağırlığı
W_v :Uçucu katıların ağırlığı
S_v :Uçucu katıların özgül ağırlığı

ifade edilmektedir.

Çamur hacmi ise (9.2)'ye göre tanımlanır;

$$V = \frac{W_s}{\rho_w\,S_s\,P_s} \tag{9.2}$$

Burada;

V :Hacim; m^3
W_s :Kuru katıların kütlesi; kg
ρ_w :Suyun özgül ağırlığı; 10^3 kg/m^3
S_s :Çamurun özgül ağırlığı
P_s :Yüzde katı madde oranı (ondalık olarak)

ifade edilmektedir.

Çamurun katı içeriği biliniyorsa, çamur hacminin katı madde içeriği ile ters orantılı olarak değiştiğini kabul ederek; çamur hacmi yaklaşık olarak hesaplanabilir (9.3).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \tag{9.3}$$

Burada;

V_1 *ve* V_2 :Çamur hacimleri
P_1 *ve* P_2 :Katı madde yüzdeleri

ifade edilmektedir.

Farklı atıksu arıtma işlemlerinden ve proseslerinde açığa çıkan çamurların beklenen katı madde içerikleri Tablo 9.4'te verilmektedir.

Tablo 9.4. Arıtma işlemlerinden/proseslerinden beklenen katı madde oranları

Uygulanan Arıtma İşlemi veya Prosesi	*Katı Madde Oranları (% kuru katı)*	
	Aralık	*Değer*
Ön-çökeltim Tankı		
Ön-çökeltim çamuru (Birincil çamur)	*5-9*	*6*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur (karışık çamur)	*3-8*	*4*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*4-10*	*5*
Ön-çökeltim çamuru + demir tuzları (fosfor giderimi amacıyla)	*0,5-3*	*2*
Ön-çökeltim çamuru + düşük kireç dozajı (fosfor giderimi amacıyla)	*2-8*	*4*
Ön-çökeltim çamuru + yüksek kireç dozajı (fosfor giderimi amacıyla)	*4-16*	*10*
Köpük	*3-10*	*5*
Son Çöktürme Tankı		
Ön-çökeltim uygulanmış atık aktif çamur	*0,5-1,5*	*0,8*
Ön-çökeltim uygulanmamış atık aktif çamur	*0,8-2,5*	*1,3*
Ön-çökeltim uygulanmış saf oksijen sistemi çamuru	*1,3-3*	*2*
Ön-çökeltim uygulanmamış saf oksijen sistemi çamuru	*1,4-4*	*2,5*
Damlatmalı filtre humusu	*1-3*	*1,5*
Döner biyolojik filtre atık çamuru	*1-3*	*1,5*
Graviteli Yoğunlaştırıcı		
Ön-çökeltim çamuru	*5-10*	*8*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*2-8*	*4*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*4-9*	*5*
Çözünmüş Hava Yüzdürmeli Yoğunlaştırıcı		
Polimer ilaveli atık aktif çamur	*4-6*	*5*
Polimer ilavesiz atık aktif çamur	*3-5*	*4*
Santrifüj ile Yoğunlaştırıcı		
Atık aktif çamur	*4-8*	*5*
Graviteli-Bantlı Yoğunlaştırıcı		
Polimer ilaveli atık aktif çamur	*4-8*	*5*
Anaerobik Çürütme		
Ön-çökeltim çamuru	*2-5*	*4*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*1,5-4*	*2,5*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*2-4*	*3*
Aerobik Çürütme		
Ön-çökeltim çamuru	*2,5-7*	*3,5*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*1,5-4*	*2,5*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*0,8-2,5*	*1,3*

9.1.5. Çamur Miktarı

Çamurlar ham atıksu içerisinde bulunan istenmeyen kirleticileri yüksek oranda içerebilmekte ve yüksek organik içeriklerinden dolayı çürüyerek istenmeyen kokulara sebep olmaktadır. Çamurlar ayrıca yüksek oranlarda su muhtevasına sahiptir. Bu yüzden atıksu arıtma tesislerinde üretilen çamurların su ve organik içerikleri azaltılmalı, geri kazanımları ve nihai uzaklaştırılmaları açısından da uygun prosesler ile arıtılmaları gerekmektedir. Çamurların işlenmesi ve arıtılmaları amacıyla uygulanan yöntemlerden yoğunlaştırma, şartlandırma, susuzlaştırma ve kurutma yöntemlerinde esas amaç nem içeriğinin azaltılmasıdır. Yakma, kompostlaştırma ve stabilizasyon gibi yöntemlerin amacı ise çamurun organik içeriğinin azaltılarak kararlı hale getirilmesidir. Çamurların çevreye duyarlı ve uygun bir şekilde işlenmeleri, arıtılmaları ve uzaklaştırılmaları için katı maddelerin kaynak ve miktarlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde bulunan arıtma birim ve proseslerinden kaynaklanan çamurlar ile biyokatılar ağırlıkça % 0,25-12 arasında değişen katı içeriklerine sahip genellikle sıvı veya yarı-sıvı formda bulunmaktadır. Son yıllarda biyokatı terimi çamurdan farklı bir anlamda kullanılmaya başlanmıştır. Biyokatılar stabilizasyon ve kompostlaştırma gibi prosesler ile arıtıldıktan sonra faydalı kullanım özelliğine sahip organik katılardır. Çamurlar ise yararlı kullanım kriterlerini taşımazlar ve ancak gerekli işlem ve proseslerden geçtikten sonra bu kriterleri sağlayabilirler. Çamurun faydalı kullanım özelliğine sahip olup olmadığı kesin olarak bilinmiyorsa, bu çamur katı madde olarak adlandırılır. Atıksuların arıtılması sırasında yüksek hacimlerde üretilen çamurların işlenmesi, geri kazanımı ve uzaklaştırılması atıksu arıtma tesislerinde karşılaşılan en karmaşık problemlerin başında gelir. Farklı atıksu arıtma işlemlerinden ve proseslerinden kaynaklanan çamur miktarları Tablo 9.5'te verilmektedir.

Atıksu arıtma tesislerine bir günde gelen katı madde miktarının geniş bir aralıkta salınım göstermesi beklenir. Bu sebeple çamurların işlenmesi, arıtılması ve uzaklaştırılması amacıyla kullanılacak sistemlerin bu salınımları karşılayabilecek şekilde tasarımı yapılmalıdır. Tasarım sırasında ortalama ve maksimum katı madde üretim hızları ile tesis içerisinde arıtma birimlerinin potansiyel depolama kapasiteleri de dikkate alınmalıdır. Sınırlı miktarlarda katı maddenin, çökelme ve havalandırma tanklarında geçici olarak depolanmaları mümkündür. Ayrıca değişken seviyelerde işletilmek üzere inşa edilen çürütme tankları da büyük depolama kapasitelerine sahiptir. Bu sebeple havasız çürütme birimlerinin yer aldığı atıksu arıtma tesislerinde, genellikle maksimum aylık yüklemelere göre tasarım yapılır. Çürütücülerin bulunmadığı atıksu arıtma tesislerinde ise tesisin mevcut depolama kapasitesi göz önüne alınarak tasarım yapılır. Çamur pompaları ve yoğunlaştırma birimleri, maksimum günlük çamur üretimini karşılayabilecek şekilde boyutlandırılmalıdır.

Avrupa Birliği ülkelerindeki kentsel AAT'lerden kaynaklanan ve susuzlaştırma sonrasında kek halinde uzaklaştırılan ortalama biyokatı miktarı eşdeğer nüfus (EN: Kentsel AAT sisteminde arıtılan atıksuyun 120 gr KOİ/kişi.gün kabulüyle hesaplanan eşdeğer nüfusu göstermektedir) ~60 g KM/EN.gün'dür. İSKİ'nin büyük kapasiteli AAT'lerindeki ortalama çamur oluşumu 50-60 g KM/EN.gün civarındadır [3]. Türkiye'de bu değerin, bölge bazında seçilmiş tesisler üzerinden değerlendirilmesi sonucunda kuru madde esas alındığında ortalama çamur miktarı 35±12 gr KM/EN.gün olduğu belirlenmiştir. Türkiye'de, bölgeler bazında oluşan günlük toplam çamur miktarlarına göre en az arıtma çamuru, arıtma kapasitesinin en düşük olduğu Karadeniz Bölgesinde (20 ton KM/gün), en fazla arıtma çamuru ise arıtma kapasitesinin en yüksek olduğu Marmara Bölgesinde (335 ton KM/gün) oluşmaktadır. Ayrıca, Doğu Anadolu Bölgesinde 31 ton KM/gün, Güney Doğu Anadolu Bölgesinde 51 ton KM/gün, Ege Bölgesinde 236 ton KM/gün, İç Anadolu Bölgesinde 228 ton KM/gün ve Akdeniz Bölgesinde 186 ton KM/gün çamur üretimi bulunmuştur. Ülkemiz genelinde üretilen çamur miktarı ise 1087 ton KM/gün olarak elde edilmiştir [4].

Ülkemizde arıtma çamurlarının yönetimiyle ilgili başlıca yasal çerçeve aşağıda özetlenmiştir:

- Atık Yönetiminin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (ÇŞB, 2008)
- Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010)
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010)
- Kentsel atıksuların Arıtımı Yönetmeliği (ÇŞB, 2006)
- Atıksu Arıtma Tesisleri teknik Usuller Tebliği (ÇŞB, 2010)

Tablo 9.5. Farklı atıksu arıtma işlemlerinden ve proseslerinden kaynaklanan çamurların fiziksel özellik ve miktarları

Arıtma İşlemi veya Prosesi	*Katı Maddelerin Özgül Ağırlığı*	*Çamurun Özgül Ağırlığı*	*Kuru Katı Maddeler ($kg/10^3\ m^3$)*	
			Aralık	*Tipik Değer*
Ön-çöketlim Tankı	*1,4*	*1,02*	*110-170*	*150*
Aktif Çamur (atık biyokatılar)	*1,25*	*1,005*	*70-100*	*80*
Damlatmalı Filtre (atık biyokatılar)	*1,45*	*1,025*	*60-100*	*70*
Uz un Havalandırmalı Aktif Çamur (atık biyokatılar)	*1,30*	*1,015*	*80-120*	*100[a]*
Havalandırmalı Lagünler (atık biyokatılar)	*1,30*	*1,01*	*80-120*	*100[a]*
Filtrasyon	*1,20*	*1,005*	*12-24*	*20*
Alg Giderimi	*1,20*	*1,005*	*12-24*	*20*
Ön-çöketlim Tankında Kimyasal Fosfor Giderimi				
Düşük Kireç Dozajı (350-500 mg/L)	*1,9*	*1,04*	*240-400*	*300[b]*
Yüksek Kireç Dozajı (800-1600 mg/L)	*2,2*	*1,05*	*600-1300*	*800[b]*
Askıda Büyüyen Nitrifikasyon	-	-	-	-[c]
Askıda Büyüyen Denitrifikasyon	*1,20*	*1,005*	*12-30*	*18*
Kaba Kum Filtreleri	*1,28*	*1,02*	-	-[d]

[a] Ön arıtma yok kabulü; [b] Ön-çöketlim ile giderilebilen katı maddelere ilave olarak; [c] İhmal edilebilir; [d] Biyolojik arıtma proseslerinde üretilen biyokatılara ilave olarak

9.2. Çamur İletimi

Arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamurların, diğer arıtma ve/veya bertaraf ünitelerine taşınması ve iletilmesi gerekmektedir. Arıtma çamurlarının iletilmesi ve taşınması pompalar yardımıyla gerçekleştirilir. Bu maksatla en sık kullanılan pompa tipleri şu şekildedir:

Mono pompa: Bu pompa tipi genellikle tüm çamur çeşitlerinde kullanılabilmektedir. Hacim veya "boşluk", rotor döndükçe emmeden deşarja kademeli olarak hareket eder. Kauçuk stator yanabileceğinden kuru iken çalıştırmamak gerekir. Bu tür pompalar 75 L/s debisine kadar çalışabilir ve 137 m terfi yüksekliklerine kadar iletim yapabilir. Bu pompaların özellikle yoğunlaştırılmış ön-çöketlim çamuru, karışık (ön-çöketlim çamuru ve biyolojik çamur) ve çürütülmüş çamurların iletiminde kullanılması tavsiye edilir.

Santrifüj pompa: Fan açıklığı uygun olan santrifüj pompalar tıkanma problemlerine karşı daha uygun oldukları için çamur iletiminde yaygın kullanılmaktadır. Bu tip pompalarda ana sorun uygun kapasitenin seçimidir. Değişken çamur özellikleri, pompa terfi yüksekliğinin değişmesine yol açar. Özel tasarlanmış santrifüj pompalar, büyük kapasiteli sistemlerde ön-çöketlim ve özellikle geri devir çamurlarının iletiminde kullanılır.

Tork-akışlı veya yüksek devirli santrifüj pompalar: Bu pompalar çamur iletiminde oldukça etkilidirler. Tutulabilen partiküllerin boyutları, emme ve basma borularının çapı ile kısıtlıdır. Çarkın döndürme kuvveti çark önünde girdap oluşturur, ancak burada esas itici güç sıvının kendisidir. Sıvının çoğu çarkla temas etmez, böylelikle aşındırıcı teması en aza indirmiş olur. Ancak çamurda kullanılan pompalar dönen aksamı aşındırma etkisine karşı nikel veya kromdan olmalıdır. Pompalar verilen hızlar için dar yük aralığında çalıştırılmalıdırlar, böylece sistem çalıştırma şartları dikkatlice değerlendirilmiş olur. Pompaların geniş aralıklı işletme şartlarında da çalıştırılacağı düşünüldüğünde, değişken hız kontrolleri önerilmektedir.

***Diyafram Pompalar*:** Esnek bir membrana sahip olan diyafram pompalar, itme ve çekme etkisi ile kavitasyon yaratırlar. Akım, çek-valf (kontrol vanası) vasıtasıyla bu kavitasyon içine yönlendirilir. Diyafram pompaların kapasitesi diyafram stroğunun uzunluğu ve dakikadaki strok sayısı ile değişir. Bunlar düşük kapasitedeki ve düşük yük kayıplarının olduğu yerlerde kullanılan pompalardır. En büyük kapasitedeki hava diyaframlı pompa, 14 L/s debiyi 15 m yüksekliğe basma kapasitesindedir.

Yüksek Basınçlı Piston Pompalar: Yüksek basınçlı piston pompalar, çamurun uzun mesafelere taşınması gibi yüksek basınç uygulamalarında kullanılırlar. Yüksek basınç uygulamaları için geliştirilmiş birçok tipi vardır, işleyişi dalgıç pompalara benzer. Avantajları: Yüksek basınçlarda küçük debiler iletebilir (13800 KN/m^2); büyük partikülleri basabilecek çaplarda olabilir; belli katı konsantrasyonu aralığında çalışabilir; pompajı tek kademede gerçekleştirebilirler. Bu avantajlarına karşılık çok pahalıdırlar.

Üretilen çamurun kaynak ve özelliğine göre, farklı tipte pompaların kullanımı gerekebilir. Çamur tiplerine göre hangi tip pompanın seçileceği Tablo 9.6'da özetlenmiştir.

9.2.1. Çamurun Reolojik Özellikleri ve Yük Kaybıyla İlişkisi

Su, yağ ve diğer birçok sıvı "Newtonian" olup, laminer akım şartlarında basınç düşüşü hız ve viskozite ile doğru orantılıdır. Hız kritik değeri geçtikçe, akış türbülanslı olmaya başlar. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısına bağlı olup, akışkan viskozitesi ile ters orantılıdır. Ancak atıksu çamuru "Newtonian" karakterde değildir. Laminer şartlar altında basınç düşüşü akış ile doğru orantılı olmayıp, ayrıca viskozite de sabit değildir. Yoğunlaştırılmamış aktif çamur ve damlatmalı filtre çamurunun iletimindeki sürekli yük kaybı, suyun iletilmesi durumundaki yük kaybından %10-25 daha büyüktür. Düşük akım hızlarında birincil, çürütülmüş ve yoğunlaşma çamur plastik davranış gösterir. Bu durumda direncin yenilebilmesi için önce belli bir basınca ulaşmak gerekir ve sonra akış başlar. Laminer akış boyunca, düşük kritik hız ~0,5 m/s'ye ulaşıncaya kadar hızın artışı ile sürtünme direnci hızla artar. Yaklaşık 1,0 m/s den daha yüksek kritik hızda akış türbülanslı olarak düşünülebilir. Birincil ve konsantre çamurlar için özellikle kritik altı hızlarda (<0,5 m/s) yük kaybı oldukça büyük olabilir.

Kısa çamur iletim hatları için yük kaybının hesabında nispeten kolay bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemle yük kaybını hesaplamak için k çarpım faktörü, verilen çamur tipi ve katı konsantrasyonu için geliştirilmiş deneysel eğriden elde edilir (Şekil 9.2). Pompalanan çamurun yük kaybı, *Darcy-Weisbach, Hazen-Williams* veya *Manning* eşitlikleri kullanılarak su için bulunan yük kaybı *k* ile çarpılarak bulunur. Arıtma sisteminde çamur hatları genellikle kısa (<1000 m) olduğundan, sürtünme kayıpları için anılan basitleştirilmiş hesap yöntemini uygulamak yeterlidir. Uzun çamur hatlarında sürtünme kaybının tahmin edilmesi, reolojik, hidrolik, ekonomik ve işletme durumlarını da içeren daha kapsamlı bir çalışmayı gerektirir.

Çamurun uzak mesafelere taşınması için, çamurun reolojik özelliklerini dikkate alan özel bir yük kaybı hesap metodu da geliştirilmiştir. Söz konusu yük kaybı hesap metodu, Babbitt ve Caldwell [5] tarafından deneysel ve teorik çalışmalar sonucu laminer akım şartları için geliştirilmiştir. Su, yağ ve diğer birçok sıvılar "Newtonian" olup, laminer akım şartlarında basınç düşüşü doğrudan hız ve viskozite ile orantılıdır. Hız artışı kritik değeri geçtikçe, akış türbülanslı olmaya başlar. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısına bağlı olup, akışkan viskozitesi ile ters orantılıdır. Ancak atıksu çamuru "Newtonian" karakterde değildir. Laminer şartlar altında basınç düşüşü akış ile orantılı olmayıp, ayrıca viskozite de sabit değildir. Karşılaşılan türbülanslı akım özelliğinde Reynolds sayısı çamur için belli değildir.

Tablo 9.6. Çamur tiplerine göre uygun pompalar

Çamur, Katı Madde veya Biyokatılar	*Pompa Tipi*	*Açıklama*
Izgara ve elekte tutulan atıklar	*Pompalanmasından kaçınılmalıdır*	*Pnömatik ejektör kullanılabilir*
Kum	*Tork akışlı (yüksek devirli) santrifüj*	*Aşındırıcı karakteri ile çaput, mendil vb. maddelerin bulunması, kumun pompalanmasını zorlaştırır. Sertleştirilmiş kaplamalar ve pervaneler kullanılmalıdır. Pnömatik ejektör de kullanılabilir*
Köpük/yağ	*Klapeli, Mono pompa, Diyafram, Açık fanlı santrifüj*	*Köpük genellikle çamur pompası ile pompalanır. Vanalar, çamur/köpük hatları buna izin verecek şekilde ayarlanır. Daha büyük tesislerde, ayrı köpük pompaları kullanılır. Pompalanmadan önce, homojenleştirmek için sıklıkla köpük karıştırıcılar kullanılır. Pnömatik ejektör de kullanılabilir.*
Ön-çökeltim (Birincil) çamur	*Klapeli, tork- akışlı santrifüj, Diyafram Mono pompa, Döner loplu, Açık fanlı santrifüj, Peristaltik hortumlu*	*Birincil çamurun mümkün olduğu kadar yoğun/konsantre olması istenir, çamur toplama haznesinde biriktirilerek; daha sonra aralıklarla pompalanır. daha sonra pompalanır. Ham ön-çökeltim çamurunun özelliği, arıtma sistemi tipine, verimine ve atıksulardaki katı maddelerin özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Birçok durumda, çamurun karakteri konvansiyonel tıkanmaz özellikte santrifüj pompalar için uygun değildir. Çaput, mendil vb. maddelerin bulunması durumunda bıçaklı tipte pompalar da kullanılabilir*
Kimyasal çöktürme çamuru	*Ön-çöktürme çamuru ile aynı pompa tipleri*	*Kullanılan kimyasalın tipine ve miktarına bağlı olarak büyük miktarlarda inorganik içeriğe sahip olabilir*
Damlatmalı filtre çamuru/humusu	*Tıkanmasız ve tork akışlı santrifüj, Mono pompa, Klapeli,*	*Humus genellikle homojen karakterde olup; kolaylıkla pompalanır.*
Geri devir veya atık-aktif çamur	*Diyafram pompalar*	*Çamur seyreltiktir ve sadece ince katıları içerdiğinden; tıkanmasız pompalar da kullanılabilir. Floklu yapıdaki partiküllerin parçalanmalarını en aza indirmek için tıkanmasız pompalarda düşük hızlar önerilir*
Çürütülmüş biyokatılar	*Klapeli, Tork akışlı santrifüj, Mono pompa, Diyafram, Yüksek-basınçlı piston, Döner loplu*	*İyi çürütülmüş biyokatılar homojen olup; %5-8 katı madde ile bir miktar gaz kabarcıkları içerir, %12 oranına kadar katı madde içerebilir. İyi çürütülmemiş biyokatıların işlenmesi zor olabilir. Eğer iyi bir şekilde ızgaradan geçmiş ve yeterli kum giderimi sağlanmış ise; tıkanmasız santrifüj pompalar da düşünülebilir*
Yoğunlaştırılmış/konsantre hale getirilmiş çamur	*Klapeli, Mono pompa, Diyafram, Yüksek-basınçlı piston, Döner loplu*	*Pozitif yer değiştirmeli pompalar, çamur kütlesini hareket ettirebilme özelliğine sahip olduğundan; konsantre çamurlar için en uygunudur. Tork akışlı pompalar da kullanılabilir ancak basınçlı su veya seyreltme ilavesi gerekebilir*

Çamurun Bingham plastik karakteri gösterdiği bilinmektedir. Bu özelliğe göre akış başladıktan sonra kayma gerilmesi ve akış arasındaki doğrusal ilişki vardır.

Konu ile ilgili daha kapsamlı uygulama EK1'de verilmiştir.

Şekil 9.2. Farklı çamur tip ve konsantrasyonları için yük kaybı çarpım faktörleri

Çamurun Bingham plastik karakteri gösterdiği bilinmektedir. Bu özelliğe göre akış başladıktan sonra kayma gerilmesi ve akış arasındaki doğrusal ilişki vardır. Bingham plastiği olarak tanımlanan çamur için sürtünme faktörünün hesaplanmasında Şekil 9.3'ten yararlanılmaktadır [6].

Şekil 9.3. Çamur reolojisine göre borularda yük kaybı hesabı eğrileri

9.2.2. Çamurun Borularla İletimi

Arıtma tesislerinde, çamurların iletildiği boru hatlarında çap 150 mm'den küçük olmamalıdır. Hız 1,5-1,8 m/s'yi aşmadığı sürece boru çapı 200 mm'den büyük olmamalıdır. Çamur geri devir hattının çapı 200 mm'den az olmamalıdır. Pompa bağlantı borularında da çap 100 mm'den küçük olmamalıdır. Birincil çamur ve köpüğün taşınımında çamurdaki gres borunun iç çeperler de kek oluşturma eğilimindedir. Gres birikimi büyük sistemlerde küçük sistemlere kıyasla daha fazla probleme yol açar. İç çeperlerin kaplanması, etkin çapı azaltıp terfi yüksekliğini büyük oranda arttırır. Bu yüzden, düşük kapasiteli mono pompalar için hesaplanan teorik yükün belli oranda fazlası esas alınır. Sulu çamurun pompalanması durumunda, yağ birikiminin yol açacağı yük kaybı daha uzun sürede ve yavaş oluşacaktır. Bazı sistemlerde, gres tabakasını eritmek için, ana boru hattından zaman zaman sıcak su, buhar veya çürütme tankı üst suyu geçirilir.

Arıtma sistemlerinde, boru boylarının kısa olması dolayısıyla sürtünme kayıpları genellikle daha az olur ve emniyet faktörü belirlemede daha az zorlukla karşılaşılır. Uzun çamur hatlarının tasarımında, aşağıda özel tedbirler önerilmektedir;

- Tek boru hattının tıkanması durumuna önlem olarak iki boru hattı önerilir.
- Dış korozyon ve toprak/trafik yükleri için önlemler alınır.
- Basınçlı çamur hattına arıtılmış atıksu vermek için ilave tedbirler alınır.
- Arıtma sistemine boru temizleyici yerleştirmek için gerekli donanım temin edilir.
- Buhar enjeksiyonu imkânı için tedbirler alınır.
- Yüksek ve düşük noktalarda hava tahliye ve sıvı boşaltma vanaları bulundurulur.
- Su darbesi etkileri de dikkate alınır.

Problem 9.1

Eşdeğer nüfusu 1.000.000 kişi olan bir biyolojik AAT'de oluşan ~%3 KM'ye yoğunlaştırılmış karışık çamurlar, anaerobik olarak çürütülmek üzere ~10 km mesafedeki başka bir AAT sahasına terfi edilecektir. İki tesis arasında çamur iletimini sağlayacak Terfi Merkezinin (TM) geometrik yüksekliği $H_0 \cong 20$ m alınabilmektedir. Yüksek Yoğunluk Polietilen (YYPE) terfi hattını boyutlandırarak, terfi merkezindeki pompaların kapasite ve kurulu güçlerini belirleyiniz? Yıllık terfi enerji giderini bulunuz? AAT'de karışık çamur üretimi 50 g.KM/EN.gün, elektrik birim fiyatı ~0,07 $/ kWsa alınacak, gerekli diğer verilerle ilgili uygun mühendislik yaklaşımı yapılacaktır.

Çözüm.

<u>*Çamur miktarı:*</u>

AAT'de karışık çamur üretimi 50 g.KM/EN.gün = 0,05 kg KM/EN.gün

$$W_x = 0{,}05\, kg/N\ gün * 10^6\ kişi$$
$$= 50.000\, kg\ KM/\ gün\ (Çamurun\ katı\ madde\ oranı\ \%3KM\ kabul\ edilirse);$$

$$Q_x = \frac{50 * 10^3\ kg\ KM/\ gün}{0{,}03 * 1000\, kg/\ m^3} = 1667\, m^3/gün\,, \sim\%3\ KM$$

$$Q_{x,ort.} = 1667/16 \cong 104\, m^3/sa = 0{,}0289\ m^3/s\ (16\ sa\ süreyle\ terfi\ kabul)$$

<u>*İletim hattı çapı:*</u>

$$v \cong 1{,}0\, m/s$$

$$A\ (m^2) = \left(\frac{\pi * D^2}{4}\right)$$

$$D = \left(\frac{0{,}0289 * 4}{1{,}0 * \pi}\right)^{1/2} \cong 0{,}192\ m \rightarrow Seçilen\ Ø200\ mm$$

$$v^* = \left(\frac{0{,}192}{0{,}200}\right)^2 * 1000 = 0{,}92\ m/s$$

Sürekli yük kaybı:

$n = 0{,}010$ *için Manning formülü esas alınırsa,*

$$v = \frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2} \rightarrow J_{su} = \left(\frac{0{,}010 * 0{,}92}{\left(\frac{0{,}20}{4}\right)^{2/3}}\right)^2 = 0{,}0046$$

%3 KM'li çamur için çarpım faktörü $f \cong 2{,}5$ *(Şekil 9.2) alınarak 10 km'lik terfi hattındaki sürekli yük kaybı,*

$$h_{s,çamur} \cong 2{,}5 * (0{,}0046 * 10.000) = 115\ m$$

bulunur.

Toplam yük kaybı:

Yersel yük kayıpları toplam $h_y \cong 5$ *m alınırsa TM'deki çamur pompalarının manometrik terfi yüksekliği,*

$$H_m = H_0 + h_s + h_y = 20 + 115 + 5 = 140\ mss$$

bulunur.

Gerekli pompa gücü:

$$N = \frac{\gamma\ Q\ H_m}{102\ \eta_p\ \eta_m}\beta = \frac{1000 * 0{,}0289 * 140}{102 * 0{,}80 * 0{,}80} * 1{,}2 \cong 75\ kW$$

Pompa sayısı: 2 (1 asıl + 1 yedek)

Yıllık enerji masrafı:

$$E = 75\ kW * 16\ sa/gün * 365 * 0{,}07\ \$/kW\ sa = 30.660\ \ \$/yıl$$

Konu ile ilgili daha kapsamlı uygulama EK1'de verilmiştir.

9.3. Çamur Arıtma Sistemleri

1970'lerin sonlarından bu yana arıtma çamurlarının yönetimi Dünya genelinde bu sektörün en önemli konulardan biridir. Bu yüzden, çamurların işlenmesi ve uzaklaştırılmasıyla ilgili yönetmelikler, halk sağlığını ve güvenliğini en üst seviyede sağlamak üzere gün geçtikçe sıkılaştırılmaktadır. Diğer uzaklaştırma yöntemleriyle kıyaslandığında en cazip ve ekonomik seçenek arazi uygulamasıdır. Bu yöntem ile çamurun gübre değerinden yararlanılır. Çamurların tarımsal kullanımı teşvik edilse bile, içeriklerinde bulunan yüksek patojen organizmalar, ağır metaller ve organik maddelerin toprağa, bitki örtüsüne, hayvanlara ve insanlara zararlı etkilerinin önlenmesi gerekmektedir. AB direktiflerinin güncellenmesinde ileri ve konvansiyonel olmak üzere iki seviyede arıtma önerilmektedir. Böylece evsel atıksu çamurlarındaki ağır metal içeriklerinin izin verilen seviyelere kadar azaltılması öngörülür. Önerilen konvansiyonel ve ileri arıtma ile patojen organizma içeriklerinde en az sırasıyla 2 log ve 6 log azalma sağlanabilmelidir. Konvansiyonel arıtma ile arıtılan çamurların tarımsal amaçlı kullanımında, özellikle salata vb. gibi pişirilmeden tüketilen ürünler insan sağlığı açısından risk taşıyorsa, son çamur uygulaması hasattan 30 gün yapılmalıdır.

ABD'de EPA sınıflandırmasındA'A Sınıfı' biyokatı tanımı İngiltere'de revize edilen 'Tarımda Çamur Kullanımı Yönetmeliği'nde de geçerlidir. Bu sınıfa giren biyokatılarda, en yüksek arıtma seviyesi olarak adlandırılan ileri arıtma uygulaması ile patojen organizmalarda 6 log azalma ve 1 gr kuru katı içerisinde en yüksek *E.Coli* konsantrasyonunun 10^3 olması öngörülür. Böylece insan sağlığını tehdit edecek riskin önlenmesi ve toplumun arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı kullanımına karşı güven duyması sağlanabilir. Bu durumda patojen içeriği

açısından 'sıfır tolerans' yaklaşımı ortaya çıkmaktadır. Ancak %99,9999 patojen mikroorganizma giderimi sağlanabilse bile çamurların araziye uygulanmasında 1 gr çamur başına 1000 adet patojen mikroorganizma miktarının bulunduğu ve potansiyel olarak insan sağlığını riske atabileceği düşünülmektedir.

Kompostlaştırma, kireç ile stabilizasyon, çürütme ve pastörizasyon yöntemleri kısa ve orta vadede çözüm getirse bile uzun vadede çamurları tamamen farklı ve daha kabul edilebilir ürünlere dönüştürebilecek yeni teknolojiler araştırılmalıdır. Böylece atıkların arıtımları sonucunda ortaya çıkan istenmeyen yan ürünlerin tekrar kullanımları ve arzu edilen yeni kaynaklara çevrimleri mümkün olacaktır. Günümüzde en fazla kabul gören 2 temel teknolojiden ilkinde arıtma çamurları gazlaştırma veya birlikte yakma yöntemleri ile enerji kaynağı olarak kullanılmakta, ikinci teknolojide ise atıksu arıtma çamurları kurutularak gübre amaçlı kullanılmaktadır. En çok kabul gören kurutma yaklaşımı ise termal kurutmadır. Termal kurutma ile ortaya çıkan nihai ürün, çamur ile hiç benzerlik göstermez. Termal kurutma yöntemi ile %90-92 oranında kuru katı içeriğinde elde edilen nihai üründe ağırlık ve hacimde belirgin olarak azalma sağlanabilmektedir. Bu durum nihai bertaraf amacıyla uzak yerlere nakliyesi sırasında kolaylık ve maliyette belirgin ekonomi sağlar. Ortaya çıkan ürün tamamen kokusuzdur ve ticari amaçlı satılan gübreye benzer bir fiziksel görünüme sahiptir. Bu sebeple gerek kimyasal içeriği bakımından gerekse saflığı ve sterilizasyonu bakımından tamamen gübre özelliği taşıyan bu ürün paketlenerek etiketlenebilmekte ve güvenli olarak pazarlanabilmektedir. Ultrasonik ve γ ışın yöntemleri ile gerçekleştirilen ileri teknolojiler ise halen araştırma aşamasındadır.

Şekil 9.1'de gösterilmiş olan genelleştirilmiş çamur işleme, arıtma ve uzaklaştırma yöntemlerine ek olarak; biyolojik çürütme ile üç farklı çamur susuzlaştırma prosesini içeren akım şemaları Şekil 9.4'te gösterilmektedir.

9.3.1. Ön İşlemler

Atıksu arıtma tesislerinde açığa çıkan çamurlar ön-çökeltim tankları, son-çökeltim tankları ve ileri arıtma proseslerinden kaynaklanır. Ön-çökeltim çamuru (birincil çamur), ham atıksudaki çökebilen katıları içerir. Son-çökeltim çamuru biyolojik ve ilave çökebilen katıları içerir. İleri arıtma proseslerinden kaynaklanan çamurlar ise farklı biyolojik ve kimyasal özellikte katıları içermektedir. Atıksu arıtma tesislerinde üretilen çamurlar; çamur arıtma proseslerine beslenirken nispeten sabit debide, homojen, plastik vb. geri kazanımı mümkün maddelerden ayrılmış bir şekilde beslenmelidir. Bu sebeple, katılar ve biyokatılar genellikle öğütme, ızgaradan geçme, kum ayırma, karıştırma ve depolama gibi ön-işlemlerden geçirilmektedir.

9.3.1.1.Öğütme

Çamurların öğütülmesi, tıkanmaları ve dönen ekipmanlara sarılmaları önlemek için, çamurdaki büyük ve şerit halindeki maddeleri kırma veya kesme kuvveti ile küçük parçacıklar haline getirme prosesidir. Çamur öğütmeyi gerektiren bazı işlemler/prosesler ve amaçları şu şekilde sıralanabilir: (i) Mono pompayla pompalama sırasında tıkanmanın önlenmesi ve aşınmanın azaltılması; (ii) Santrifüjle susuzlaştırma sırasında tıkanmanın önlenmesi; (iii) Bant filtre ile susuzlaştırma sırasında çamur dağıtım sisteminin tıkanmasının ve merdanenin bel vermesinin önlenmesi, bantların yıpranmasının/aşınmasının azaltılması ve daha homojen bir susuzlaştırmanın sağlanması.

9.3.1.2.Kum Ayırma

Ön-çökeltim tanklarının ön kısmında, kum tutucuların kullanılmadığı bazı tesislerde veya kum tutucuların pik debileri ve yükleri karşılamakta yetersiz kaldığı durumlarda, çamurun işlenmesinden önce kumun ayrılması gerekebilir. Birincil çamurun yoğunlaştırılması

planlanıyorsa, çamurdan kum ayırma pratik bir çözümdür. Çamurdan kum ayırmanın en etkin metodu, santrifüj kuvvetlerinin uygulanmasıdır. Bu işlem hiçbir hareketli parçası olmayan (hidro) siklon kum ayırıcılarla gerçekleştirilebilir. Çamur siklonun silindirik besleme kısmına teğetsel olarak gönderilir ve üzerine bir santrifüj kuvveti uygulanır. Ağır kum partikülleri silindir kısmın altına gider ve tabandaki konik kısımdan dışarı atılır. Organik çamur ise ayrı bir çıkıştan (üstten) deşarj edilir. Siklon kum tutucunun verimi, basınca ve çamurdaki organik madde konsantrasyonuna bağlıdır. Verimli bir kum giderimi için çamur seyreltik olmalıdır. Çamur konsantrasyonu arttıkça, giderme verimi düşer. Siklon kum tutucular kullanıldığında, üstten atılan çamur genellikle yoğunlaştırıcıya gönderilir.

9.3.1.3.Karıştırma

Arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların üniform (homojen) bir şekilde karıştırılarak sonraki arıtma birimine iletilmeleri gerekir. Özellikle susuzlaştırma, ısı ile arıtma ve yakma gibi kısa bekletme sürelerinde işletilen sistemlerde çamurların homojen karışımları çok önemlidir. Aksi halde arıtma tesisinin performansında belirgin bir azalma gözlenebilir. Çamurların karıştırılması şu şekillerde gerçekleştirilir:

- ***Ön-çökeltim tankında*:** Son-çökeltim çamuru ve ileri arıtma proseslerinden kaynaklanan çamurlar ön-çökeltim tanklarına geri devrettirilerek karıştırılır ve ön-çökeltim çamuru ile birlikte çökeltilirler. Bu yöntem genellikle kapasitesi 0,05 m^3/s değerinin altındaki (küçük) tesislerde önerilir.
- ***Borularda*:** Çamurlar boruların içerisinde karıştırılabilirler; böyle durumlarda özenli kontrol ve dikkat gerekir.
- ***Uzun bekletme süresi gerektiren sistemlerde:*** Çamurlar, tam karışımlı aerobik veya anaerobik çürütücüler gibi uzun bekleme sürelerinde işletilen çamur stabilizasyon proseslerinde karıştırılabilirler.
- ***Ayrı karıştırma tanklarında:*** Çamurlar ayrı karıştırma tanklarında karıştırılabilirler (en iyi sonuç bu yöntem ile elde edilmektedir).

Büyük kapasiteleri atıksu arıtma tesislerinde üretilen çamurların karıştırılmadan önce ayrı olarak yoğunlaştırılmaları ve yoğunlaşmış çamurların karıştırılması, optimum performansın elde edilebilmesi bakımından tavsiye edilmektedir. Debisi 0,05 m^3/s değerinin altındaki arıtma sistemlerinde, karıştırma genellikle ön-çökeltim tanklarında gerçekleştirilir. Daha büyük kapasiteli sistemlerde, karıştırma uygulanmadan önce çamurun ayrı yoğunlaştırıldığı durumda optimum verim elde edilir.

Şekil 9.4. Biyolojik çürütme ve üç farklı çamur susuzlaştırma prosesini içeren akım şeması: (a) bant-filtre pres, (b) santrifüj, (c) kurutma yatağı

9.3.1.4.Depolama

Çamurların depolanması, besleme akımında karşılaşılacak salınımları dengelenmek ve proseslerin işletme dışı kaldığı dönemlerde çamurların biriktirilmelerine imkân vermek amacıyla uygulanmaktadır. Anaerobik ve aerobik çürütücülerin bulunmadığı büyük tesislerde, çamurun birkaç saatten birkaç güne kadar bekletildiği ayrı karıştırma ve depolama tankları inşa edilir. Çamurların 2-3 günden daha fazla bekletildiği depolama tanklarında, çamur bozunarak istenmeyen koku problemlerine sebep olmaktadır. Ayrıca bu çamurların susuzlaştırılmaları da daha zordur. Çamurlar depolanmaları sırasında havalandırılarak septik şartların oluşumu engellenir. Çamurların depolanmaları ve karıştırılmaları sırasında karşılaşılan septik şartların ve kokunun önlenebilmesi için klor, demir tuzları, potasyum permanganat ve hidrojen peroksit gibi kimyasal maddeler tank içerisine sınırlı miktarlarda ilave edilebilir. Ayrıca hidrojen sülfür gazından oluşan kokunun kontrolü ve bu gazın çözelti içerisinde tutulabilmesi için sodyum hidroksit ve kireç ile pH değeri arttırılabilir. Çamur depolama kapalı tanklar içerisinde gerçekleştirilecekse, uygun koku kontrol teknolojileri ile desteklenerek tankın içerisi havalandırılmalıdır. Bu teknolojiler öncelikle kimyasal sıyırıcılar veya biyofiltrelerdir. Havalandırma işlemi ayrıca çamurun karıştırılmasına da yardımcı olmaktadır.

9.3.1.5.Izgara

Atıksu arıtma tesislerindeki ızgaralar önemli miktarda katı maddelerin geçişine sebebiyet verdikleri için; arıtma çamurlarının ızgaradan geçirilmeleri öğütme işlemine bir alternatif olarak düşünülebilir. Izgaraların açıklıkları normalde 3-6 mm aralığında olup; 10 mm açıklığa sahip ızgaralar da kullanılabilmektedir. Çamur beslemesinin yapıldığı boru hattı içerisine monte edilmiş ızgara tipleri (5 mm açıklıkta) de bulunmaktadır. Izgarada tutulan katıların katı madde (KM) oranları %30-50 aralığında değişebilmektedir. Izgaradan geçen çamur ise seyreltik olup; diğer arıtma ünitelerine beslenmeden önce yoğunlaştırılması gerekebilir.

9.3.2. Yoğunlaştırma

Yoğunlaştırma çamurun bünyesinde bulunan sıvı kısmın belirli bir miktarının giderilerek katı içeriğinin arttırılmasıdır. Örneğin son çökeltme tanklarından uzaklaştırılan atık aktif çamurun %0.8 katı içeriği %4 katı içeriğine kadar yoğunlaştırılarak çamur hacminde yaklaşık 5 kat azalma elde edilebilmektedir. Yoğunlaştırma amacıyla uygulanan yöntemler birlikte-çökelme, yerçekimi etkisiyle (graviteli), yüzdürmeli, santrifüj (merkezkaç) ve döner tamburlu yoğunlaştırmadır. Yoğunlaştırma işlemi uygulanarak çamurlarda gerçekleştirilen hacim azalmasının takip eden proseslerde çok önemli ve ekonomik faydaları bulunmaktadır. Bu sayede kullanılan tank ve ekipmanların kapasiteleri azalır ve çamurların şartlandırılmaları sırasında kullanılan kimyasal madde miktarları önemli ölçüde düşer. Ayrıca çürütücülerin ısıtılmaları amacıyla gerekli olan ısıtma ihtiyacı ve ısı ile kurutma ve yakma gibi prosesler için gereken yardımcı yakıt ihtiyacı azalır. Ayrıca çamurların uzak mesafelere nakliyesini gerektiren, özellikle büyük kapasitelerde işletilen arıtma tesislerinde, çamurların hacimlerindeki azalma iletilmeleri için kullanılacak pompa boyutlarında önemli oranlarda küçülme sağlamaktadır. Kapasitesi 4000 m^3/gün'den küçük olan tesislerde genellikle ön-çökeltim tanklarında, çamur çürütücülerde veya her ikisinde çamurların birlikte yoğunlaştırılma işlemi gerçekleştirilir. Ayrı yoğunlaştırma, genellikle büyük kapasitelerde işletilen arıtma tesislerinde ekonomik olmaktadır. Yoğunlaştırma işleminde kullanılan ekipmanların çoğu mekaniktir ve tasarımları sırasında pik ihtiyaçları karşılayabilecek kapasitelerde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca yoğunlaştırıcılarda oluşabilecek septik şartların ve koku probleminin önlenmesi için de tasarım sırasında gerekli önleyici tedbirlerin alınması gerekir.

9.3.2.1.Graviteli Yoğunlaştırma

Çamur yoğunlaştırmada en yaygın olarak uygulanan yöntem, graviteli (yerçekimi etkisiyle) yoğunlaştırmadır. Bu yoğunlaştırıcıların tasarımları konvansiyonel çökelme tankları ile benzerlik gösterir. Yoğunlaştırma işlemi genellikle dairesel tanklarda gerçekleştirilir ve sulu çamur merkezde bulunan bir besleme bölmesinden tanka beslenir (Şekil 9.5). Beslenen çamur çökeltilerek yoğunlaştırılır ve yoğunlaşmış çamur tankın konik tabanından çekilerek bir sonraki prosese gönderilir. Üst su (duru faz) ise ya arıtma tesisinin başına ya da ön-çökeltim tankına geri devrettirilir. Graviteli yoğunlaştırmanın en etkili olduğu çamur tipi işlem görmemiş (ham) ön-çökeltim çamurlarıdır. Bu tip yoğunlaştırıcılar katı madde yükleme hızlarına ve yüzeysel hidrolik yükleme hızlarına göre boyutlandırılır. Tavsiye edilen hidrolik yükleme hızları ön-çökelme çamuru için 15,5-31 m^3/m^2.gün, atık aktif çamur için 4-8 m^3/m^2.gün ve karışık (ön-çökeltim + atık aktif çamur) için ise 6-12 m^3/m^2.gün olarak verilmektedir. Hidrolik yükleme hızı tavsiye edilen aralık değerinden düşük ise, tank içerisinde oluşan septik şartlar ve istenmeyen koku oluşturan gazlar yoğunlaşmış çamurun yüzmesine sebep olur. Hidrolik yükleme hızı tavsiye edilen aralık değerinden yüksek ise savaklardan katı madde kaçışı gözlenir ve çıkış suyu kalitesi azalır. İşletme sırasında yoğunlaştırıcının tabanında bir çamur battaniyesi oluşturularak çamurun konsantre hale gelmesi sağlanır. Çamur yoğunlaştırıcıların tasarımı sırasında göz önüne alınması gereken diğer bir işletme parametresi de çamur-hacim oranıdır. Bu oran, yoğunlaştırıcı içerisinde tutulan çamur battaniyesi hacminin, bir günde sistemden uzaklaştırılan yoğunlaşmış çamur hacmine oranı olarak ifade edilir. Çamur hacim oranın değeri 0,5-20 gün arasında değişmektedir. Sıcak havalarda bu oran daha da düşebilmektedir. Buna ilave olarak tank içerisindeki çamur battaniyesinin yüksekliği de ölçülmelidir. Bu değer 0,5-2,5 m arasında değişmekte ve sıcak havalarda daha da düşebilmektedir. Yoğunlaşmış ve yoğunlaşmamış çamur konsantrasyonları ve graviteli yoğunlaştırıcılar için katı madde yükleme hızları Tablo 9.7'de verilmektedir.

1. Besleme
2. Çamur çıkışı
3. Üst akım (sıvı) çıkışı
4. Tahrik ünitesi
5. Giriş kuyusu
6. Savak
7. Üst akım ayırıcı
8. Sıyırıcı
9. Karıştırıcı
10. Köpük tarayıcı

Şekil 9.5. Graviteli yoğunlaştırıcı; a) plan ve b) kesit

Tablo 9.7. Yoğunlaşmış ve yoğunlaşmamış çamur konsantrasyonları ve graviteli yoğunlaştırıcılar için katı madde yükleme hızları [1]

Çamur veya Biyokatı	*Katı Madde Oranı (%)*		*Katı Madde Yüklemesi*
	Yoğunlaşmamış	*Yoğunlaşmış*	*kg/m^2.gün*
Ayrık			
Ön-çökeltim çamuru	*2-6*	*5-10*	*100-150*
Damlatmalı filtre humusu	*1-4*	*3-6*	*40-50*
Döner biyolojik temas tankı atık çamuru	*1-3,5*	*2-5*	*35-50*
Atık aktif çamur	*0,5-1,5*	*2-3*	*20-40*
Uz un havalandırmalı aktif çamur	*0,2-1,0*	*2-3*	*25-40*
Anaerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim çamuru	*8*	*12*	*120*
Köpük			
Birleşik			
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*2-6*	*5-9*	*60-100*
Ön-çökeltim + döner biyolojik temas tankı çamuru	*2-6*	*5-8*	*50-90*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*0,5-1,5*	*4-6*	*25-70*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*2,5-4*	*4-7*	*40-80*
Atık aktif çamur + damlatmalı filtre humusu	*0,5-2,5*	*2-4*	*20-40*
Kimyasal (ileri) Arıtma Çamuru			
Yüksek kireç dozlu	*3-4,5*	*12-15*	*120-300*
Düşük kireç dozlu	*3-4,5*	*10-12*	*50-150*
Demir	*0,5-1,5*	*3-4*	*10-50*

9.3.2.2.Yüzdürmeli Yoğunlaştırma

Yüzdürmeli yoğunlaştırmada, yüksek basınç altında bir tankta tutulan sulu çamur içerisine hava basılır. Basıncı düşürülünce, çözünmüş hava küçük kabarcıklar halinde salınarak çamurun yüzdürme tankı yüzeyine doğru kaldırılmasını ve taşınmasını sağlar. Tank yüzeyinde biriken yoğunlaşmış çamur, buradan sıyrılarak uzaklaştırılır (Şekil 9.6).

Yüzdürmeli yoğunlaştırmanın en etkili olduğu çamur tipi askıda büyüyen biyolojik arıtma proseslerinden kaynaklanan atık çamurlardır. Yüzdürmeli yoğunlaştırıcı performansını etkileyen faktörler hava-katı oranı, çamur özellikleri (çamur hacim indeksi vb), katı yükleme hızı ve polimer uygulanmasıdır. Hava-katı oranı, yüzdürme için mevcut hava ağırlığının besleme akımında yüzdürülecek katı madde ağırlığına oranıdır ve %2-4 arasında değişim gösterir. Normal polimer dozajlarında, çamur hacim indeksinin 200'den düşük olması daha iyi bir performans izlenmesi açısından önerilmektedir. Çamur hacim indeksinin 200'den büyük olduğu durumda ise yüzeydeki çamur yapısı bozulur ve daha fazla polimer dozajlarına ihtiyaç duyulur.

1. Çamur girişi
2. Karıştırma haznesi
3. Basınç boşaltıcı eleman
4. Yüzen çamur ayıklama
5. Yüzen çamur uzaklaştırma
6. Sıyırıcı
7. Tam-akım basınçlandırma sistemi
8. Alt akım (su) çıkışı
9. Pompalar
10. Hava doygunluk tankı
11. Basınçlandırılmış hava
12. Çöken (ağır) çamur

Şekil 9.6. Yüzdürmeli yoğunlaştırma ünitesi akım şeması

Yüzdürmeli yoğunlaştırıcılarda katı maddeler atıksudan çok daha hızlı bir şekilde ayrılabildikleri için graviteli yoğunlaştırıcılara kıyasla bu tip yoğunlaştırıcılar daha yüksek yükleme hızlarında işletilebilmektedir. Fakat yüksek yükleme hızları, düşük katı konsantrasyonlarında yoğunlaşmış çamura sebep olmaktadır. Bu yüzden işletmenin performansının azalmaması için katı madde yükleme hızının 10 kg/m^2.saat değerini aşmaması gerekir. Yüksek yükleme hızlarında yüzeyde yoğunlaşan çamurların daha sık sıyrılmaları gerekir. Yüzdürmeye yardımcı olacak polimer eklenmesi ile yüzen çamurdaki katı geri kazanımı %85'ten %98-99'a kadar arttırabilmektedir. Örnek olarak atık aktif çamurun yüzdürmeli olarak yoğunlaştırılması için gerekli polimer dozajı 2-5 kg kuru polimer/ton KM olarak verilmektedir. Çözünmüş hava yüzdürmeli yoğunlaştırıcılar için önerilen katı madde yükleme hızları Tablo 9.8'de verilmektedir.

Tablo 9.8. Çözünmüş hava yüzdürmeli yoğunlaştırıcı tasarım için önerilen katı madde yükleme hızları [1]

Çamurun veya Biyokatının Tipi	***Katı Madde (KM) Yüklemesi (kg/m^2.saat)***	
	Kimyasal Madde İlavesiz	***Kimyasal Madde İlaveli***
Aktif çamur		
Tam karışım halinde	*1,2-3*	*10'a kadar*
Çökelmiş	*2,4-4*	*10'a kadar*
Damlatmalı filtre humusu çamuru	*3-4*	*10'a kadar*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*4-6*	*10'a kadar*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*3-6*	*10'a kadar*
Ön-çökeltim çamuru	*4-6*	*12,5'a kadar*

9.3.2.3.Mekanik Yöntemlerle Yoğunlaştırma

Bant Filtreler ile Yoğunlaştırma

Bant filtreler ile yoğunlaştırma teknolojisi, çamurların susuzlaştırılmalarında kullanılan bant-filtre pres uygulamaları ile ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde, özellikle katı madde konsantrasyonu %2'den daha düşük olan çamurlar için; bant filtrenin yerçekimi ile drene edildiği kısmında etkili bir yoğunlaştırma gerçekleşir. Bant filtreler ile yoğunlaştırma ekipmanında bulunan bir merdane üzerinde, şartlandırılmış çamurlar farklı hızlarda hareket ederek, ekipmanın çıkışına doğru iletilir (Şekil 9.7). Şartlandırma için genellikle polimer kullanılır. Polimer ile şartlandırılmış çamur, bir flokülasyon tankına beslenerek; buradan geniş kısımlarına çapraz olacak şekilde hareket eden bantların üzerine eşit olarak dağıtılır. Bant filtrelerin gözenekleri arasından suyu drene edildikten sonra, konsantre çamur yoğunlaştırıcının en sonunda bulunan deşarj kısmına doğru taşınır. Bant boyunca yerleştirmiş bir seri saban bıçağı ile taşınan çamur üzerinde çizgi oluşturulur. Böylece, filtrasyon sonucunda çamurdan salınan/ortaya çıkan su kısmının, bantlar arasından geçmesi daha kolay olmaktadır. Yoğunlaşmış çamurun sistemden uzaklaştırılmasını takiben, bantlar yıkanır. Yer çekimli bant filtreler ile yoğunlaştırma, atık aktif çamur, anaerobik ve aerobik çürütülmüş çamur ve bazı endüstriyel çamurların yoğunlaştırılmasında kullanılmaktadır. Polimer ilavesine gerek duyulmaktadır. Ancak, uygun polimer dozajının laboratuvar testleri ile belirlenmesi önerilmektedir. Tipik hidrolik yükleme hız aralıkları olarak; etkili bant genişlikleri 1, 1,5, 2 ve 3 m için sırasıyla 6,7-16, 9,5-24, 12,7-32 ve 18-47 L/m.s verilmektedir. Katı madde yükleme hızı ise 200 – 600 kg/m.saat aralığında değişmektedir. Bu yoğunlaştırıcı sistemlerin en yüksek %4-7 katı madde oranlarına kadar tasarımı yapılmaktadır. Katıları yakalama/tutma oranları ise tipik olarak %90-98 aralığında olmaktadır. Polimer dozajı olarak; atık aktif çamur için bir ton kuru katı madde başına 3 – 7 kg kuru polimer miktarı rapor edilmektedir [2].

Tablo 9.9. Bant filtre performans ve tasarım kriterleri [7]

Biyokatı tipi	***Giriş konsantrasyonu, %***	***Katı madde yükleme, kg/m.sa***	***Polimer dozajı, g/kg***	***Çıkış konsantrasyonu, %***
Birincil çamur (B)	*2-5*	*900-1400*	*1,5-3*	*8-12*
İkincil çamur (İ)	*0,4-1,5*	*300-540*	*3-5*	*4-6*
%50 B + %50 İ	*1-2,5*	*700-1100*	*2-4*	*6-8*
Anaerobik (%50 B + %50 İ)	*2-5*	*600-790*	*3-5*	*5-7*
Anaerobik (%100 İ)	*1,5-3,5*	*500-700*	*4-6*	*5-7*
Aerobik (%100 İ)	*1-2,5*	*500-700*	*3-5*	*5-6*

Şekil 9.7. Bant filtre şematik gösterimi [7]

Döner Tambur Elekler ile Yoğunlaştırma

Döner tambur yoğunlaştırıcı sisteminde, bir şartlandırıcı sistemi (polimer besleme sistemi içeren) ile döner silindir tambur (elekler) bulunmaktadır. Karıştırma ve şartlandırma tankının içerisinde seyreltilmiş çamur, polimer ile birlikte karıştırılır. Şartlandırılmış çamur daha sonra döner tambur eleklerden geçirilerek; floklaşmış çamur ile suyu ayrılır. Yoğunlaşmış çamur, tamburun en son kısmından sistemi terk ederken; ayrılmış su kısmı ise elekler arasından boşaltılır. Bazı tasarımlarda, döner tambur elekler ile bant filtre pres sistemleri birlikte kullanılarak; yoğunlaştırma ve susuzlaştırma bir arada gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple, döner tambur elekler ile yoğunlaştırma genellikle; atık aktif çamurun yoğunlaştırıldığı küçük-orta ölçekli tesislerde, bant filtre pres ile susuzlaştırma sisteminin öncesinde uygulanan bir ön-yoğunlaştırma adımı olarak görülmektedir. Döner tamburdaki kesme potansiyeli ve flokların hassasiyetinden dolayı, yüksek miktarlarda polimer ilavesinden kaçınılmalıdır. Bu tip yoğunlaştırıcılar 24 L/s kapasitelere kadar işletilebilmektedir ve tipik performans verileri Tablo 9.10'da sunulmaktadır.

Tablo 9.10. Döner tambur elek performans ve tasarım kriterleri [7]

Biyokatı tipi	*Giriş, % TKM*	*Giderilen su, %*	*Yoğunlaştırılan katı, %*	*Katı giderimi , %*
Birincil çamur (B)	*3,0-6,0*	*40-75*	*7-9*	*93-98*
Atık aktif çamur (AA)	*0,5-1,0*	*70-90*	*4-9*	*93-99*
B +AA	*2,0-4,0*	*50*	*5-9*	*93-98*
Aerobik olarak çürütülmüş	*0,8-2,0*	*70-80*	*4-6*	*90-98*
Anaerobik olarak çürütülmüş	*2,5-5,0*	*50*	*5-9*	*90-98*
Kâğıt elyafları	*4,0-8,0*	*50-60*	*9-15*	*87-99*

Santrifüj ile Yoğunlaştırma

Santrifüjler arıtma çamurlarının sadece susuzlaştırılmasında değil aynı zamanda yoğunlaştırılması amacıyla da kullanılmaktadır. Santrifüjlerin kullanımı genellikle atık aktif çamur ile sınırlandırılmıştır. Santrifüj ile yoğunlaştırma, çamur floklarının santrifüj (merkezkaç) kuvvetlerinin etkisi altında ayrılması prensibine dayanır. Santrifüj ile yoğunlaştırma genelde 0,2 m^3/s'den büyük kapasiteli tesislerde ve alan kısıtlaması olan yerlerde tercih edilmektedir. Polimer eklenmesine ihtiyaç duyulmasa bile polimer eklenmesi ile sistem performansı iyileşmektedir. Atık aktif çamurun yoğunlaştırılması için 0-4 kg kuru polimer/ton KM dozajları kullanılmaktadır. Santrifüjlerin performansları, yoğunlaştırılmış çamurun katı içeriği ve askıda katıları tutma oranı (katı madde geri kazanımı olarak da ifade edilir) ile

değerlendirilir. Sabit çamur beslemesi altında süzüntü suyundaki katı madde konsantrasyonu arttıkça katı tutma oranı da artar. Katı tutma oranlarının yüksek olması, arıtma tesisi başına geri devrettirilen süzüntü suyunun içerisindeki biyolojik olarak ayrışabilen katı madde konsantrasyonunun daha düşük olması demektir. Atıksu arıtma tesisleri için kütle dengesi kurulurken, yoğunlaştırma, stabilizasyon ve susuzlaştırma proseslerinden geri devir ettirilen debilerin (aynı zamanda yan akım debileri olarak adlandırılırlar) mutlaka dikkate alınması gerekir. Santrifüj ile yoğunlaştırmada başlıca işletme değişkenleri; beslenen çamurun özellikleri (çamurun su içeriği ve çamur hacim indeksi), santrifüjün dönme hızı, hidrolik yükleme hızı ve polimer dozajıdır (Tablo 9.11).

Tablo 9.11. Dekantör santrifüj performansı ve tasarım kriterleri

Biyokatı tipi	*Çap, cm*	*Giriş, % TKM*	*Yoğunlaştırılan katı, %*	*Katı tutma verimi, %*	*Polimer dozajı, kg/ton*
Atık aktif çamur	*35-100*	*0,5-1,5*	*3-8*	*80-90*	*0-3*
Birincil çamur + Atık aktif çamur (60:40)	*-*	*0,5-3,0*	*4-8*	*85-95*	*-*

9.4. Stabilizasyon

Stabilizasyon, katıların ve biyokatıların içeriğindeki patojen organizmaların azaltılması, istenmeyen kokuların engellenmesi, çürüme, bozulma ve kokuşma gibi problemlerin ortadan kaldırılması amaçlarıyla uygulanır. Stabilizasyon prosesinde en önemli özellik katıların ve biyokatıların uçucu veya organik içerikleridir. Zira patojen organizmaların yaşayabilmeleri, koku oluşumu, asitleşme, bozulma ve çürüme gibi süreçlerin gerçekleşmesi ancak çamurların organik kısmında mikroorganizmaların gelişmeleri ile gerçekleşmektedir. Bu sebeple bu tür istenmeyen problemlerin engellenebilmesi için çamurun uçucu içeriklerinin biyolojik olarak giderilerek mikroorganizmaların yaşayabilmeleri için uygun olan koşulların ortadan kaldırılması gerekir. Çamura ilave edilecek uygun kimyasal maddeler ile mikroorganizmaların yaşayabilmeleri için elverişli olmayan ortamlar oluşturulabilir. Stabilizasyon prosesi, yukarıda belirtilen sağlık ve estetik sebepler dışında, ayrıca hacim azaltılması, faydalı biyogaz (metan) üretimi gibi amaçlar için de uygulanmaktadır. Başlıca stabilizasyon yöntemleri, alkali stabilizasyonu (genellikle kireç ilavesi ile gerçekleştirilir), havasız (anaerobik) çürütme, havalı (aerobik) çürütme, ototermal aerobik çürütme ve kompostlaştırmadır. Ayrıca stabilizasyon amacıyla termal (ısı ile) arıtma ve oksitleyici kimyasal ilavesi ile stabilizasyon gibi yöntemler de bulunmaktadır. Bir stabilizasyon prosesinin tasarımı yapılırken stabilize edilecek çamur miktarının bilinmesi çok önemlidir. Ayrıca çamurların nihai bertarafı için hangi yöntemin seçileceği de stabilizasyonun uygulanması açısından önem taşır. Örneğin çamur bertarafında arazi uygulaması seçilecek ise uygulanacak stabilizasyon işlemi ile gerekli düzeyde patojen gideriminin mutlaka sağlanması gereklidir.

9.4.1.1.Alkali Stabilizasyonu

Çamura ilave edilecek alkali maddeler ile mikroorganizmaların yaşayabilmeleri için elverişli olmayan ortamlar oluşturulabilir. Kireç ilavesi ile stabilizasyon prosesinde, yeterli miktarda kireç eklenerek çamurun pH'ı 12'den yüksek değerlere getirilir. Böylece yüksek pH değerlerinde mikrobiyal reaksiyonların yavaşlaması ve/veya tamamen durması istenmeyen kokuların oluşumunu engelleyerek kemirgen, kuş, haşere vb. (bu canlılara vektör denilmektedir) potansiyel hastalık taşıyıcı canlıların ilgisini çekecek ortamlar ortadan kaldırılmaktadır. Çamurun pH'ı bu seviyelerde tutulabildiği sürece kokuşma, bozulma, çürüme, koku oluşumu ve sağlığa zararlı etkenler oluşmayacaktır. Alkali ile stabilizasyon prosesi ayrıca virüs, bakteri ve diğer mikroorganizmaların aktivitelerini de durdurmaktadır. Sönmemiş kireç çamura ilave edilir edilmez, çamur bünyesindeki su ile reaksiyona girerek sönmüş kireç oluşur.

Bu reaksiyon ekzotermik (ısı veren) bir reaksiyondur ve yaklaşık 64 kJ/g.mol değerinde bir ısı enerjisi açığa çıkar. Sönmemiş kireç ile karbondioksit arasında gerçekleşen reaksiyon da ekzotermik bir reaksiyondur ve yaklaşık 180 kJ/g.mol değerinde bir ısı enerjisi dışa verilir. Alkali stabilizasyonunda kireç, susuzlaştırma öncesinde (kireç ile ön-arıtma) veya sonrasında (kireç ile son-arıtma) ilave edilebilir. Her iki yaklaşımda da çamur ile kirecin homojen bir şekilde karışımı çok önemlidir. Çamur stabilizasyonu ile ön-arıtma için gerekli kireç dozajları Tablo 9.12'de verilmektedir.

Tablo 9.12. Çamur stabilizasyonu için kireç dozajları [1]

Çamur Tipi	*KM Oranı (%)*		*Kireç Dozajı** *g $Ca(OH)_2$/kg KM*	
	Aralık	*Ortalama*	*Aralık*	*Ortalama*
Ön-çökeltim çamuru	*3-6*	*4,3*	*60-170*	*120*
Atık aktif çamur	*1,0-1,5*	*1,3*	*210-430*	*300*
Anaerobik olarak çürütülmüş karışık çamur	*6-7*	*5,5*	*140-250*	*190*

** 30 dakika süre ile pH = 12 değerinin sağlanabilmesi için gerekli sönmüş kireç [$Ca(OH)_2$] miktarı*

9.4.1.2.Havasız (Anaerobik) Çürütme

Katıların ve biyokatıların stabilizasyonunda uygulanan en yaygın ve eski prosestir. Anaerobik (havasız) çürütmede organik ve inorganik (sülfat gibi) moleküler oksijenin bulunmadığı şartlarda parçalanmaktadır. Evsel atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların anaerobik çürütülmeleri sırasında üretilen biyogaz, bu tesislerin birçoğunun işletimleri sırasında gereken enerji ihtiyacının neredeyse tamamını karşılamaya yeterli olabilmektedir. Anaerobik çürütme sırasında üç tip kimyasal ve biyokimyasal reaksiyon meydana gelir, hidroliz, fermantasyon (asit üretimi) ve metan üretimi. Fermantasyonda çözünmüş organik bileşikler ve kısa zincirli yağ asitleri oluşurken metanojenesisde organik asitlerin metana ve karbondioksite bakteriyel çevrimi gerçekleşir. En önemli çevresel faktörler; katı madde bekleme süresi, hidrolik bekleme süresi, sıcaklık, alkalinite, pH, inhibitörlerin ve zehirli maddelerin varlığı, besi maddelerinin (nütrientler) ve eser elementlerin varlığı olarak sıralanmaktadır.

Bu faktörlerin başında yer alan katı madde bekleme süresi (θ_c) ve hidrolik bekleme süresi (θ_h) geri devir olmayan çürütücülerde birbirine eşittir. Katı madde bekleme süresi katı maddelerin çürütücü içerisindeki ortalama tutulma zamanını, hidrolik bekleme süresi ise sıvının çürütücü içerisindeki ortalama tutulma zamanını ifade eder. Çözünmüş substrat için katı madde bekleme süresi, reaktördeki katı madde miktarının reaktörden (debi) bir günde uzaklaştırılan katı madde miktarına oranı olarak hesaplanır. Hidrolik bekleme süresi ise reaktör içerisindeki besleme çözeltisinin hacminin bir günde giderilen biyokatı hacmine oranıdır. Çürütme sırasında meydana gelen üç reaksiyonun gerçekleşebilmesi tamamen bu iki bekleme süresi ile doğru orantılı olarak değişir. Her reaksiyon için bir minimum katı madde bekleme süresi vardır ve bu sürenin altında bakteriler hızlı bir şekilde gelişemez ve en sonunda çürütme prosesi tamamen durur.

Pratik uygulamalarda, yüksek-hızlı anaerobik çürütücülerin tasarımında 10-20 gün aralığında katı madde bekleme süreleri seçilirse mikroorganizmaların yıkanma tehlikesinin bulunmadığı gözlenmiştir. Katı madde bekleme sürelerinin seçiminde pik hidrolik yüklemeler de dikkate alınmalıdır. Tam karışımlı anaerobik çürütücülerin tasarımı sırasında önerilen katı madde bekleme süreleri Tablo 9.13'te verilmektedir. Evsel atıksu arıtma çamurlarının havasız çürütülmesinde gerekli kinetik katsayılar açısından uygun aralık değerleri biyokütleye dönüşüm verimi katsayısı (Y) için 0,04-0,10 mg UKM/mg $BOİ_5$.gün; ölüm hızı (k_d) için ise 0,02-0,03 $gün^{-1}$ kabul edilebilir.

Tablo 9.13. Tam karışımlı anaerobik çürütücülerin tasarımında önerilen θ_c değerleri

İşletme Sıcaklığı (°C)	θ_c *(Minimum)*	θ_c *(Tasarım)*
18	*11*	*28*
24	*8*	*20*
30	*6*	*14*
35	*4*	*10*
40	*4*	*10*

Diğer bir önemli tasarım ve işletme parametresi ise sıcaklıktır. Sıcaklık sadece mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini değil aynı zamanda biyolojik katıların çökelme özelliklerini ve gaz transfer hızlarını da etkilemektedir. Özellikle hidroliz ve metan üretim hızlarının belirlenmesinde sıcaklık parametresi çok önemlidir. İstenilen uçucu askıda katı madde (UAKM) gideriminin sağlanabilmesi için gerekli minimum katı madde bekleme sürelerinin belirlenmesi sıcaklık parametresi göz önüne alınarak yapılır. Birçok havasız çürütücü mezofilik sıcaklık (30–38°C) aralığında tasarlanmaktadır. Termofilik (50–57°C) ve farklı kademelerde her iki sıcaklık aralığının kullanıldığı birleşik çürütücüler de bulunmaktadır. Termofilik çürütmenin mezofilik çürütmeye göre bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler daha yüksek katı madde ve patojen organizma giderimleridir. Fakat yüksek sıcaklıklarda işletildikleri için daha yüksek enerji ihtiyaçları, yüksek oranda çözünmüş katı madde içeren düşük kalitede üst su fazı, daha fazla koku oluşumu ve daha düşük proses stabilitesi termofilik çürütmenin başlıca zayıflıklarını oluşturmaktadır. Özellikle metan üreten arkeler başta olmak üzere, çürütme prosesinde yer alan bakteriler salınım gösteren sıcaklık değişikliklerine karşı çok hassastırlar. Bu sebeple sıcaklık değerinin çürütücüler içerisinde sabit tutulması çok önemlidir. Çürütücü tanklarının duvarlarından, kapaklarından, tabanlarından ve ısıtma kaynağı ile tank arasında bulunan pompalardan meydana gelecek ısı kayıplarının, tasarım sırasında hesaplanarak önlem alınması gerekmektedir. Bu sebeple anaerobik çürütücü tasarımı yapılırken gerekli ısı ihtiyacının çok dikkatli bir şekilde hesaplanması gerekmektedir.

Alkalinitenin ise iyi bir şekilde işletilen anaerobik bir çürütücüde 2000-5000 mg/L $CaCO_3$ arasında olması öngörülür. Çürütücüler içerisinde bulunan kalsiyum, magnezyum ve amonyum bikarbonatlar tamponlama özelliğine sahip elementlerdir. Amonyum bikarbonat çürütme prosesi sırasında ham çamurun içerisindeki proteinlerin parçalanmasıyla oluşmaktadır. Diğer tamponlayıcı maddeler ise beslenen çamurun içerisinde bulunmaktadır. Bir çürütücü içerisindeki başlıca alkalinite tüketicisi karbondioksittir. Ayrıca uçucu yağ asitleri de alkaliniteyi tüketirler. Çürütücülerde karbondioksit, fermantasyon ve metan üretimi adımlarında üretilmektedir. Çürütücüde bulunan gazların kısmi basınçlarından dolayı, karbondioksit sıvı ortamda çözünür ve karbonik asite dönüşür. Karbonik asit ise ortamda bulunan alkaliniteyi tüketir. Bu sebeple çürütücülerin alkalinite ihtiyaçlarının izlenmesi açısından, üretilen gazın karbondioksit içeriğine bakılmaktadır. Sodyum bikarbonat, sodyum karbonat veya kireç gibi alkalinite kaynakları eklenerek çürütücülerde olması gereken alkalinite düzeyi sağlanabilmektedir.

Anaerobik Çürütücü Tipleri

Tek-Kademeli Yüksek Hızlı Çürütücüler

Tek-kademeli mezofilik anaerobik çürütme prosesi (Şekil 9.7a) ısıtma, karıştırma, üniform çamur beslenmesi ve beslenen çamurun önceden yoğunlaştırılmış olması ile karakterize edilmektedir. Çürütücülerde çamur karışımı hem üretilen gazın geri sirkülâsyonu ve pompalanması ile hem de yardımcı mekanik karıştırıcılar ile sağlanabilmektedir. Bu tip çürütücülerde oluşan köpük tabakasının ve duru fazın ayrılması gerçekleştirilemez. Optimum çürüme hızlarına ulaşabilmek açısından çürütücü içerisindeki çamur ısıtılmaktadır. Üniform

çamur beslenmesi çok önemlidir. Bu sebeple çamurun sürekli olarak veya 0,5-2,0 saat aralıkları ile beslenmesine dikkat edilmelidir. Bu çürütme prosesinde uçucu katı madde giderimleri %45-50 arasında değişmektedir. Çürütücülerin kapakları sabit veya yüzer tipli olabilir. Yüzer tipte kapakların çoğunda gaz-tutma özelliği bulunmaktadır. Böylece daha fazla miktarlarda gaz depolaması mümkün olabilmektedir. Alternatif olarak ise gaz düşük basınçlı ayrı bir gaz toplayıcıda veya basınç altında sıkıştırılarak depolanabilir. Anaerobik çürütme sırasında üretilen gaz hacimce yaklaşık %65-70 arasında metan içermektedir. Geri kalan %30-35'lik kısmın büyük miktarı karbondioksit ve düşük miktarlarda ise N_2, H_2, H_2S, su buharı ve diğer gazlardır. Çürütücü gazının özgül ağırlığı havaya oranla yaklaşık 0,86'dır. Çürütücünün düzgün bir şekilde işletildiğinin en önemli göstergesi gaz üretimidir. Üretilen biyogaz yakıt olarak kullanılabilmektedir. Birim uçucu katı madde giderimi başına üretilen gaz hacmi 0,75-1,12 m^3/kg olarak kabul edilebilir. Fakat beslenen çamurdaki değişken uçucu katı madde konsantrasyonları ve çürütücüdeki biyolojik aktiviteye bağlı olarak gaz üretimi çok geniş bir aralıkta salınım gösterebilmektedir. Gaz üretimi ayrıca bir günde kişi başına üretilen gaz hacminin kabulü ile de tahmin edilebilir. Örneğin evsel atıksuların biyolojik arıtma ile arıtıldığı bir arıtma tesisinde gaz üretimi yaklaşık 28 $m^3/10^3$ kişi.gün olarak kabul edilebilir. Metan gazının standart şartlar altında (20°C ve 1 atm basınçta) 35.800 kJ/m^3 ısı değeri vardır. Çürütücülerde üretilen toplam gazın yaklaşık %65'inin metan içerikli olduğu kabul edilerek, çürütücü gazının ısı değeri 22,400 kJ/m^3 olarak alınabilir. Üretilen biyogaz içerisinde H_2S, N_2, partikül madde ve su buharı bulunduğundan, çürütücü gazının kuru veya ıslak yıkayıcılardan geçirilerek temizlenmesi ve daha sonra içsel-yakma motorlarında kullanılması tavsiye edilmektedir. Hidrojen sülfitin hacimsel olarak 100 ppm değerini geçmesi durumunda ise bu gazın giderilmesi için ayrı bir tesisat kurulmalıdır.

Stabilizasyonun derecesi ayrıca uçucu katı maddelerdeki giderim yüzdesi ile ölçülmektedir. Alkalinite ve uçucu asit içeriği de günlük olarak takip edilmelidir. Çürütücülerin boyutlandırılmasında en fazla kullanılan yaklaşım yükleme faktörü seçilerek çürütücü hacminin hesaplanmasıdır. Bunun için birim çürütücü hacmi başına bir günde yüklenen uçucu katı madde miktarı kullanılmaktadır. Katı madde yükleme hızı için uygun aralık 1,6-4,8 kg UAKM/m^3.gün olarak verilmektedir. Yüksek uçucu katı madde yüklemelerinde reaktör içerisinde başta amonyak olmak üzere zehirli madde birikimi veya metan üreten arkelerin sistemden yıkanması gözlenmektedir. Düşük uçucu katı madde yüklemelerinde işletilen çürütücülerde ise ciddi işletme problemleri meydana gelerek bu tip çürütücülerin inşa edilmesi hiç ekonomik olmaz. Seyreltik çamur beslemelerinde çürütücülerin işletilmeleri sırasında gözlenebilecek olumsuzluklar şu şekilde sıralanabilir; düşük hidrolik bekleme süreleri, düşük uçucu katı madde giderimleri, düşük metan üretimleri, yetersiz alkalinite miktarı, yüksek ısıtma ihtiyacı ve nispeten sulu olan çamurun bir sonraki sisteme taşınması için daha yüksek maliyet ihtiyacı. Çürütücülerin boyutlandırılmasında kullanılan diğer bir yaklaşım ise kişi başına düşecek bir reaktör hacmi seçimidir. Bu değer farklı atıksu çamurları için farklı aralıklarda olmaktadır. Örneğin ön-çökeltim çamuru için bu aralık 0,03-0,06 m^3/kişi olarak verilirken karışık (ön-çökeltim + atık aktif çamur) çamurlar için bu aralık 0,07-0,11 m^3/kişi olmaktadır. Tam karışımlı mezofilik yüksek-hızlı anaerobik bir çamur çürütücüde tahmin edilen uçucu katı madde giderimleri 30 gün, 20 gün ve 15 gün çürüme zamanlarına göre sırasıyla %65,5, %60 ve %56'dır. Anaerobik çürütücülerin tasarımında kullanılan dairesel betonarme tankların yanında son yıllarda uygulamaları hızla artan konvansiyonel Alman tipli betonarme ve yumurta kesitli çelik tanklar bulunmaktadır. Bu tanklar özellikle karıştırma veriminin artması, ısı yalıtımının daha iyi bir şekilde gerçekleşmesi ve tabanda biriken kum vb inorganik katı maddelerin daha etkili bir şekilde sistemden uzaklaştırılması amacıyla tasarlanmıştır. Dairesel betonarme tankların çapları 6-38 m arasında seçilmelidir. Tabanı genellikle konik yapıda ve merkeze doğru eğimlidir. Çamurlar tankın tabanından çekileceği için minimum eğim 1 dikey-6 yatay olacak

şekilde yapılmalıdır. Tam karışımlı mezofilik yüksek-hızlı anaerobik çamur çürütücülerin boyutlandırılmaları sırasında kullanılan tasarım kriterleri Tablo 9.14'te verilmektedir.

Tablo 9.14. Tam karışımlı mezofilik yüksek-hızlı anaerobik çamur çürütücülerin boyutlandırılmaları sırasında kullanılan tasarım kriterleri

Parametre	***Birim***	***Değer***
Hacim bazlı	*m^3/kişi*	
Ön-çökeltim çamuru		*0,03-0,06*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur		*0,07-0,11*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu		*0,07-0,09*
Katı madde yükleme hızı	*kg UAKM/m^3.gün*	*1,6-4,8*
Katı madde bekleme süresi (θ_c)	*gün*	*15-20*

Havasız çürütücü sistemlerin üst suyu karakteri reaktörün tipine ve işletme koşullarına göre değişmekte olup; yoğunlaştırılmış ön-çökeltim çamuru ve biyolojik aktif çamurun birlikte çürütüldüğü bir çürütücünün üst suyunda bazı parametrelerin konsantrasyon aralıkları: TKM: 3000-15000 mg/L ; $BOİ_5$: 1000-10000 mg/L; KOİ: 3000-30000 mg/L; NH_4: 400-1000 mg/L ve TP: 300-1000 mg/L olarak verilmektedir.

<u>İki-Kademeli Çürütücüler</u>

İki kademeli çürütme işlemi, her ne kadar geçmişte çok sık uygulansa bile; modern çürütücü tasarımlarında artık çok tercih edilmemektedir. Çünkü tecrübeler, ikinci tankın işletilmesinde sağlanan faydanın ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. İki kademeli çürütmede, yüksek hızlı bir çürütücü, ikinci bir tank ile seri bağlı olarak işletilmektedir (Şekil 9.7b ve Şekil 9.8). Yüksek hızlı olan ilk (primer) tank, çürütme amacıyla kullanılmaktadır. İçersinde ayrıca, karıştırma ekipmanları da bulunan bu tank aynı zamanda ısıtılmaktadır. Seri bağlı olan ikinci tank ise genellikle ısıtılmaz ve esas olarak depolama amacıyla kullanılır. Çürütücülerin kapakları sabit veya yüzer tipli olabilir. Diğer taraftan, ikinci çürütücü açık bir tank olabilir veya bir çamur lagünü olarak da kullanılabilir. Ancak, ikinci çürütücü açık olarak kullanılırsa, çürütme işleminin devam etmesi durumunda bir miktar metan açığa çıkabilmekte ve bu durum da karbon ayakizini arttırıcı bir etkiye sebep olabilmektedir. Ayrıca, anaerobik olarak çürütülmüş biyokatıların çökelme özelliklerinin iyi olmaması sebebiyle, ikinci tankta ortaya çıkan durufaz (supernetan) yüksek katı madde içermektedir. Bu durufazın sistem içerisinde ilgili arıtma ünitelerine geri devrettirilmesi ile önemli işletme problemleri gözlenebilmekte; bu sebeple ikinci çürütücü tankın durufazı için ayrı bir arıtma birimine ihtiyaç duyulmaktadır. İki-kademeli çürütmenin uygulandığı tesislerde, ikinci tanktan geri devrettirilen akımlar mutlaka katı madde kütle dengesinde dikkate alınmalıdır. Primer tankta çürütme işleminin tam olarak tamamlanmaması gibi işletme problemleri, ikinci tankta hem zayıf çökelme özelliğine sahip biyokatıların oluşumuna hem de yine ikinci tankta ortaya çıkan gaz (ortaya çıkan toplam gazın %10'undan daha az) sebebiyle tank içerisindeki katılar yüzeye çıkabilmektedir. Bu sebeple, bazı tasarımlarda, susuzlaştırma veya diğer takip eden proseslerin öncesinde; ilave çürütmenin gerçekleşebilmesi için ikinci tankın da ısıtılarak karıştırıldığı örneklere rastlanabilmektedir.

Şekil 9.7. Anaerobik çamur çürütücü tipleri (a) tek kademeli yüksek hızlı (b) iki kademeli [1]

1. Taze çamur girişi
2. Birincil çürütme
3. İkincil çürütme
4. Gaz kompresörü
5. Nem tutucular
6. Atık gaz yakıcı (flare)
7. Gaz tutucu hazne
8. Isıtma sistemi ve blowerlara
9. Çamur sirkülasyon pompası
10. Isı değiştirici
11. Sıcak su pompası
12. Su ısıtıcı (kazan)
13. Son arıtmaya
14. Lagünlere
15. Fazla akım

Şekil 9.8. İki kademeli çürütücü (gaz karışımlı) için akım şeması

Anaerobik çürütme işlemi sonunda elde edilen UKM giderim yüzdesi (9.4) denklemi ile hesaplanabilir.

$$x = \frac{m_1(100 - m_2)}{m_2(100 - m_1)} \tag{9.4}$$

Burada;

x : UKM giderim yüzdesi (%)
m_1 : Taze çamurda inorganik madde oranı (%)
m_2 : Çürütülmüş çamurda inorganik madde oranı (%)

Çamurun Havasız Çürütme Öncesi Ön-Arıtımı (Dezentegrasyon)

Avrupa Birliği Yönetmeliği (EC1772/2002)'ne göre, kentsel katı atıklar, yemek artıkları ve mezbaha atıkları gibi substratlar havasız olarak çürütülmeden önce ya pastörize ya da sterilize edilmelidir. Bu tarz atıkların stabilizasyonundan önce gerekli olan dezenfeksiyon işlemi, havasız çürütme öncesinde dezentegrasyon (ön-arıtma) uygulamalarını gündeme getirmiştir. Böylece, pastörizasyon ve/veya sterilizasyon için gerekli olan ekstra masraf ortadan kalkmakta ve daha yüksek enerji geri kazanımı sağlanabilmektedir [8], [9]. Dezentegrasyon yöntemleri her ne kadar havasız çürütme prosesinin performansını arttırsa bile; bu yöntemler çevresel açıdan yine de sürdürülebilir olmayabilirler.

Arıtma çamurları gibi katı madde içerikleri nispeten yüksek substratların havasız çütürülmelerinden önce uygulanmakta olan dezentegrasyon yöntemleri; (i) Mekanik, (ii) Termal, (iii) Kimyasal ve (iv) Biyolojik yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Dezentegrasyon yöntemlerinin verimi çamurun karakterine ve yöntemin tipine önemli ölçüde bağlıdır. Bu sebeple, bu yöntemlerin gerçek ölçekli arazi uygulamalarında sürdürülebilirliklerin ve uygulanabilirliklerin sistematik bir şekilde araştırılmaları ve kıyaslanmaları güçtür.

Mekanik Dezentegrasyon

Mekanik ön-arıtma substrat içerisindeki katı maddeleri dezentegre eder ve/veya parçalar. Böylece, hücresel bileşikler salınarak özgül yüzey alanı artar. Yüzey alanında meydana gelen bu artış ise substrat ile anaerobik mikrooganizmaların daha iyi temas etmesini sağlayarak; havasız çürütme prosesini iyileştirir [10], [11]. Esposito vd. [13] yapmış oldukları bir çalışmada, daha büyük tanecik çaplarında KOİ gideriminin azaldığını ve metan üretim hızının düştüğünü görmüşlerdir. Kim vd. [14]'de anaerobik mikroorganizmaların maksimum substrat kullanma hızının, tanecik boyutu ile ters orantılı bir şekilde değiştiğini rapor etmiştir. Bu sebeple, sonikasyon, lisis-santrifüj, sıvı kesme, çarpışma, yüksek basınçlı homojenizör, maserasyon (ıslatıp yumuşatma) ve sıvılaştırma gibi mekanik ön-arıtma uygulamaları ile substratın içerisinde bulunan partiküllerin boyutları azaltılmaktadır.

Sonikasyon ön-arıtma yönteminde hücre yapısı ve flok matrisi, bir titreşimli prop kullanılarak mekanik olarak parçalanır. Düşük frekanslı (20-40 kHz) ses dalgalarında, partikül boyutunda meydana gelen düşüş ultrasonik dezentegrasyon yönteminin esas etkisini oluşturmaktadır [11], [12]. Yüksek basınçlı homojenizör, sistem içerisindeki basıncı birkaç yüz bar değerine kadar arttırır; daha sonra substrat, basıncın ani bir şekilde düşmesiyle homojenize olur. Oluşan kavitasyon içsel enerjiye sebep olarak hücre zarını parçalar [15]. AAT çamurlarının yüksek basınçlı homojenizör ile ön-arıtımını takiben gerçek ölçekli havasız bir çürütücüde biyogaz üretimi üzerindeki etkisi araştırılmış ve sistemde ortaya çıkan biyogaz üretiminde %30 iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca, çürütücülerin çalışma hacimlerinin de %23 oranında azaltılabileceği rapor edilmiştir Anaerobik çürütme öncesinde sonikasyon uygulaması ile kesikli, sürekli veya yarı-sürekli sistemlerde sırasıyla %24–140 ve %10–45 oranlarında biyogaz üretiminde artış gözlenmiştir [10]. Bunun yanında, atık aktif çamur ile yapılmış bazı çalışmalarda, sonikasyon uygulamasının UKM gideriminde olumlu bir artış gözlenmemiş, mezofilik metan üretiminde sadece ihmal edilebilir bir iyileşme elde edilmiştir [16].

Mekanik dezentegrasyon yöntemlerinin avantajları arasında koku oluşumunun olmaması, uygulamalarının kolay oluşu, nihai anaerobik kalıntı maddesinin (residue) daha iyi susuzlaştırılabilme özelliği ve enerji tüketiminde gözlenen azalma sayılabilir. Bunun yanında, patojen giderimi üzerinde hiçbir etkilerinin olmaması ve ekipmanların tıkanmasına veya taş oluşumuna sebep olması gibi mahzurları bulunmaktadır [17].

Termal (Isıl) Dezentegrasyon

Termal dezentegrasyon, en fazla uygulanan ön-artıma işlemi olup; aynı zamanda patojen giderimi, susuzlaştırma özelliğinde iyileşme ve çürütücü çıkışında ortaya çıkan biyokatının vizkozitesinde azalma sağlar. Böylece ortaya çıkan biyokatının yararlı kullanım alternatifleri artarak; nihai bertarafı kolaylaşır. Arıtma çamurlarının düşük sıcaklık (70°C) değerinde bile ön-arıtımının patojen giderimi üzerinde önemli etkisi olduğu rapor edilmektedir [15]. Termal ön-arıtma ile ilgili çalışmalarda uygulanan sıcaklık aralığı olarak 50-250°C rapor edilmektedir. Termal ön-arıtma ile hücre zarları dezentegre olur ve organik bileşikler daha kolay/hızlı çözünür. Düşük sıcaklıklarda KOİ çözünmesi hızlansa bile; daha uzun ön-arıtma süresine ihtiyaç duyulur. Mottet ve arkadaşları [18], farklı termal ön-arıtma yöntemlerinin etkisini araştırmış ve buharlı ısıtma ile elektrikli ısıtma tekniklerinin sonuçlar üzerinde herhangi bir farka sebep vermediğini; ancak mikrodalga ile ısıtmanın biyopolimerlerin çözünmesini arttırdığını görmüşlerdir. Bunun sebebi olarak ise makromoleküllerin polarizasyonu gösterilmektedir [17], [19], [20]. Termal dezentegrasyonda oluşan kimyasal reaksiyonlara ilave olarak; biyolojik olarak kolay ayrışabilen substratların termal ön-arıtması, uçucu organiklerin ve/veya potansiyel biyometan üretiminde kayba sebep olabilir. Bu sebeple, termal ön-arıtmanın etkisi substratın tipine ve sıcaklık aralığına bağlıdır [21].

Appels vd. [22] yapmış oldukları bir çalışmada, çamuru 60 dakika boyunca 70°C'de ısıtarak ön-arıtmışlar ve biyogaz üretiminde ihmal edilebilir bir artış görmüşlerdir. Bunun yanında, çamurun 60 dakika boyunca 90°C'de ön-arıtımı sonucunda ise biyogaz üretiminde 20 kat artış görülmüştür. Climent vd. [23] son-çökeltim tankından alınan çamur numunesine, termofilik anaerobik çürütme öncesinde 70°C'de ön-arıtma uygulamışlar ve biyogaz hacminde %50 oranında bir artış elde etmişlerdir. Gavala vd. [24]'de rapor edilen çalışmada; ön-çökeltim ve son-çökeltim çamurlarının 70°C sıcaklık değerinde ön-arıtımı ile termofilik ve mezofilik metan potansiyeli üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Termal ön-arıtma, ön-çökeltim çamurunun mezofilik anaerobik çürütülebilirliğine pozitif etki ederken; termofilik anaerobik çürütülebilirliğine etkisi görülmemiştir. Ancak, son çöktürme çamurunun hem mezofilik hem de termofilik havasız çürütülmesi sırasında metan üretimini iyileştirmiştir. Bunun sebebi, ön-çökeltim çamurundaki daha yüksek karbonhidrat; son-çökeltim çamurunda ise daha yüksek protein ve lipit bulunması gibi substratların kimyasal içerikleri ile açıklanmaktadır [25].

Kimyasal Dezentegrasyon

Kimyasal ön-arıtma, organik bileşiklerin kuvvetli asitler, alkaliler veya oksidanlar yardımıyla parçalanması için uygulanmaktadır. Anaerobik çürütme genellikle alkalinitenin artışıyla pH değerinin ayarlanmasını gerektirmektedir. Bu sebeple, alkali bir kimyasal yardımıyla ön-artıma en çok tercih edilen yöntemdir.

Alkali ön-arıtma sonucunda katı maddelerin çözünmesi artarak; substratların anaerobik mikroorganizmalar tarafından daha kolay parçalanabilmeleri sağlanmaktadır. Ancak, biyokütlenin kendisi de bir miktar alkali tüketeceğinden; havasız çürütme istenilen düzeyde iyileşmesi için daha yüksek alkali kimyasallara ihtiyaç duyulabilmektedir [9], [26], [27].

Asidik ön-arıtma ve ozonlama gibi oksidasyon yöntemleri hidroliz hızını iyileştirmek ve biyogaz üretimini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal ön-arıtmanın etkisi substratın özelliklerine ve uygulanan yöntemin tipine bağlıdır. Örneğin, yüksek miktarda karbonhidrat

içeren ve biyolojik olarak kolay ayrışan substratlar için kimyasal ön-arıtma uygun değildir. Çünkü bu tarz substratların ayrışma hızlarında meydana gelen artış, uçucu yağ asitlerinin birikmesine ve metanojenik adımda inhibisyona sebep olmaktadır [28]. Diğer taraftan, lignin içerikleri yüksek substratlar üzerinde ise pozitif etkisi açık olarak görülmüştür. Hemiselülozik bileşiklerin monosakkaritlere hidrolizi ile ligninin yoğunlaşarak çökelmesi, asit ön-arıtımı sırasında oluşan esas reaksiyondur [9], [15]. Ancak, toksik yan-ürünlerin oluşumu, fermente olabilen şekerin kaybı, yüksek asit maliyeti ve havasız çürütme öncesinde asidik şartların nötralizasyonu için gerekli kimyasalların ilave maliyeti gibi mahzurları da kuvvetli asit ile ön-arıtma öncesinde göz önünde bulundurulmalıdır [27], [29].

Diğer bir kimyasal ön-arıtma yöntemi olan ozonlama; sistem içerisinde tuz konsantrasyonlarında artışa sebep olmaması ve herhangi bir kimyasal artık bırakmaması gibi avantajları ile çamurların dezentagrasyonunda diğer kimyasal ön-arıtma alternatiflerine göre son yıllarda oldukça sık tercih edilmektedir. Bunun yanında ozonlama ön-arıtma yönteminin patojenleri dezenfekte etme gibi üstünlüğü de bulunmaktadır. Ozon radikallerine parçalanarak; organik substratlar ile reaksiyona girer ve sonuç olarak kararlı bileşikler biyolojik olarak daha kolay ayrışabilir bir hale gelir. Böylece, bu bileşikler anaerobik bakteriler tarafından daha kolay parçalanabilmektedir [10], [30], [31]. AAT çamurlarının havasız çürütülmeleri öncesinde uygulanan ozon ön-arıtma yönteminde optimum ozon dozu aralığı olarak 0,05~0,5 g O_3/gTKM rapor edilmektedir [30], [32].

Biyolojik Dezentegrasyon

Biyolojik ön-arıtma aerobik ve anaerobik yöntemlerden oluşmakta olup; peptidaz, karbohidrolaz ve lipaz gibi bazı özel enzimlerin havasız çürütme sistemlerine ilavesi de biyolojik ön-arıtma yöntemleri arasında sayılmaktadır. Bu konvansiyonel ön-arıtma yöntemleri AAT çamurlarının havasız çürütülmeleri öncesinde sıklıkla uygulanmaktadır. Anaerobik çürütme öncesinde kompostlaştırma veya mikro-havalandırma gibi biyolojik ön-arıtma uygulamalarının, özgül mikrobiyal büyüme hızını arttırarak; hidrolitik enzimlerin daha fazla üretilmesine sebep olduğu ve böylece kompleks (karmaşık) substratların daha fazla hidroliz olabildikleri belirtilmektedir. Ayrıca, hidrolitik ve asidojenik bakterilerin aktivitelerinin hızlanması sebebiyle, aerobik ön-arıtmanın daha fazla UYA oluşumuna yardımcı olduğu rapor edilmektedir [33].

Bazı çalışmalarda çamurların iki kademeli olarak çürütüldüğü havasız sistemlerde ilk kademede yer alan hidrolitik-asidojenik adımın bir biyolojik ön-arıtma olduğu yazılmaktadır. Örneğin, Parawira ve arkadaşları [34] tarafından yapılan bir çalışmada; ilk kademedeki hidroliz adımının optimizasyonu sayesinde asidojenik mikroorganizmalar için daha uygun ortam yaratıldığı ve bu mikroorganizmalar daha fazla spesifik enzim üreterek; substratların daha kolay parçalanabildikleri rapor edilmiştir.

Bunun dışında, kademeli sıcaklıkta işletilen anaerobik çürütme (TPAD) yönteminde; termofilik sıcaklıkta işletilen bir çürütme tankını mezofilik sıcaklıkta işletilen ikici bir çürütme tankı takip etmektedir. Böylece, daha yüksek metan üretim verimleri ile patojen ihtiva etmeyen daha yüksek nutrient içerikli çürütülmüş biyokatı (toprak şartlandırıcı) eldesi mümkün olabilmektedir [35].

Termo-Kimyasal Dezentegrasyon

Arıtma çamurları gibi yüksek organik içerikli substratların havasız arıtımında; biyogaz üretiminde daha fazla iyileşme ve havasız çürütme prosesine ait kinetik hızların artışı gibi sebeplerle, farklı ön-arıtma yöntemlerinin bir arada uygulandığı çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Örneğin, Shahriari ve arkadaşları [36] tarafından organik içerikli bir substratın anaerobik çürütülmelerinden önce yüksek sıcaklıkta mikrodalga ve hidrojen peroksit ile birlikte

ön-arıtma uygulanmış bir çalışma rapor edilmiştir. Bu çalışmada; 145°C'nin üzerindeki sıcaklıkta mikrodalga ışını ile kimyasal ön-arıtmanın birlikte uygulanması bir gram KOİ başına daha fazla ayrışmaya dirençli madde üretimine neden olarak; biyogaz üretiminde azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi, proteinlerin ve karbonhidratların kimyasal ön-arıtma ile daha fazla hidroliz olmaları ve ısı sebebiyle üretilen amino asitler ve şekerlerin reaksiyona girerek kompleks polimerleri oluşturmasıdır. Ancak, daha düşük sıcaklık değerinde (70°C) termal yöntemler ile alkali bir kimyasal ilavesinin birlikte ön-arıtımı neticesinde biyogaz üretiminde (%78) ve metan içeriğinde (%60) artış gözlenmiştir. Sıcaklık değeri 100°C'nin üzerine çıkarıldığında biyogaz üretimi %28 ve metan içeriği %50 gözlenmiştir [37].

Termo-Mekanik Dezentegrasyon

Mekanik ön-arıtmanın termal arıtma ile birlikte uygulandığı çalışmalar ile havasız stabilizasyon sırasında daha fazla biyogaz üretimi hedeflenmektedir. Ultrason ve alkali ön-arıtmanın eşzamanlı uygulandığı bir çalışmada, çamurun hidroliz hızı dakikada 211 mg/L ile en yüksek değerine ulaşmıştır [11]. Çamurun 19–21 bar basınçta ve 160–180°C sıcaklıkta 1 saat boyunca birlikte dezentegrasyonu sonucunda denge durumuna ulaşmış havasız bir sistemde biyogaz üretimi %75 artış göstermiştir. Ayrıca susuzlaştırabilirlik özellikleri de iyileşme göstermiş ve böylece bertaraf masrafı %25 azalmıştır. Ancak, proteinlerin hidrolizinde meydana gelen artış reaktör içerisindeki amonyak konsantrasyonunu da %64 oranında arttırmış ve bu durum prosesin denge durumunda kalmasını zorlaştırmıştır [38]. Schieder vd. [39] evsel çamurun hidrolizini sıcaklık ve basınç (160–200°C; 40 bar değerinde 60 dakika boyunca) ile katalize ederek; ön-arıtma uygulanmamış evsel çamurun havasız arıtımına kıyasla; 5 gün daha kısa havasız çürütme zamanında %70 daha fazla biyogaz geri kazanımı elde etmiştir.

Tablo 9.12'de farklı dezentegrasyon yöntemlerinin farklı substratların havasız çürütülmeleri üzerindeki etkileri sunulmaktadır [21].

Sonuç olarak; artan atık miktarı, enerji ihtiyacı ve küresel ısınma gibi etkenler, anaerobik çürütme proseslerinin daha yüksek biyogaz geri kazanımlarına imkan verecek şekilde işletilmelerini gerektirmektedir. Şimdiye kadar yapılmış çamur dezentegrasyon çalışmalarında en avantajlı olan yöntemin termal ön-arıtma (düşük sıcaklıklarda) ve iki kademeli anaerobik çürütme sistemleri olduğunu göstermiştir. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir: (i) daha yüksek biyogaz verimi; (ii) patojen giderimindeki etkisi; (iii) uzaklaştırılması gereken biyokatı miktarındaki azalma; (iv) bekleme süresindeki azalma; (v) daha iyi enerji dengesi ve (vi) daha ekonomik ve uygulanabilir (fizıbıl) olması. Ancak bu ön-arıtma yöntemlerinin, laboratuvar ölçekte çalışmalarla sınırlı kalmayıp; tam ölçekli uygulamalarının da yaygınlaşması gerekmektedir [21].

Tablo 9.15. Farklı dezentegrasyon yöntemlerinin anaerobik çürütmeye etkisi

Substrat	***Dezentegrasyon Yöntemi***	***Önemli Bulgular***	***Kaynak***
Kentsel Katı Atıkların Organik Kısmı (KKAOK)	*Tüm dezentegrasyon yöntemleri*	*KKAOK için fiziksel dezentegrasyon yöntemleri sıkça uygulanmaktadır; ancak diğer yöntemlerin endüstriyel seviyede uygulamaları henüz yoktur*	*[40]*
Tüm organik substratlar	*Tüm dezentegrasyon yöntemleri*	*En popüler dezentegrasyon yöntemleri, AAT çamurları için termal ve ultrasonikasyon; lignoselülozik substratlar için kimyasal ve KKAOK için mekanik yöntemlerdir* *Enerji dengesi ve ekonomik fizibilite üzerinde sistematik çalışmalar gereklidir*	*[41]*
Lignoselülozik substratlar	*Termal, kimyasal ve termo-kimyasal*	*Lignoselülozik substratların çürütülebilirlikleri ön-arıtma uygulaması ile iyileştirilebilmektedir* *Ön-arıtma uygulaması ile konvansiyonel prosese kıyasla daha etkili bir proses sağlanabilmektedir*	*[27]*
		Termal ön-arıtma yöntemleri ile kireç (lime) ve amonyak kaynaklı kimyasal yöntemler lignoselülozik substratların çürütülebilirliklerini iyileştirilebilmektedir	*[9]*
Kâğıt Endüstrisi çamuru	*Termal, kimyasal ve termo-kimyasal*	*Ön-arıtma uygulaması ile daha düşük hidrolik bekleme süresi, daha yüksek metan üretimi ve daha az çamur boyutu sağlanabilmektedir*	*[11]*
AAT çamuru	*Ultrasonik, kimyasal, termal ve mikrodalga*	*Dezentegrasyon uygulaması ile biyogaz üretiminde artış/iyileşme (%30-50) sağlanabilmektedir*	*[42]*
	Termal, kimyasal ve termo-kimyasal	*Dezentegrasyon yöntemlerinin verimi çamurun karakterine ve yöntemin gücüne bağlıdır* *Dezentegrasyon uygulaması ile daha yüksek geri kazanılabilir nutrientler ile daha iyi stabilize olmuş çürümüş çamur sağlanabilmektedir*	*[10]*
	Termal ve termo-kimyasal	*Yüksek sıcaklıkta (>175°C) termal ile termo-kimyasal dezentegrasyon yöntemleri, çamurların susuzlaştırılabilirliklerinin iyileştirilmesinde daha etkilidir*	*[43]*

9.4.1.3.Havalı (Aerobik) Çürütme

Aerobik çürütme prosesi, atık aktif çamura, karışık (ön-çökeltim + atık aktif çamur veya ön-çökeltim + damlatmalı filtre çamuru) çamurlara veya uzun havalandırmalı aktif çamur proseslerinde ortaya çıkan çamurlara uygulanmaktadır. Kapasitesi 2 m^3/s'ye kadar olan tesislerde başarıyla uygulanmaktadır. Uçucu katı madde giderimleri anaerobik çürütme prosesine kıyasla aynı oranda gerçekleştirilir. Duru fazda ise anaerobik çürütme prosesine kıyasla daha düşük BOİ konsantrasyonları bulunmaktadır. Aerobik çürütme uygulaması ile kokusuz, humus benzeri, biyolojik olarak kararlı nihai ürünler elde edilebilmektedir. Çamurun

bünyesindeki temel gübre değerleri geri kazanılabilmektedir. İşletilmeleri nispeten kolaydır ve düşük ilk-yatırım maliyetlerine ihtiyaç gösterirler. Çamurların ayrı olarak çürütülmeleri sırasında, biyolojik çamurun aerobik çürütülmesi cazip bir seçenektir. Fakat bu stabilizasyon yönteminin en belirgin mahzurlarından birisi havalandırma için gerekli oksijenin sağlanabilmesi için yüksek enerji masraflarına gerek duyulmasıdır. Ayrıca susuzlaştırılma özellikleri zayıftır. Aerobik sistem ortam sıcaklığından, tank geometrisinden, beslenen çamur konsantrasyonundan, karıştırma/havalandırma ekipmanlarının tipinden ve tankın yapıldığı materyalden önemli ölçüde etkilenmektedir. Faydalı yan ürün olan metan üretimi ve geri kazanımının gözlenmemesi ise prosesin en önemli diğer mahzurlarından birisidir.

Patojen giderimi açısından 'Sınıf B' kalitesinin sağlanabilmesi için yönetmeliklere göre katı madde bekleme süresinin 20°C'de en az 40 gün, 15°C'de ise en az 60 gün olması gerekmektedir. $\theta_c = 40$ günün altında işletilen aerobik çürütücülerde 'Sınıf B' kalitesinde patojen giderimi istenirse, ilave depolama kapasitesinin veya yoğunlaştırıcının bulunması gerekmektedir. Yukarıda önerilen çamur bekleme sürelerinde işletilmeyen aerobik çürütücülerde patojen içeriklerinin, uçucu katı madde giderimlerinin ve vektör canlılar için cazip olmayan ortamların yaratılıp yaratılmadığının sürekli kontrol altında olması ve izlenmesi gerekmektedir.

Aerobik çürütme prosesi aktif çamur prosesine benzemektedir. Ortamda mevcut substrat (yiyecek) tükenince, mikroorganizmalar kendi protoplazmalarını tüketmeye başlayarak hücre onarım reaksiyonları için gerekli enerjiyi temin ederler. Enerjinin hücre dokusundan temin edilmeye başlandığı süre boyunca mikroorganizmalar endojen (içsel solunum) fazda bulunurlar. Hücre dokusu oksijenin varlığında karbondioksite, suya ve amonyağa oksitlenmektedir. Gerçekte hücre dokusunun yaklaşık %75-80'i okside olarak geri kalan %20-25'i inert maddelerden ve biyolojik olarak giderilemeyen organik bileşiklerden meydana gelir. Çürüme devam ettikçe amonyak sonuçta nitrata okside olmaktadır. Biyolojik olarak giderilemeyen uçucu askıda katı maddeler aerobik çürümenin nihai ürünlerini oluşturmaktadır. Organik azotun nitrata oksitlenmesi sırasında ortamda hidrojen iyonları artmakta ve çamurda yeterli tamponlama kapasitesi yoksa pH'da azalmaya sebep olmaktadır. 1 kg amonyağın oksitlenmesi sırasında yaklaşık 7 kg $CaCO_3$ alkalinitesi tüketilmektedir. Nitrifikasyon ile tüketilen alkalinitenin teorik olarak yaklaşık yarısı (%50'si) denitrifikasyon ile geri kazanılabilmektedir. Çürütücü içerisindeki çözünmüş oksijen değeri çok düşük seviyelerde tutulursa (<1 mg/L), nitrifikasyon gerçekleşemeyecektir. Aerobik çürütücülerin havalandırma ve karıştırma arasında işletilmeleri sırasında pH kontrolü de sağlanırsa yüksek hızlarda denitrifikasyon gerçekleşebilir. Reaktör içerisindeki pH'ın 5,5 değerinin üzerinde kalabilmesi için yeterli tamponlama kapasitesi yoksa mutlaka alkalinite besleme sisteminin tesis içerisinde kurulması gerekir. Sistemin tamponlama kapasitesi hava ile sıyırma sebebiyle azalmaktadır. Ayrıca nitrat iyonlarının artmasıyla pH değerinde düşme gözlenmektedir. Düşük pH değerleri filamentli mikroorganizmaların reaktör içerisinde artmasına sebep olmaktadır.

Ön-çökeltim çamurlarının biyolojik çamurlar ile karıştırılıp aerobik olarak çürütülmeleri sırasında ön-çökeltim çamurundaki organik maddenin direkt oksitlenmesi ve hücre dokusunun oksitlenmesi aynı anda gerçekleşmektedir. Aerobik çürütücüler kesikli veya sürekli sistemler olarak işletilmektedir. Konvansiyonel havalandırmalı aerobik çürütme prosesinin tasarımı sırasında sıcaklık, katı madde giderimi, beslenen çamurun katı madde konsantrasyonu, tank hacmi, oksijen ihtiyacı ve prosesin işletilmesi dikkate alınmalıdır. Aerobik tankların çoğu açık tanklar olarak inşa edilmektedir. Bu sebeple çürütücüler içerisindeki ısı, hava koşullarına bağlı olarak değişmekte ve geniş bir aralıkta salınım gösterebilmektedir. Diğer tüm biyolojik sistemlerde olduğu gibi düşük sıcaklık değerleri prosesin yavaşlamasına, yüksek sıcaklıklar ise prosesin hızlanmasına sebep olur. Sıcaklık kayıplarının da mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Bu kayıpların minimize edilebilmesi için tanklar betonarme yerine çelikten

yapılabilir, tankın yer üzerinde kalan kısımları yalıtım malzemesi ile kaplanabilir, yüzeysel havalandırma yerine tankın içerisine batmış havalandırma kullanılabilir, çok soğuk iklimlerde kapalı tanklar kullanılabilir veya çamurun ısıtılması yoluna gidilebilinir. Kısaca beklenen en düşük işletme sıcaklığında gerekli çamur stabilizasyonu gerçekleşebilmeli ve beklenen en yüksek işletme sıcaklığında ise en yüksek oksijen ihtiyacı sağlanabilmelidir. Aerobik çürütmenin diğer bir amacı da uzaklaştırılacak katı madde kütlesinin azaltılmasıdır. Katı madde gideriminin sadece çamurun biyolojik olarak giderilebilen kısmı ile gerçekleştiği düşünülse de organik olmayan maddelerin de bir miktar parçalanması mümkün olabilmektedir. Aerobik çürütme ile uçucu katı madde giderimleri %35-50 arasında gözlenmektedir. Sıcaklığın dışında bu giderim verimini etkileyen diğer parametre ise katı madde bekleme süresi (çamur yaşı olarak da ifade edilir)'dir. Aerobik çürütmenin tam karışımlı kademeli (iki veya üç kademeli) konfigürasyonunda, toplam katı madde süresi eşit bir şekilde kademeler arasında bölünmelidir. Aerobik çürütme proseslerinin verimlerinde önemli etkisi olan katı madde bekleme süresinin tasarım ve işletme sırasında mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin çürütücü önünde yoğunlaştırma işlemi uygulanacak ise çürütücüye beslenecek çamurun katı madde konsantrasyonu artacaktır. Böylece çürütücünün hacmi başına verilmesi gerekli oksijen miktarı artacaktır. Besleme akımındaki yüksek katı madde konsantrasyonları daha uzun çamur yaşlarına ve daha küçük çürütücü hacimlerine ihtiyaç göstermektedir. Ayrıca özellikle kesikli beslenen sistemlerde duru faz oluşumu daha az olacaktır ve bu durum proses kontrolünde kolaylık sağlayacaktır. Yoğunlaşmayı takip eden çürütücülerde ise daha yüksek uçucu katı madde giderimleri gözlenmektedir. Fakat katı içerikleri %3,5-4'ten yüksek olan durumlarda karıştırma ve havalandırma işlemleri zorlaşmaktadır. Bu sebeple %4'ten yüksek katı madde içeriklerinde çürütücülerde yeterli karıştırma ve havalandırmanın sağlanabildiğinden emin olunması gerekmektedir. Yoğunlaştırma sırasında polimer kullanıldıysa, bu çamurların çürütülmeleri sırasında karıştırılmaları için daha yüksek miktarlarda birim enerji ihtiyacı gerekmektedir. Aerobik çürütme sırasında hücre dokusunun tamamıyla oksidasyonu (nitrifikasyon dahil) sırasında gerekli oksijen ihtiyacı 7 mol/mol hücre veya yaklaşık 2,3 kg/kg hücredir. Karışık çamurun içerisindeki ön-çökeltim çamurundaki BOİ'nin tamamıyla oksidasyonu için ise giderilen BOİ'nin 1 kilogramı başına 1,6-1,9 kg oksijen ihtiyacı gözlenir. Bütün işletme şartlarında sistemde kalan oksijen miktarı 1 mg/L'den yüksek olmalıdır. Eğer çürütücü önünde yoğunlaştırma uygulanmamışsa, çürütücüden çıkan biyokatıların bir sonraki işleme verilmeden önce üst sularının ayrılıp daha yoğun biyokatı içeriği elde edilmelidir. Aerobik çamur çürütücülerin boyutlandırılmaları sırasında kullanılan tasarım kriterleri Tablo 9.16'da verilmektedir.

Aerobik çürütmenin ayrıca birinci kademesi termofilik, ikinci kademesi mezofilik sıcaklıklarda işletilen iki kademeli çürütme tipi, konvansiyonel ve yüksek saflıkta oksijen ile gerçekleşen ototermal termofilik çürütme tipi ve yüksek saflıkta oksijenli çürütme tipi de bulunmaktadır ve son yıllarda atıksu çamurlarının aerobik stabilizasyonu amacıyla sıkça uygulanmaktadır.

Tablo 9.16. Aerobik çamur çürütücüler için tasarım kriterleri

Parametre	*Birim*	*Değer*
Katı Madde Bekleme Süresi	*gün*	
20°C' de		*40*
15°C' de		*60*
Uçucu Katı Madde Yüklemesi	*kg.m^3/gün*	*1,6-4,8*
Oksijen İhtiyacı		
Hücre dokusu	*kg O_2/kg UAKM*	*~2,3*
Ön-çökeltim çamurundaki BOİ	*tüketilen*	*1,6-1,9*
Karıştırma İçin Enerji İhtiyacı		
Mekanik karıştırıcılar	*kW/10^3.m^3*	*20-40*
Difüzörlü karıştırıcılar	*m^3/m^3.dak*	*0,02-0,04*
Atıksuda Kalan Çözünmüş Oksijen	*mg/L*	*1-2*
Uçucu Katı Madde Giderimi	*%*	*38-50*

9.4.1.4.Kompostlaştırma

Kompostlaştırma organik atıkların, havalı termofilik çürüme ile olabildiğince stabil çamur benzeri bir humusa dönüştürülmesidir. Sonuç olarak ortaya çıkan humusta %25'e varan oranda ölü veya canlı organizma mevcut olabilir. Kompostlaştırmada pratik olarak kontrol edilmesi gereken en önemli parametreler karbon/azot oranı, sıcaklık ve havalandırmadır. Doğru bir kompostlaştırma için C /N oranı 40'tan fazla olmamalı ve nem oranı %60'ı geçmemelidir. Optimum sıcaklıkta 60°C'dir. Havalandırmalı ve havasız kompostlaştırma, hacim azaltmak, stabilizasyon ve patojen giderimi gibi amaçlar ile uygulanan katı atık dönüştürme ve uzaklaştırma teknolojileridir. Mekanik havalandırma, kompostlaşma süresini 10 haftadan 2 haftaya indirebilir. Katı atıkların biyolojik arıtımı sıvı ve gaz atıkların giderilmesinden farklılık gösterir. Katı atıklar çok heterojen yapıda ve biyolojik parçalanması zor atıklardır. Katı atık oluşumunun minimize edilmesi ve geri dönüşümle sisteme verilmesi en uygun çözüm olarak görülmektedir. Metal, cam ve kağıt atıklarının geri kazanılıp tekrar kullanılması, plastiklerin de tekrar kullanılabilir cinsten olması gerekir. Katı atıkların depolama alanlarında toprak altına gömülmesi uzun dönemde kokuşma ve yer altı suyu kirliliği gibi problemlere yol açabilir. Arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurlar, susuzlaştırıldıktan sonra kompostlaştırılabilir. Kompostlaştırma mekanizmasını etkileyen parametreler: Mikroorganizma çeşitleri (bakteriler, mantarlar, küfler ve aktinomisetler); havalandırma (0,6-1,8 m^3/kg UKM.gün); nem (su) muhtevası (optimum nem içeriği yaklaşık %55); sıcaklık (50-60°C); besin maddeleri (aktif kompostlaştırma için optimum C/N/P =100/2,5/1); pH (optimum pH=6,5); katkı maddeleri (ürün kalıntıları, saman, çim kırpıntıları, yonga, yaprak, gazete, mukavva, meyve ve sebze artıkları); süre (kompostlaştırma süresi genellikle 5-7 hafta arasında değişmekle birlikte kolay parçalanabilen katılar için bu süre 3 hafta olabilir); parçacık boyutu (kompostlaştırılacak katı atıklar genellikle 0,5-2 cm boyutlarına gelecek şekilde öğütülmesi uygun olur).

9.5. Çamurların Şartlandırılması

Şartlandırma, çamur ve biyokatıların susuzlaştırılma özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanmaktadır. En yaygın ve en ekonomik şartlandırma yöntemi kimyasal ilavesi ile şartlandırmadır. Bunun dışında çamurun ön-ısıtılması ile çamurun dondurulması ve çözülmesi gibi yöntemler de bulunmaktadır.

Kimyasal şartlandırma uygulaması ile giriş akımında %90-99 olan su muhtevası %65-85 değerine kadar azaltılabilmektedir. Kimyasal şartlandırma ile katı maddeler koagülasyona uğrayarak bünyelerinde absorbe ettikleri suyu salarlar. Şartlandırma uygulamaları özellikle santrifüj, bant-filtre ve pres filtre gibi mekanik susuzlaştırma sistemlerinin gelişimlerinden

sonra artmıştır. Demir klorür, kireç, alum ve organik polimerler gibi kimyasallar şartlandırıcı amacıyla kullanılmaktadır. Demir tuzları ve kireç çamurun m,ktarını %20-30 oranında arttırırken, polimerler ur kütlesini arttırmazlar. Kireç ile yapılan şartlandırmada pH'ın çok yüksek değerler kadar artması, kuvvetli amonyak kokusuna ve kireç ile taşlaşma problemine sebep olmaktadır. Pres filtre ile susuzlaştırma öncesinde polimer kullanımı önerilmez. Kimyasal şartlandırıcılar genellikle sıvı formda daha kolay uygulanabilmektedir. Bu sebeple kuru toz halinde olan kimyasalların çözülebilmeleri için tesis içerisinde ayrı tankların inşa edilmesi gerekebilir. Bu tankların en az 1 günlük kimyasal madde temin edilecek şekilde geniş hacimlere sahip olmaları gerekir. Ayrıca bu tanklar ve ara pompalar korozyona karşı dayanıklı malzemelerden yapılmalıdır.

Laboratuar ve pilot-ölçekli testler yapılarak en uygun şartlandırıcı dozajı ve tipi belirlenmelidir. En yaygın olarak kullanılan laboratuvar testleri Buchner hunisi testi, kapiler emme süresi testi ve standart Jar-test'dir. Kimyasal şartlandırıcı tipini ve dozajını etkileyen faktörler katı madde özellikleri ve kullanılan karıştırıcı tipidir. Ayrıca şartlandırmayı takiben uygulanacak susuzlaştırma yöntemi de önemlidir. En önemli katı madde özellikleri ise; katı maddenin kaynağı, konsantrasyonu, yaşı, pH ve alkalinitesidir. Katı madde konsantrasyonu eklenecek şartlandırıcının dozajını ve bu şartlandırıcının çamur içerisindeki dağılımını etkilemektedir. Zor susuzlaşan çamurların şartlandırılmalarında yüksek dozajlarda kimyasal maddeye ihtiyaç duyulur. Ayrıca bu çamurların süzüntü suyu kalitesi düşüktür. En kolaydan en zora doğru susuzlaşabilen çamur tipleri şu şekilde sıralanmaktadır;

1. Ham ön-çökeltim çamuru
2. Ham karışık (ön-çökeltim + damlatmalı filtre) çamur
3. Ham karışık (ön-çökeltim + atık aktif) çamur
4. Anaerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim çamuru
5. Anaerobik olarak çürütülmüş karışık (ön-çökeltim + atık aktif) çamur
6. Ham atık aktif çamur
7. Aerobik olarak çürütülmüş çamurlar

Polimer dozajları aynı zamanda moleküler ağırlık, iyonik kuvvet ve kullanılan polimerin aktivite seviyesine göre de değişmektedir. Kullanılacak polimer dozajları ile ilgili olarak üretici firmaya danışılması gerekmektedir.

Eklenen şartlandırıcının verimli bir şekilde çalışması için karıştırmanın önemli etkisi bulunmaktadır. Çamur ile koagülan madde homojen bir şekilde karışabilmelidir. Ancak karıştırma hızı oluşan flokların parçalanmaması için uygun aralıkta seçilmelidir. Ayrıca çamurlar şartlandırıldıktan sonra en kısa zamanda susuzlaştırma birimine gönderilmelidir. Ş artlandırıcı kimyasallar susuzlaştırma öncesinde ayrı bir tankta karıştırılacağı gibi, susuzlaştırma ünitesinin beseleme akımında kimyasal madde çamura doğrudan da eklenebilir. Çamur susuzlaştırılmasının bant filtre ve santrifüjle gerçekleştirilmesi durumuna ilave edilmesi gereken polimer seviyeleri Tablo 9.17'de sunulmaktadır.

Tablo 9.17. Bant-filtre pres ve santrifüjle susuzlaştırma için gerekli polimer dozları

Çamur Tipi	***kg Polimer/ton kuru katı***	
	Bant-Filtre Pres	***Santrifüj***
Ön-çökeltim çamuru	*1-4*	*1,0-2,5*
Ön-çökeltim çamuru + aktif çamur	*2-8*	*2-5*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*2-8*	*-*
Atık aktif çamur	*4-10*	*5-8*
Anaerobik çürütülmüş ön-çökeltim çamuru	*2-5*	*3-5*
Anaerobik çürütülmüş ön-çökeltim çamuru + aktif çamur	*1,5-8,5*	*2-5*
Aerobik çürütülmüş ön-çökeltim çamuru + aktif çamur	*2-8*	*-*

9.6. Çamurların Hijyenizasyonu

Çamurların arazi serilmesi ve yeniden kullanımı gibi nihai bertaraf alternatiflerinin uygulanabilmesi için ilgili yönetmeliklere uyulması gerekmektedir. Ancak, artıma çamurlarının araziye serildiği alanlarda insanların hastalık yapan (mikro) organizmalarla teması kontrol altına alınmalı ve halk sağlığı korunmalıdır. Yönetmeliklerdeki bu kısıtlardan dolayı çamur dezenfeksiyonu giderek önem kazanmaya başlamıştır. Aerobik ve anaerobik stabilizasyon prosesleri ile arıtma çamurlarının tam dezenfeksiyonu sağlanamamaktadır; ancak önemli oranda patojen bakterilerin azalmasına sebep olmaktadır.

Çamurların dezenfeksiyonu kapsamında sıvı ve susuzlaştırılmış çamurda hastalık yapan organizmaların yok edilmesi için;

- Pastörizasyon
- Isıl şartlandırma, ısıl kurutma, yakma ve piroliz gibi diğer ısıl prosesler
- Yüksek pH değerinde arıtım (kireç ilavesi ile pH değeri 12'nin üzerine çıkartılır ve 3 saat temas süresinde sağlanır)
- Çamurun çürütüldükten sonar uzun süreli depolanması
- Klorür ve diğer kimyasalların ilavesi
- Yüksek enerjili ışın uygulaması
- Kompostlaştırma (en az 30 gün olgunlaştırma süresinde 55°C'nin üzerinde tam kompostlaştırma) gibi yöntemler uygulanabilir.

Çürütme işlemi uygulanmış çamurların yeterli (tam) dezenfeksiyonu için bu çamurlar pastörize edilmeli veya uzun süreli depolanmalıdır.

9.6.1. Pastörizasyon

Pastörizasyon yöntemi ile arıtma çamurlarının dezenfeksiyonu özellikle Avrupa'da çok yaygın olarak kullanılmakta olup; Almanya ve İsviçre gibi ülkelerde bahar ve yaz dönemlerinde çamurların araziye serilmelerinden önce uygulanmaktadır. Susuzlaştırılmamış nemli çamurun pastörizasyonu için 30 dakika temas süresi ve 70°C sıcaklık değerleri 'parazit larvaları ve kistler'in etkisiz hale getirilmesine yeterli olmaktadır. Sıvı çamurun pastörizasyonu için (i) Doğrudan buhar enjeksiyonu ve (ii) Dolaylı ısı değişimi olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Dolaylı ısı değişimi yöntemiyle pastörizasyon sırasında ısı değiştiricinin iç yüzeyinde kabuk oluşumu ve organik maddelerden dolayı kolayca kirlenmesi nedeniyle, doğrudan buhar enjeksiyonu çok daha tercih edilen uygun bir yöntemdir. Ancak, kapasitesi 200 L/s'nin altındaki sistemler için bu yöntemin kullanılması ekonomik değildir.

9.6.2. Uzun Süreli Depolama

Depolama için yeterli alana sahip olan bölgelerde, stabilize olmuş ve susuzlaştırılmış arıtma çamurlarının depolanmaları gerekir. Depolama ayrıca, uygun hava şartlarının beklendiği veya biyokatının gübre özelliğinden yararlanılacak topraktaki bitkinin ihtiyacına (su ve nutrient) göre bekletilmesi gereken durumlarda da gerekmektedir. Bu sebeple, toprak lagünler gibi sistemlerde gerçekleştirilen depolama; genellikle biyokatıların araziye uygulanacakları bölgenin yakınında olmalıdır. Depolama ile ayrıca dezenfeksiyon da sağlanmış olur. Yeterli bir dezenfeksiyon için 20°C'de 60 gün, 4°C de ise 120 gün bekletme süresi gereklidir.

9.7. Çamurların Susuzlaştırılması

Susuzlaştırma, çamur ve biyokatıların nem içeriklerinin azaltılması amacıyla uygulanan fiziksel bir temel işlemdir. Susuzlaştırma aşağıdaki sebeplerin biri veya birden fazlası amacıyla uygulanmaktadır;

1. Çamur hacminde belirgin bir miktar azalma meydana geleceği için katı ve biyokatıların nihai uzaklaştırma alanına nakliye masraflarını azaltmak
2. Susuzlaştırılmış çamur keklerinin kürek ve benzeri aletlerle taşınabilmeleri sırasında çok daha kolay işlem görebilmelerini sağlamak
3. Yakma öncesinde uygulanarak çamurun kalorifik değerini arttırmak
4. Kompostlaştırma öncesinde uygulanarak ilave edilmesi gereken kompostlaştırmaya yardımcı maddelerin miktarlarını azaltmak
5. Biyokatılardaki fazla nemin giderilerek kokusuz ve kokuşmaya elverişsiz kek oluşumunu sağlamak
6. Nihai uzaklaştırmada düzenli depolama tercih edilirse bu sahalarda meydana gelecek sızıntı suyu üretimini azaltmak

Susuzlaştırma amacıyla uygulanan doğal yöntemlerde buharlaşma ve süzülme işlemleri gerçekleşmektedir. Çamurların su içeriklerinin azaltılması ve kuruma hızlarında meydana gelen değişim Şekil 9.8'de gösterilmektedir. Mekanik olarak gerçekleştirilen susuzlaştırma yöntemlerinde ise, çamurların susuzlaştırılmaları mekanik aletler kullanılarak fiziksel olarak çok daha hızlı gerçekleşebilmektedir. Mekanik yöntemler arasında filtrasyon, sıkma, kapiler hareket, santrifüj ile ayırma ve sıkıştırma yer almaktadır. Susuzlaştırma yönteminin seçiminde göz önüne alınması gereken en önemli etkenler çamurun tipi, susuzlaştırmadan sonra oluşacak ürünün (kek) özelliği ve alan ihtiyacıdır. Örneğin alan problemi yoksa kurutma yatakları veya lagünler tercih edilebilir. Fakat dar alanlarda inşa edilen arıtma tesislerinde mekanik susuzlaştırma yöntemleri uygulanmalıdır. Anaerobik olarak çürütülmüş çamurlar başta olmak üzere bütün çamur tiplerinin susuzlaştırılmaları sırasında meydana gelebilecek istenmeyen koku oluşumu kontrol altına alınmalıdır. Ayrıca aerobik olarak çürütülmüş çamurların mekanik yöntemlerle susuzlaştırılmaları tavsiye edilmez. Çürütme prosesi sırasında katı maddeler çözünmüş hale geçerek partikül boyutlarında azalma meydana gelmektedir. Bu da susuzlaştırma işlemini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple aerobik çürütme uygulanmış çamurlara mekanik susuzlaştırma yöntemlerinin yerine doğal (kum yatakları vb.) susuzlaştırma yöntemleri önerilmektedir. En yaygın olarak uygulanan mekanik ve doğal çamur susuzlaştırma yöntemleri santrifüj ile susuzlaştırma, belt-filtre presler, filtre presler, kurutma yatakları ve lagünlerdir. Ayrıca çamur yatağının tabanı geçirimsiz bir malzeme ile kaplanmış, vakum yardımı ile gerçekleştirilen, solar (sera) tipli ve sazlık ve benzeri bitki örtüsüyle kaplanmış çamur kurutma yatakları da uygulanmaktadır. Vakum filtreler ise çok uzun yıllardan beri uygulanmış fakat son yıllarda daha verimli seçeneklerin tasarımlarıyla uygulamaları önemli oranda azalmıştır.

Şekil 9.8. Tipik çamur kuruma eğrisi [44]

9.7.1. Mekanik Susuzlaştırma Yöntemleri

9.7.1.1.Santrifüj ile susuzlaştırma

Santrifüj ile susuzlaştırma işlemi çamur suyunun santrifüj kuvvetlerinin etkisi altında ayrılarak daha yoğun çamur keki haline getirilmesidir. İnce ve düşük yoğunluklu katı maddeler içeren süzüntü suyu tesis başına geri verilir. Çamurun tipine bağlı olarak oluşacak kekte %10-30 arasında değişen katı içeriklerine ulaşılabilir. Yakma ve düzenli depolama gibi nihai uzaklaştırma yöntemlerinde çamur kekinin konsantrasyonunun %25'ten büyük olması öngörülür. Şartlandırma amacıyla ilave edilen polimer dozajı ise 1,0-7,5 kg/10^3 kg çamur (kuru katı olarak) aralığındadır. Santrifüj ile susuzlaştırma işlemi aynı zamanda çamurların yoğunlaştırılması amacıyla da uygulanmaktadır. Ön-çökeltim çamurlarının santrifüj ile susuzlaştırılmasından sonra çamur kekinde %25-35 arasında katı madde içeriğine ulaşılabilmektedir. Bu çamurlarda katı madde tutma oranları ise kimyasal ilaveli ve kimyasal ilavesiz sırasıyla %75-90 ve ≥%95'tir. Karışık (ön-çökeltim + atık aktif çamur) çamurların santrifüj ile susuzlaştırılmasından sonra çamur kekinde %12-20 arasında katı madde içeriğine ulaşılabilmektedir. Bu çamurlarda katı madde tutma oranları ise kimyasal ilaveli ve kimyasal ilavesiz durumlarda sırasıyla %55-65 ve ≥%92'dir.

9.7.1.2.Bant filtre ile susuzlaştırma

Bant filtre ile susuzlaştırma işleminde çamur sürekli olarak beslenmektedir. Bu yöntemin üç temel prensibi kimyasal şartlandırma, graviteli (yerçekiminin etkisiyle) drenaj işlemi ve susuzlaştırılma amacıyla mekanik basınç uygulamasıdır. Bant filtrelerin birçoğunda şartlandırılmış çamur graviteli drenaj kısmına verilerek burada yoğunlaşmaya bırakılmaktadır. Bu bölmede serbest suyun büyük bir kısmı yerçekiminin etkisiyle çamurdan ayrılarak giderilir. Bu bölmeyi takiben düşük basınç uygulanan kısım bulunmaktadır ve burada uygulanan basıncın altında şartlandırılmış çamur karşılıklı geçirimli bez kayışların arasında ezilir (sıkılır). Bu sıkma ve kesme kuvvetleri daha fazla suyun çamurdan salınmasına yardımcı olur. Susuzlaştırma sonucunda oluşan çamur keki, kayışlardan sıyırıcı bıçaklar yardımıyla sıyrılarak uzaklaştırılır. Mevcut kayış (bant) genişlikleri 0,5-3,5 m arasındadır. Evsel atıksu çamurları için en yaygın olarak kullanılan kayış genişliği 2 m'dir. Susuzlaştırılan çamur tipine ve konsantrasyonuna bağlı olarak, çamur yükleme hızları 90-680 kg/m.st, hidrolik yüklemeler ise kayış genişliğine bağlı olarak 1,6-6,3 lt/m.sn arasında değişir. Hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer gazların giderimi için yeterli havalandırmanın sağlanabilmesi için tasarım sırasında gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Bant filtre ve santrifüjle çamur susuzlaştırmada kullanılan polimer dozajları ve Bant filtrelerin farklı çamur ve biyokatı tipleri için susuzlaştırma performansları sırasıyla Tablo 9.15 ve Tablo 9.16'da verilmektedir. Mekanik susuzlaştırma yöntemlerinden diğeri ise filtre preslerdir. Bunların sabit ve değişken hacimli olmak üzere iki farklı tipi bulunmaktadır. Bant filtrelerden en önemli farkı çamurların suyunu verebilmelerinin arttırılması amacıyla daha yüksek basınçlar altında uygulanmasıdır.

Tablo 9.18. Bant filtre ve santrifüjle çamur susuzlaştırmada kullanılan polimer dozajları

Çamur Tipi	*kg/ton KM*	
	Bant-filtre pres	*Santrifüj*
Ön-çökeltim çamuru	*1-4*	*1-2,5*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*2-8*	*2-5*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*2-8*	-
Atık aktif çamur	*4-10*	*5-8*
Anaerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim çamuru	*2-5*	*3-5*
Anaerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim + atık aktif çamur	*1,5-8,5*	*2-5*
Aerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim + atık aktif çamur	*2-8*	-

Tablo 9.19. Bant filtrelerin farklı çamur ve biyokatı tipleri için susuzlaştırma performansları

Çamur Tipi	*Kuru katı madde beslemesi (%)*	*Bir metre bant uzunluğu başına yükleme hızı*		*Kuru polimer (g/kg kuru katı madde)*	*Kekteki katı madde (%)*	
		L/ sn	*kg/sa*		*Değer*	*Aralık*
Ön-çökeltim çamuru	*3-7*	*1,8-3,2*	*360-550*	*1-4*	*28*	*26-32*
Atık aktif çamur	*1-4*	*0,7-2,5*	*45-180*	*3-10*	*15*	*12-20*
*Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur (50:50)**	*3-6*	*1,3-3,2*	*180-320*	*2-8*	*23*	*20-28*
*Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur (40:60)**	*3-6*	*1,3-3,2*	*180-320*	*2-10*	*20*	*18-25*
Ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*3-6*	*1,3-3,2*	*180-320*	*2-8*	*25*	*23-30*
Anaerobik olarak çürütülmüş						
Ön-çökeltim çamuru	*3-7*	*1,3-3,2*	*360-550*	*2-5*	*28*	*24-30*
Atık aktif çamur	*3-4*	*0,7-2,5*	*45-135*	*4-10*	*15*	*12-20*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*3-6*	*1,3-3,2*	*180-320*	*3-8*	*22*	*20-25*
Aerobik olarak çürütülmüş						
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur (yoğunlaşmamış)	*1-3*	*0,7-3,2*	*135-225*	*2-8*	*16*	*12-20*
Ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur (50:50) (yoğunlaşmış)*	*4-8*	*0,7-3,2*	*135-225*	*2-8*	*18*	*12-25*

** Ön-çökeltim ve atık aktif çamurdaki kuru katı miktarlarına göre oranlanmıştır*

9.7.1.3.Pres filtre ile susuzlaştırma

Pres filtre ile susuzlaştırma işleminde, çamurun veya biyokatının içerisindeki su, yüksek basınç altında kuvvet uygulanarak uzaklaştırılması sağlanır. Çamur kekinde özellikle %35'ten daha fazla katı madde içeriğine gerek duyulması durumunda bu susuzlaştırma işlemi tercih edilmelidir. Sabit ve değişken hacimli olmak üzere iki çeşit pres filtre ile susuzlaştırma yöntemi bulunmaktadır. Bir pres filtre tasarımı yapılırken dikkate alınması gereken önemli hususlar şunlardır:

(i) Susuzlaştırmanın gerçekleştirildiği mekânın yeterli bir şekilde havalandırılması
(ii) Yüksek basınçlı yıkama sistemi
(iii) Kireç kullanımı durumunda ortaya çıkan kalsiyumun giderimi için sirkülasyonlu bir asit yıkama sistemi
(iv) Ş artlandırıcı tankının ön kısmına ilave edilecek bir parçalayıcı
(v) Pres filtrenin takiben ilave edilecek kek kırıcılar veya kesiciler (özellikle susuzlaştırılmış çamur keki yakılarak bertaraf edilecekse)

(vi) Pres filtre sisteminde bulunan tabakaların değiştirilmesi ve bakımı/onarımı için gerekli ekipmanlar

Şekil 9.10. Pres filtre susuzlaştırma proses şeması: hidrofilik organik çamur için

9.7.2. Doğal Susuzlaştırma Yöntemleri

9.7.2.1.Çamur kurutma yatakları

Çamur kurutma yatakları özellikle çürütülmüş biyokatıların ve yoğunlaştırma uygulanmamış uzun havalandırmalı aktif çamur sistemlerinden kaynaklanan çamurların susuzlaştırılması amacıyla çok yaygın olarak uygulanan doğal bir çamur susuzlaştırma yöntemidir. Bu yataklarda kurutulma işleminden sonra oluşan katılar düzenli depolama alanlarında uzaklaştırılabilirler veya toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilirler. Başlıca avantajları arasında düşük maliyetleri, düşük işletme ve bakım ihtiyaçları ve kurumuş üründeki yüksek katı içerikleridir. Fakat geniş alanlara ihtiyaç göstermeleri, iklim değişikliklerinin kuruma özellikleri üzerindeki önemli etkisi, çamur kekinin uzaklaştırılması sırasında insan gücüne ihtiyaç duyulması, haşere ve potansiyel koku oluşumunun gözlenmesi en önemli mahzurlarını oluşturmaktadır.

Konvansiyonel çamur kurutma yatakları

Konvansiyonel çamur kurutma yatakları genellikle küçük ve orta ölçekli yerleşim yerlerinde uygulanmaktır. Nüfusu 20.000'den büyük olan yerleşim yerlerinde uygulanmaları tavsiye edilmez. Bu yatakların ilk yatırım maliyetleri, oluşan çamur keklerinin yataktan kaldırılması ve uzaklaştırılması için gerekli maliyet, yatak içerisindeki kumun geri yerleştirilmesi ve büyük alanlara ihtiyaç duyulması nüfusu büyük olan yerlerde bu yatakların uygulamalarını kısıtlamaktadır. Tipik bir kurutma yatağında çamur yatağa 200-300 mm seviyesinde

yerleştirilerek kurumaya bırakılır. Çamur suyu, çamur yatağı ve destekleyici kum içerisinde süzülerek drenaj ile ayrılır. Ayrıca yatak yüzeyinin hava ile temas eden kısımlarında meydana gelen buharlaşma çamurun su muhtevasını azaltır. Fakat çamur suyunun büyük bir kısmı drenaj ile çamurdan giderildiği için yatağın tabanında yeterli drenaj sisteminin kurulması gerekmektedir. Bu amaçla kurutma yatağı drenaj hattı (delikli plastik veya seramik borular) ile teçhizatlandırılır. Drenaj boruları minimum %1 eğim ile döşenerek üzerleri kaba çakıl taşları veya kırılmış taşlar ile kapatılarak desteklenmektedir. Kum tabakasının derinliği 230-300 mm aralığında olmalıdır ve yatağın temizliği sırasında bir miktar kum kaybının dikkate alınması gerekir. Daha derin kum tabakası drenajı engelleyebilmektedir. Kurutma yataklarına serilen kumun üniformluk katsayısı 4'ten küçük ve kum daneciklerinin etkili boyutu 0,3-0,75 mm arasında değişmelidir. Kurutma alanı 6 m genişliklerde ve 6-30 m uzunluklarda olmak üzere birbirinden farklı bölümlere ayrılmaktadır. Çamur kurutma yataklarına gelen borular içerisindeki hız en az 0,75 m/s olmalıdır. Arıtma çamurları tamamen drene olduktan ve kuruduktan sonra kurutma yataklarından uzaklaştırılmaktadır. Kurumuş çamurun iri ve çatlamış yüzeyi vardır ve genellikle siyah veya koyu kahverengi renktedir. Uygun şartlar altında işletilmiş kurutma yataklarında kurutulan çamurların nem oranları 10-15 günlük kurutma süresi sonrasında yaklaşık %60 olmaktadır. Kurutulmuş çamur kekleri insanlar tarafından küreklerle el arabalarına veya kamyonlara yüklenmektedir. Fakat çamur kekleri özel mekanik ekipmanlarla da uzaklaştırılabilmektedir. Açık kurutma yataklarında istenmeyen koku oluşumu gözlenebilmektedir. Bu sebeple tasarım sırasında oluşabilecek kokuya karşı tedbirlerin alınması gerekir. Bu yataklar yerleşim yerlerinden en az 100 m uzaklıkta inşa edilmelidir. Çamur kurutma yataklarının yükleme kriterleri kişi başına gerekli kurutma yatağı alanı (m^2/kişi) veya bir yılda birim yatak alanına yüklenebilecek kuru katıların miktarı (kg/m^2.yıl) olarak düşünülebilmektedir. Kapalı kurutma yatakları, yağmur, kar gibi olumsuz hava şartlarından etkilenmeyecekleri için daha fazla biyokatı yüklemelerine izin verebilmektedir. Farklı çamur ve biyokatı tipleri için açık kurutma yataklarında susuzlaştırmada gerekli alan ihtiyaçları Tablo 9.20'de verilmektedir.

Tablo 9.20. Farklı çamur ve biyokatı tipleri için açık kurutma yataklarında susuzlaştırmada gerekli alan ihtiyaçları

Çamur Tipi	***Alan (m^2/kişi)***	***Çamur Yükleme Hızı (kg kuru katı madde/m^2.yıl)***
Çürütülmüş ön-çökeltim çamuru	*0,1*	*120-150*
Çürütülmüş ön-çökeltim çamuru + damlatmalı filtre humusu	*0,12-0,16*	*90-120*
Çürütülmüş ön-çökeltim çamuru + atık aktif çamur	*0,16-0,23*	*60-100*
Çürütülmüş ön-çökeltim çamuru + kimyasal çamur	*0,19-0,23*	*100-160*

Çamur biriktirme lagünleri

Çamur biriktirme lagünleri özellikle çürütülmüş çamurların kurutulmaları amacıyla uygulanmaktadır. Bu lagünler ham çamurların, kireç ihtiva eden çamurların veya duru fazında yüksek kirlilik içeren çamurların kurutulmaları sırasında istenmeyen koku oluşumlarından dolayı uygun değildir. Çamur kurutma yataklarında olduğu gibi çamur kurutma lagünlerinin verimleri de hava şartlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Yağmur kar ve benzeri yağışlar ve düşük sıcaklıklar susuzlaştırma prosesini engellemektedir. Bu sebeple buharlaşma hızının yüksek olduğu bölgelerde uygulanmaları tavsiye edilmektedir. Özellikle yeraltı suları için öngörülen yönetmelikler, yüzey altı drenajı yoluyla susuzlaştırma prosesinin uygulamalarını kısıtlamaktadır. İçme suyu amaçlı kullanılan bir yeraltı su kaynağına yakın olan kurutma lagünlerinin tabanı geçirimsiz hale getirilmelidir. Aksi takdirde süzülme ile gerçekleştirilen susuzlaştırma önemli oranda sınırlandırılmalıdır. Şartlandırılmamış çürütülmüş biyokatılar genellikle 0,75-1,25 m derinlikte olacak şekilde kurutma yataklarına eşit olarak dağıtılarak

serilmelidir. Suzuzlaştırmanın esas mekanizması buharlaşmadır. Duru faz ayrılarak arıtma tesisinin başına geri verilmektedir. Katı içeriği %25-30 arasında olan kurutulmuş çamurlar mekanik olarak lagünlerden uzaklaştırılmaktadır. Lagünlerin birkaç aydan birkaç yıla kadar değişebilen aralıklarda yükleme döngüleri bulunmaktadır. Tipik olarak, biyokatılar lagünlere 18 ay boyunca pompalamakta ve daha sonra lagünler 6 ay boyunca dinlenmeye bırakılmaktadır. Katı yükleme hızları 36-39 kg/m^3.yıl lagün kapasitesidir. Temizleme, bakım, onarım veya acil durumlar için en az iki yatak olarak tasarlanmalıdır.

9.8. Çamurların Kurutulması

9.8.1. Termal Kurutma

Arıtma çamurlarına uygulanan termal işlemlerden biri olan termal kurutma, suyun termal yollarla çamurdan buharlaştırılması yöntemidir. Bu yöntem ile biyokatıların ihtiva ettikleri suyun buharlaştırılması ve konvansiyonel susuzlaştırma yöntemleri ile gerçekleştirilebilen nem içeriklerinden daha düşük nem içeriklerinin elde edilebilmesi amacıyla ısı uygulanmaktadır. Termal kurutmanın öncesinde, çamurun mekanik yöntemler kullanılarak susuzlaştırılması önerilmektedir. Bu ön-işlem sayesinde kurutucuda uzaklaştırılması gereken su miktarı önemli ölçüde azaltılmakta ve kurutucunun verimi de önemli oranda artmaktadır. Bunun için kurutucuya beslenen susuzlaştırılmış çamur keki, 60-93°C arasında tutularak; çamurun içerisinde bulunan organik maddeler henüz parçalanmadan su buharlaştırılmış olur. Bu yöntem ile ulaşılabilecek en düşük nem içeriği kurutucunun tasarımına, çalıştırılma şartlarına, beslenen çamurun veya biyokatının nem içeriğine ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Kentsel atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamurların nem içerikleri %5 değerine kadar azaltılabilmektedir [45]. Böylece, %95 katı madde oranına kadar ulaşılabilen kurutulmuş biyokatı (ürün)'nın uzaklaştırılması amacıyla gerekli nakliye masrafları da çok daha düşüktür. Isı ile kurutma işlemi ile çamurların stabilizasyonu da gerçekleştirilmiş olur. Ayrıca ilave patojen giderimleri gerçekleşmekte ve bu ürünlerin depolanabilirlikleri ve pazarlanabilirlikleri iyileşmektedir. Ancak, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri ile vasıflı personel gereksinimleri bu yöntemin mahzurlarını oluşturmaktadır [45].

Termal kurutma ile ıslak katılara ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Isı transfer yöntemleri konveksiyonlu (dolaylı), kondüksiyonlu (dolaysız), ışınımla (kızıl ötesi) veya bunların bir arada kullanımı şeklindedir.

Konveksiyonlu sistemlerde ıslak çamur direkt olarak ısı transfer mekanizması (genellikle sıcak gazlar) ile temas halindedir. *Kondüksiyonlu* sistemlerde ise ıslak çamur ile ısı transfer mekanizması (genellikle buhar veya diğer sıcak sıvılar) arasında birbirlerinin temasını önleyecek bir duvar bulunmaktadır. *Işınımla* kurutma sistemlerinde kızıl ötesi lambalar, elektrikli rezistanslar ve benzeri radyasyon yayan ısı kaynakları kullanılarak ıslak çamurun nem içeriği buharlaştırılmaktadır. Isı kaynakları olarak kömür, yağ, gaz, kızıl ötesi radyasyon veya kurutulmuş çamur kullanılmaktadır.

En yaygın olarak kullanılan konveksiyonlu (dolaylı) kurutma sistemi akışkan yataklı kurutma yöntemidir. Bu yöntemde buhar kazanı ve akışkan yatak ile teçhizatlandırılmış bir kurutma sistemi bulunmaktadır. Buharlaşma için gerekli ısı, yatak içerisindeki ısı eşanjörü ile gerçekleştirilen buhar yardımıyla sağlanmaktadır. Yatak içerisindeki ısı yaklaşık 120°C civarında sabit tutulmaktadır. Yüksek ısı altında akışkan hale getirilmiş kum yatağı ile ıslak çamur direkt olarak temas halindedir. Oluşan kurutulmuş ürün yardımcı yakıt amaçlı olarak veya düzenli depolama alanlarının üzerlerinin kapatılması için kullanılabilmektedir. Ürünün çok az kokusu vardır. Sistem otomatik olarak işletilebilmekte ve az yere ihtiyaç göstermektedir. Kurutucudan çıkan ürün depolanmadan veya yüklenmeden önce mutlaka yaklaşık 50°C'e kadar soğutulmalıdır.

En yaygın olarak kullanılan kondüksiyonlu (dolaysız) kurutma sistemi ise yatak veya dikey kurutma fırınlarıdır. Bu kurutma fırınlarında beslenen çamur ısı kaynağı ile temas halinde değildir. Yaklaşık %20 katı içeriğine sahip susuzlaştırılmış çamurlar geri devir ettirilen kurutulmuş ürün ile karıştırılarak kurutma fırınlarına beslenir. Fırından çıkan ürünün %5-8 arasında nem içeriği bulunmaktadır. Ayrıca bu ürünlerin partikül boyutları 2-4 mm arasında olup pazarda tercih edilmektedir. Pazarlanabilmeleri açısından en uygun tanecik boyutu olan 3-5 mm aralığından daha küçük ve daha büyük partiküller elekten geçirilerek giriş çamur akımı ile karıştırılmak üzere başa geri döndürülmektedir. Böylece kurutma fırınlarına beslenen çamur akımının nem muhtevası değişmeden katı madde miktarı arttırılmaktadır. İşletmede karşılaşılan en büyük tehlike ise kurutuculardan çıkan ürünün yüksek kurulukta ve yüksek miktarda ince toz içermesidir. Bu ürünün taşınması ve depolanması sırasında havada askıda bulunan organik toz, çok kolay ve hızlı bir şekilde tutuşarak patlayabilmekte ve yangın çıkarabilmektedir. Bu sebeple tasarım sırasında bu ürünlerin depolanacakları mekânlarda tutuşmayı önleyecek ateş kaynağının bulunmaması gerekmektedir. Ayrıca depolama alanı içerisinde çalışan kişilerin de sigara ve benzeri ateş kaynakları ile bu alanlarda çalışmalarının önlenmesi gerekmektedir. Isı ile kurutma yöntemleri ile kurutma sırasında iki önemli parametrenin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunlardan biri oluşan külün toplanması ve diğeri ise koku kontrolüdür. Kurutulmuş çamur ve atık gazlar kurutucunun içinde veya bir siklonda birbirinden ayrılır. Atık gaz, içindeki koku ve partiküllerin giderimi için, bir gaz arıtımı sisteminden geçirilerek dışarı atılır [45].

9.8.2. Solar Kurutma

Solar ısı enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek kapasiteye sahiptir. Güneşin yeryüzüne ulaşabilen $1{,}08 * 10^{14}$ kW'lık enerjisi; dünyada 3000 GW değerindeki tüm enerji üretim kapasitesinin yaklaşık dört katına karşılık gelmektedir. Kapasitesi bu kadar yüksek olan solar enerji, günümüzde atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların kurutulmasında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla, solar enerji üç farklı yol ile uygulanabilir:

(i) Konvansiyonel çamur kurutma yataklarında olduğu gibi çamur yatağına doğrudan solar ışımanın uygulanması;
(ii) Absorbe edilen enerjinin atmosfere kaçmasının engellenmesi için üzeri kapalı çamur yatağına doğrudan solar ışımanın uygulanması
(iii) Çamur yatağına bir akışkan yardımı ile dolaylı olarak absorblanan solar ışımanın uygulanmasıdır.

Solar kurutma yatakları. Arıtma çamurlarının veya biyokatıların yoğunlaştırmayı veya susuzlaştırmayı takiben kurutulması amacıyla uygulanan diğer bir yöntem de kurutma yataklarının kapalı mekânlar içerisinde bulunduğu solar kurutmadır. Solar kurutma sistemi, 'özel seralar' olarak düşünülebilir ve bu sistemin esas kurutma kaynağı solar radyasyondur [45] Bir solar kurutma biriminde gerçekleşen enerji transfer mekanizması Şekil 9.9'da gösterilmektedir.

Solar kurutma sisteminde bedava güneş enerjisi kullanıldığı için çok avantajlıdır ve işletme masrafı önemli ölçüde azalır. Diğer taraftan, patojen gideriminde de oldukça iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bazı çalışmalarda, fekal koliform açısından EPA'nın Sınıf B kalitesinde patojen ihtiyacına uygun çamur keki elde edildiği; hatta bazı durumlarda sınırlı miktarda kireç kullanılarak Sınıf B kalitesinde (1000 CFU/gr kuru katı) bile patojen değerinin sağlanabildiği rapor edilmiştir [47].

Şekil 9.9. Solar kurutma biriminde enerji transfer mekanizması [46]

Bu kurutma sistemi, dikdörtgen tabana sahip bir yapı olup; yarı saydam bir odadır. Atmosferden gelen kurutma şartlarını ölçebilen sensörler yer almaktadır. Ayrıca, çatı kısmında panjur bulunan, havalandırma fanları ve çevredeki kuruma şartlarını kontrol eden bir mikroişlemci de bulunmaktadır. Bunun dışında, 'köstebek' olarak adlandırılan mobil bir elektromekanik alet de bulunmakta olup; bu alet ile kurutulmuş biyokatıların hareketi sağlanır. Havalandırma fanları, camekân seranın içerisindeki havanın homojen bir şekilde dağılımını sağlar ve hava hareketlerini sirküle ederek; nem-yüklü havanın dışarı atılmasına yardımcı olur. Çamur yatağı üzerinde hareket eden 'köstebek', ıslak biyokatıları yüzeye getirerek; kurumanın hızlanmasını sağlar. Solar bir kurutma sisteminin şematik görüntüsü Şekil 9.10'da gösterilmektedir. Sonuç olarak, katı madde oranı %90'nın üzerine çıkabilen kuru topaklaşmış (pellet) kek elde edilir.

Kurutma enerjisinin ana kaynağı olan solar radyasyon, sıcaklık, nem oranı ve tüm bu parametrelerin yıllık değişimleri, bu sistemlerin boyutlandırılmasında kullanılan esas tasarım parametreleridir [45]

Şekil 9.10. Solar kurutma sisteminin şematik bir görüntüsü [48]

9.9. Çamurların Yakılması

Yakma (insinerasyon), çamur içindeki yanıcı maddelerin ekzotermik olarak hızlıca oksidasyonu şeklinde tanımlanan tam yanma işlemidir. Yakma aynı zamanda İleri Termal Oksidayon (İTO) olarak da adlandırılmaktadır. Arıtma çamurlarının ve biyokatıların yakılması sırasında çamur içerisindeki organik katılar, tamamen okside olarak nihai son ürünlere dönüşürler. Bu nihai ürünler önemli oranda karbondioksit, su ve küldür.

Oksijenin bulunduğu bir ortamda susuzlaştırılmış çamurların tutuşabilmesi için 420-500°C aralığındaki sıcaklığa ihtiyaç vardır. Organik katı maddelerin tamamen yanabilmesi için ise bu sıcaklık değerinin 760-820°C aralığında olması gerekir.

En önemli avantajları; çamurların hacimlerinin yüksek oranlarda azaltılarak uzaklaştırılmaları için gerekli masrafların düşürülmesi, zehirli maddelerin ve patojen mikroorganizmaların giderilmesi ve enerji ger kazanım potansiyeline sahip olmasıdır. Fakat yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri, kalifiye işçi ihtiyacı ve hava kirletici emisyonlarının üretilmesi en önemli mahzurlarını oluşturmaktadır. Baca gazında diğer gazlar ile birlikte partikül maddeler de bulunabilir; bu sebeple bu emisyonların atmosfere salınımından önce mutlaka arıtılmaları gerekmektedir. Ayrıca, tasarımı doğru yapılan bir yakma fırını, baca gazı ısısının kullanılmasına elverişli olmalıdır.

Yakma genellikle sınırlı uzaklaştırma alanına sahip orta ve büyük ölçekli tesislerde uygulanmalıdır. Çürütülmüş çamurların yakılması önerilmez çünkü çürütülmüş çamurların ihtiva ettikleri düşük uçucu katı madde miktarlarının yakılması için yüksek oranda yardımcı yakıta ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, genellikle susuzlaştırılmış (mekanik susuzlaştırma veya temal kurutma) çamurların yakılması önerilmektedir. Çamurun nem içeriğinin düşürülmesi ile yardımcı yakıt (genellikle yağ, doğal gaz veya fazla çürütücü gazı) ihtiyacı önemli oranda azalmaktadır. Aynı zamanda, otojen (kendi kendine oluşan) bir oksidasyonunun sağlanabilmesi için de susuzlaştırılmış çamur/biyokatı kekinde katı madde içeriğinin %30-35 (%65-70 nem) aralığında olması tercih edilmektedir. Avrupa'da termal olarak hidroliz edilerek susuzlaştırılan biyokatılar için yakma uygulamaları bulunmaktadır. Ancak arıtma çamurlarının yakılarak bertaraf edilmesi; çamurun yeniden kullanımının mümkün ya da ekonomik olmadığı, düzenli depolama alanının hiç olmadığı veya yetersiz olduğu ve hijyenik açıdan uygun şartların sağlanamadığı durumlarda tercih edilmelidir [45].

<u>Tam yanmanın esasları</u>

Yanma, yakıt içerisindeki yanabilen maddelerin hızlı ekzotermik oksidasyonudur. Yakma işlemi ile tamamen yanma gerçekleştirilir. Çamurun uçucu maddesi içerisinde bulunan karbonhidratlar, yağlar ve proteinlerin başlıca elemanları karbon, oksijen, hidrojen, kükürt ve azottur (C -O -H -S -N). Diğer ana bileşiklerini ise nem ve kül oluşturmaktadır. Bir maddenin tam yanmasının gerçekleşmesi için gerekli oksijen ihtiyacı, bu maddenin bileşenlerinin ne olduklarının bilinmesiyle tayin edilebilir. Karbon ve hidrojenin nihai son ürünler olan karbondioksit ve suya oksidasyonu (9.5) denklemine göre belirlenir [2].

$$C_aO_bH_cN_d + (a + 0{,}25c - 0{,}5b)O_2 \rightarrow a\,CO_2 + 0{,}5\,c\,H_2O + 0{,}5\,d\,N_2 \qquad (9.5)$$

Gerekli teorik hava miktarı, hesaplanan oksijen miktarının 4.35 katıdır çünkü hava %23 oksijenden meydana gelmektedir. Bu sebeple, tam yanmanın sağlanabilmesi için ortamda yeterli miktarda fazla hava olmalıdır. Ancak, çok fazla hava ile tasarımı yapılan yakma sistemleri gereksiz yere çok büyük ekipman boyutlarına ve yüksek ilave yakıt ihtiyacına sebep olmaktadır.

Çamurların yakıldığı sistemlerde en önemli parametrelerden biri olan çamurun ısıl değeri; çamurun birim kütlesi başına açığa çıkan ısı miktarı ile ifade edilir. Çamurda (ve mevcut yardımcı yakıtların çoğunda) birincil yanıcı elementler olan karbon (34 MJ/kg), hidrojen (144 MJ/kg) ve kükürt (10 MJ/kg) içeriğine göre ısıl değer (9.6) denklemine göre belirlenebilmektedir [2], [45].

$$HHV\ (MJ/kg) = 33{,}83\,C + 144{,}7\,(H - O/8) + 9{,}42\,S \qquad (9.6)$$

Burada;

HHV : Daha yüksek ısıl değeri, MJ/kg
C : Karbon, ondalık olarak ifade edilen ağırlık yüzdesi (kuru bazda)
H : Hidrojen, ondalık olarak ifade edilen ağırlık yüzdesi (kuru bazda)
O : Oksijen, ondalık olarak ifade edilen ağırlık yüzdesi (kuru bazda)
S : Sülfür, ondalık olarak ifade edilen ağırlık yüzdesi (kuru bazda)

Yakma tesislerinin tasarımları sırasında, ısı dengesinin detaylı olarak kurulması gerekmektedir. Bu dengenin kurulması sırasında, yakma fırınının duvarlarından, fırının bacasından atılan baca gazlarından ve külden kaynaklanacak her türlü ısı kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Çamurun içerisindeki 1 kg suyun buharlaşabilmesi için gerekli ısı enerjisi yaklaşık 4-5 MJ (4000-55000 Btu)'dur. Yakma fırınının tasarım sıcaklığı külün erime nokta olan 1050°C'yi aşmamalı ve koku gideriminin etkili olabilmesi için 700°C'nin altına düşmemelidir.

Çamurun yakıt değeri çamur tipine göre değişmektedir. Özellikle yüksek yağ içeren ön-çökeltim çamurlarının yakıt değeri en yüksek iken, çürütülmüş biyokatıların yakıt değeri neredeyse yarı yarıya daha düşüktür. Farklı çamur tipleri için yakıt değerleri bir kilogram toplam katı madde miktarı başına şu şekildedir: Ham ön-çökeltim çamuru: 20000-28000 kJ; Aktif çamur: 16000-22000 kJ; Anaerobik olarak çürütülmüş ön-çökeltim çamuru: 12000 kJ; Kimyasal olarak çökeltilmiş ham ön-çöktürme çamuru: 16000 kJ; Biyolojik filtre çamuru: 20000 kJ, Gres ve köpük: 39000 kJ ve Izgara artıkları: 21000 kJ.

Arıtma çamurları ayrı olarak veya evsek katı atıklar ile birlikte yakılabilmektedir. Katı atıklar ile birlikte yanmanın en önemli avantajı beslenen çamurun yakıt değerinin arttırılarak yardımcı yakıt ihtiyacının azaltılmasıdır. Isı geri kazanımının gerçekleştirilmeyeceği sistemlerin işletilmeleri sırasında, 1 kg kuru atıksu çamuru başına 4,6 kg evsel katı atık karışımı uygun olmaktadır. Isı geri kazanımının gerçekleştirileceği işletilmelerde ise 1 kg kuru atıksu çamuru başına 7 kg evsel katı atık karışımı uygundur.

Arıtma çamurlarının yakılmaları sırasında şu aşamalar oluşur: Isıtma (çamurun 100°C'ye kadar ısıtılması); kurutma (çamurun 200°C'de kurutulması); uçucu maddelerin destilasyonu (kurutma alanında gerçekleşen buharlaşma sırasında, çamurdaki su ile birlikte uçucu maddelerin gaz haline geçmesi); yanıcı organik maddelerin yakılması (çamurun yanması, yakma odasının akkor haline gelmiş duvarlarından ve alevden ışınım ve baca gazlarından konveksiyon yoluyla aktarılan ısı ile 200-500°C'de gerçekleşir) ve karbon kalıntılarının kalsinasyonu (kalıntıların yakılması ve yanma sonucu oluşan kül ve cürüfun alandan uzaklaştırılabilecek sıcaklığa kadar soğutulması) [45].

9.9.1. Çok Hücreli Yakma Fırını

En yaygın olarak kullanılan yakma fırını çok hücreli (katlı-ocaklı) fırın tipidir. Bu yakıcı sistem ismini, dikey olarak bölünmüş 7-9 refrakter gözden almaktadır. Fırının iç kısmı, refrakter tuğla veya ısıya dayanıklı beton ile kaplanmış 6-8 m çapında dikey çelik bir silindirden oluşmaktadır. Çamur konveyörler yardımıyla bir siloya beslenir ve bunu takiben fırının en üst gözüne gönderilir. Sıyırıcılar yardımıyla hareket ettirilen çamurun daha sonra altta yer alan gözlere doğru ilerlemesi sağlanır. Sıyırma mekanizması aynı zamanda çamurun topaklaşmasını önleyerek; kurutma ve yanma işleminin verimini arttırır.

Fırının üst bölmeleri nemli çamurun kurutulduğu alan olup; nemin büyük kısmının burada buharlaşması sağlanır. En yüksek sıcaklığın ve tamamen yanmanın gerçekleştiği kısım ise ortadaki ocak kısmıdır. Bu bölmelerde çamurun içinde bulunan organik maddeler 700-900°C'de yakılır. Alt bölmelerde ise, kül ve cürufun silolara boşaltılmadan önce soğutulma işlemi gerçekleşir [45].

Bu yöntemde susuzlaştırılmış çamur keki tamamen inert bir küle dönüşür. Çok hücreli yakma fırını %50 fazla hava ile işletilir. Etkili bir yanmanın gerçekleşebilmesi için beslenen çamurun katı madde içeriği en az %15 olmalıdır. Islak çamurun ortalama yükleme hızları etkili ocak alanı başına yaklaşık 40 kg/m^2.st'dir. Bu değer 25-75 kg/m^2.st arasında değişir. Ayrıca oluşan küllerin uzaklaştırılması amacıyla da yardımcı prosesler tasarlanmaktadır. Hava kirliliğinin önlenebilmesi açısından ise oluşan egzoz gazları ıslak veya kuru yıkayıcılar ile giderilmektedir. Son yıllarda, ABD'de ilgili yönetmeliklerde yapılan değişiklikler, 2011 yılı itibariyle mevcut kurulu katlı-ocaklı fırınların işletilmeleri sırasında hava kirliliği kontrolüne ait sınır değerlere göre yeniden düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

9.9.2. Döner Fırın

Döner fırınlar (veya tambur fırınlar) çeşitli sanayi alanların kullanılmakta, seri olarak üretilmektedir. Döner fırınlar çoğunlukla çimento klinkeri ve claydite kalsinasyonu ve arıtma çamuru - kentsel katı atık karışımını yakmak için kullanılır.

Şekil 9.11'de döner fırınlı bir çamur yakma sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Döner fırın (tambur), 2-4°'lik bir eğimle, alt taraftaki dış fırına doğru yerleştirilir. Fırın silindir şeklindedir, refrakter tuğlalarla kaplanmış ve gaz-sıvı yakıt brülörleri ile donatılmıştır. Fırın rulmanlar üzerinde dönmektedir, bu da tamburun tamirini ve gerekirse kaplamanın yenilenmesini kolaylaştırmaktadır. Susuzlaştırılmış çamur (kentsel katı atıklarla birlikte yakılıyorsa ikisi beraber) tamburun üst kısmından beslenir.

1- Dış fırın, 2- Döner ocak, 3- Pervane kanadı, 4- Spiral besleme kanadı, 5- Son yakma odası, 6- Besleme vidası, 7- Bant konveyör, 8- Çamur yükleme silosu, 9- Gaz yıkayıcı, 10- Fan, 11- Baca, 12- Kül tankı, 13- Sulu kül pompası, 14- Pnömatik taşıyıcı fanı, 15- Kül boşaltım silosu, 16- Siklon boşaltım cihazı, 17- Hava fanı, 18- Hava soğutucu, 19- Besleme kapağı, 20- Çekme fanı, 21- Gaz kontrol birimi, 22- Gaz borusu, 23- Su borusu, 24- Kül borusu, 25- Atıksu borusu, 26- Hava borusu

Şekil 9.11. Döner ocaklı yakma sisteminin akış şeması

Çamur kurutma alanı boyunca ilerlerken kurur, yakma alanında yanar ve ısı açığa çıkar. Sıcak cüruf/kül bir açıklıktan dış fırın bölmesine dökülür ve akabinde hava ile soğutma ünitesine girer. Buradan pnömatik konveyörlerle silolara taşınır ve kül depolama alanına dökülür. Kül bazen çamurun susuzlaştırılmasında şartlandırıcı olarak kullanılır.

Cürufu/külü 100°C'ye soğuttuktan sonra, sıcak hava yanma işleminde kullanılmak üzere fırına geri gönderilir. Küçük toz parçacıkları ve kurutma alanında açığa çıkan uçucu organik maddeler baca gazları ile dışarı taşınır. Gerekirse, organik maddeler yükleme odasının özel bir bölümünde tekrar yakılır ve koku giderimi yapılabilir. Kurutma alanında, baca gazları 200-

220°C sıcaklığındadır ve çamurun nem oranı %65-85'ten %30-40'a düşer. Uzunluğu genellikle 8-12 m'yi geçmeyen yakma alanında, sıcaklık 900-1000°C'ye ulaşır.

Döner fırınların üstünlükleri; düşük ısı ve baca gazı partikül emisyonları, yüksek kül ve nem içeriğine sahip çamurların işlenebilmesi, yakma sisteminin döner tambur bölümünün açık havada (fırın ve yükleme odaları genellikle bina içinde bulunur) kurulabilmesidir. Zayıflıkları ise boyutlarının çok büyük olması, oldukça ağır olmaları, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve işletimlerinin göreceli olarak karmaşık olmasıdır

9.9.3. Akışkan Yataklı Fırınlar

Yaygın olarak kullanılan diğer bir yakma fırını ise akışkan yataklı fırınlardır. 2011 yılı itibariyle, ABD'de kurulan yakma tesislerinin yaklaşık %30'u akışkan yatak teknolojisi ile işletilmektedir. Hali hazırda kurulmakta olan tüm yeni tam-ölçekli tesislerde de akışkan yataklı fırınlar kullanılmaktadır.

Bu fırınlar dikey, silindirik, çelikten bir kabuk içerisinde bulunan yüksek ısılı kum yatağının akışkan hale getirilmesiyle askıda yanmanın gerçekleştirildiği yakma fırınlarıdır. Bu fırınların çapları 2,7-9,1 m arasında değişmektedir. Hareketsiz haldeki kum yatağının derinliği yaklaşık 0,8 m'dir. Bu kum yatağının askıda hale getirilmesi amacıyla yatak içerisine 20-35 kN/m^2 basınçlı hava enjekte edilir. Çamur beslemesi yapılmadan önce kum yatağının da olması beklenen minimum sıcaklık yaklaşık 700°C'dir. Bu sebeple kum yatağında kontrol altında tutulması gereken sıcaklık aralığı 760-820°C'dir. Bu sıcaklık aralığında çamurun su içeriğinin buharlaşması ve katı maddelerinin yanması hızlı bir şekilde gerçekleşir. Yanma gazları ve kül fırının tepesinden atılarak uzaklaştırılır. Yanma gazları ve yüklenen küller normalde Venturi yıkayıcılar ile yıkanarak giderilmektedir.

Yakma ile çamurlarda hacim azaltılmasının en önemli sorunu oluşan hava kirletici emisyonlarıdır. Yakma ile meydana gelen hava kirleticileri iki kategoriye ayrılmaktadır; koku ve yanma emisyonları. K oku genellikle insan psikolojisi üzerinde önemli etkide bulunmaktadır. Yanma emisyonları ise uygulanan termal teknolojiye, kullanılan yardımcı yakıtın cinsine ve beslenen çamuru tipine göre değişmektedir. Özel öneme sahip yanma kaynaklı hava kirletici emisyonları; partiküler maddeler, azot oksitler, asit gazları, hidrokarbonlar ve ağır metaller (cıva, berilyum, vb.) gibi özel tehlikeli bileşiklerdir.

9.10. Çamurların Arazi Uygulamaları

Evsel atıksuların arıtımı sırasında arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamurlar, gerekli arıtma aşamalarından geçtikten sonra genellikle biyokatı olarak adlandırılırlar. Tüm dünyada en önemli çevresel problemlerden birisi, evsel atıksu arıtma çamurlarının güvenli bertarafıdır. Bu alternatiflerden en yaygın olarak uygulananlar ise 'Düzenli Depolama' ve 'Arazi Uygulaması'dır [49].

Atıksu arıtma tesislerinde yan ürün olarak ortaya çıkan çamurlar araziye serilerek bertaraf edilebilmektedir. Ancak, çamurların gübre ve toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilmeleri için, toksik maddeler içermemeleri gerekmektedir.

Evsel çamurların ekin tarlalarında uygulanması, bitkilerin büyümesi için gerekli besin maddelerini içerir ve bu sayede bu çamurların düzenli depolama alanlarında gömülerek veya yakılarak nihai bertarafını da sınırlandırarak; çevresel ve ekonomik anlamda avantaj sağlar. Ancak, evsel arıtma çamurları araziye serilmeden önce; gerek toprağın ve evsel çamurun gerekse yetiştirilecek bitki türlerinin özelliklerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Çamurun karakteri, evsel atıksuyun kalitesine ve arıtıldığı prosesin tipine göre farklılık göstermektedir. Evsel çamurun kimyasal kompozisyonu, bu çamurun tarımsal alana

uygulama hızlarının önceden tahmini için önemlidir. Bu sayede, yeraltı suyunun kontaminasyonu, koku oluşumu vb. istenmeyen durumların ortaya çıkma riski azalır [49].

Farklı arıtma prosesleri ile arıtılan evsel atıksu arıtma çamurlarının heterojen yapısı ve mevsimsel bazda değişkenlik göstermesi sebebiyle, çamurların araziye serilmeden önce mutlaka kimyasal açıdan analizlerinin yapılması gerekmektedir. Genellikle, evsel atıksu arıtma çamurları; organik bileşikler, makro-nütrientler (besin elementleri), geniş aralıkta mikro-nütrientler, ikinci derece iz maddeleri, organik mikro-kirleticiler ve mikroorganizmalardan oluşmaktadır [6].

Çamurun zengin organik ve inorganik nutrient içerikleri, bitkiler için gerekli gübre kaynağı olabilir. Ancak, potansiyel toksik metallerin bulunabilmeleri sebebiyle çamurun bu yararlı kullanım özelliğini sınırlandırmaktadır. Çamurun serilmesiyle, toprağın fiziko-kimyasal ve biyolojik özellikleri değişmektedir. Yeterli/uygun şartlarda çamur ile muamele görmüş toprakta gözlenen mahsul verimi genellikle kaliteli bir gübreden daha fazladır.

Evsel atıksu arıtma çamurlarının ihtiva ettiği makro-nütrientler, bitkiler için iyi bir besin kaynağıdır ve organik bileşikler ise toprağın şartlandırılmasında çok faydalıdır. Ancak, kentsel atıksuların, arıtma tesislerine taşındığı kanalizasyon sistemlerinde çok nadir olarak sadece evsel nitelikte atıksular taşınmaktadır. Bunun yanında, endüstriyel çıkış suları ve asfalt ve yollardan gelen yağış suları da kanalizasyon sistemlerine sık sık deşarj edilmektedir. Bu sebeple, arıtma çamurları organik maddelerin yanında birçok toksik maddeyi de içerebilmektedir. Toksik maddeler olarak; deterjanlar, çeşitli tuzlar, pestisitler ve hormon bozucu maddeler yer almaktadır [49].

Evsel atıksu arıtma çamurlarının gübre değeri çok uzun zamandır bilinmektedir; ancak fitotoksik elementlerden kaynaklanan problemlerin tanımlanması nispeten yenidir. Çünkü bu tarz potansiyel olarak toksik elementlerin yüksek konsantrasyonları sebebiyle, tarımsal amaçlı kullanılan toprağa çamurların serilmesi ile uzun süreli uygulamalarda toprakta birikim meydana gelebilmektedir [6]. Zehirli maddelerin birikimi; toprağın üst katmanında ağır metallerin yüksek oranda kalıcı olmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple, artan oranlarda besin zincirine geçerek; insan sağlığı için ciddi risk oluşturmaktadır. Bunun dışında, toprağın enzimatik aktviteleri de çamurda bulunan ağır metaller tarafından dolaylı olarak etkilenebilmektedir. Enzimatik aktiviteler, toprağın veriminin belirlenmesinde yararlanılan göstergelerdir ve mikroorganizmalar ile bitkiler enzimleri sentezleyerek; hem topraktaki mikroorganizmalar için hem de bitkiler için faydalı bileşiklerin üretilmesinde önemli reaksiyonların biyokatalizörü gibi davranır [50].

Yeraltı suları ve yüzeysel suların kontaminasyonu, patojenler ve koku oluşumu da evsel atıksu arıtma çamurlarının arazi uygulamasıyla nihai bertarafında karşılaşılabilecek potansiyel problemler arasında yer almaktadır [51]. Evsel atıksu arıtma çamurlarının içerisinde bulunan bazı patojenler, arazi uygulamasını takiben uzun süre canlı kalabilir. Yine evsel atıksu arıtma çamurlarında bulunan küçük boyuttaki virüsler ve diğer patojenler, öldürülmedikleri takdirde, yeraltı sularına sızarak kontaminasyona sebep olabilmektedir. Çamurdaki organik kirleticilerin bitkiler tarafından tutulması ise düşük seviyede olup; sağlık üzerindeki olumsuz etkileri ihmal edilebilir. Bu sebeple, evsel atıksu arıtma çamurlarının tarımsal gübre amacıyla toprağa uygulanmasında esas sorunun ağır metallerden kaynaklanabilecek çevresel riskler olduğu söylenebilir. Çamurun özellikle fazla miktarda araziye uygulanması ile ağır metallerin biyolojik olarak hazır bulunurluğu (bioavailability) arttığı ancak düşük dozlarda çamurun ağır metal konsantrasyonlarında önemli oranda bir artışa sebep olmadığı rapor edilmektedir. Sebzeler, tahıllar, çimen ve ağaçların da içinde bulunduğu çeşitli bitkinin üretimin, evsel çamurun toprağa serilmesiyle arttığı belirtilmektedir. Çamurun kullanılması ile aynı zamanda daha hızlı büyüyen ve daha büyük biyokütle üretimine sahip daha dirençli bitkiler elde edilebilmektedir. Ancak, bu

bitkilerin yetiştirilme süresinin kısaltılması probleme neden olabilmektedir. Çünkü yüksek dozlarda evsel arıtma çamurunun araziye serilmesi ile büyüyen mahsullerin, daha düşük dozda evsel çamurun araziye serilmesi sonucunda ya da hiç çamur serilmeyen toprakta büyüyen mahsullere kıyasla zehirli konsantrasyonlarda ağır metal içerdikleri rapor edilmiştir. Bu sebeple, bu ürünlerin tüketilmesi insanlar için sağlık riskleri taşımaktadır [49].

Evsel atıksu arıtma çamurlarının araziye serilmesi ile gözlenen olumlu etkiler; porozite (gözeneklilik), hacim ağırlığı, kümelenme stabilitesi ve su tutma kapasitesi gibi toprak özelliklerinin iyileşmesidir. Evsel çamurun organik içeriği oldukça yüksektir ve aynı zamanda yüksek konsantrasyonlarda N , P , Ca ve Mg ihtiva eder, ancak potasyum bu çamurda eksiktir. Çamurun pH'ı nötr değerden bir miktar alkali değerlere doğrudur. Evsel atıksu arıtma çamurları sebebiyle ağır metallerin ortama salınması; toprağın pH'ından, katyon değişim kapasitesinden, organik maddeden ve diğer spesifik metallerin varlığından ve mobilitesinden (hareketliliğinden) önemli ölçüde etkilenir [49].

Sonuç olarak, uzun süreli uygulamaları sonucunda çamur kaynaklı ağır metallerin ortamda artarak gözlenmeleri ile bu çamurların aralıklı olarak araziye serilmeleri durumunda ağır metal profilinin ne şekilde değişeceğinin araştırılması için ileri analizlerin yapılması iyi bir yaklaşımdır. Organik madde ile birlikte, kireçleme vb. farklı maddelerin birlikte uygulandığı çevresel anlamda stratejilerin olasılıkları da, evsel çamurların arazi uygulaması sonucunda ortaya çıkabilecek potansiyel olumsuz etkilerin en aza indirilmesi için, araştırılmalıdır.

Araziye Uygulanacak Arıtma Çamuru Miktarı ve Gerekli Arazi İhtiyacı

Araziye uygulanacak arıtma çamuru miktarının hesaplanmasında, arıtma çamurlarının kirletici yükü esas alınır. Bunun için Denklem (9.7) kullanılır;

$$L_s = L_c/(C\ F) \tag{9.7}$$

Burada;

L_s :Yıllık uygulanabilecek maksimum arıtma çamuru miktarı, ton/ha.yıl
L_c :Yıllık uygulanabilecek maksimum kirletici miktarı, gr/ha.yıl
C :Arıtma çamurundaki kirletici konsantrasyonu, mg/kg
F :Birim dönüşüm faktörü

Arazi İhtiyacının belirlenmesinde öncelikle araziye uygulanacak arıtma çamuru miktarının bilinmesi gereklidir. Arazi ihtiyacı içi (9.8) kullanılır;

$$A = B/L_s \tag{9.8}$$

Burada;

A :Gerekli arazi ihtiyacı, da
B :Üretilen arıtma çamuru miktarı, ton /yıl (kuru ağırlık)
L_s :Tasarımda

uygulanabilecek yıllık maksimum arıtma çamuru miktarı, ton/ha.yıl

Ülkemizde arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı kullanımı yaklaşık %5-10 düzeyinde olup; bu aralık AB ortalamasına (~%50) kıyasla çok düşüktür. Arıtma çamurlarının tarımda kullanım oranının 2022 yılında yaklaşık 2 milyon ton çamur seviyesine çıkacağı tahmin edilmektedir. Çünkü ülkemizin coğrafi, iklimsel ve arazi kullanım durumu dikkate alınarak, özellikle nüfusu 100.000 kişiden daha az olan yerleşimler için stabilize olmuş arıtma çamurlarının, ilgili mevzuata uygun olarak, doğrudan araziye uygulanmasının uygun olduğu belirtilmektedir. Diğer taraftan, nüfusu 500.000 kişiden daha fazla olan yerleşimler için doğrudan veya organik

katı atıklarla birlikte havasız çürütmeyi takiben, mekanik susuzlaştırma ve kurutma uygulanarak hijyenizasyon sağlanmalıdır. Daha sonra, arıtma çamurları düzenli depolama alanlarında günlük örtü veya ilgili yönetmelikler çerçevesinde toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilir. Stabilize olmamış veya kısmen stabilize olmuş (>2000 kkal/kg KM ısıl değerli) kentsel AAT çamurları, mekanik susuzlaştırmayı takiben lisanslı çimento fabrikalarında (<60 km taşıma mesafesinde) yakılabilir veya bölgesel atık yakma tesislerinde diğer atıklarla birlikte yakılarak enerji geri kazanımı da mümkündür. Çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmaları durumunda, arıtma çamurlarının önce termal veya solar kurutma ile katı madde oranlarında önemli oranda artış (≥90 KM) önerilmektedir. Katı madde oranı %35'ten daha büyük olan çamur keklerinin stabilize olmamaları durumunda, organik katı atıklarla birlikte veya ayrı olarak kompostlaştırılmaları da uygun bertaraf alternatifleri arasındadır. Kompostlaştırma ile stabilize olan arıtma çamurları daha sonra düzenli depolama alanlarında günlük örtü veya toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilir [3].

9.11. AB Ülkeleri ve Türkiye'de Kentsel AAT Çamurlarının Yönetimine Bakış

9.11.1. AB'de Çamur Yönetim Stratejileri

Son yıllarda, kentsel AAT çamuru bertarafı konusunda büyük gelişmeler yaşanmıştır. *AB Kentsel Atıksu Direktifi*'nin (91/271/EEC) yürürlüğe girdiği 1998 yılı öncesinde, kentsel AAT çamurları genellikle denize boşaltılmış veya doğrudan tarım arazilerinde gübre olarak kullanılmıştır. Bu tarihten (1998) itibaren ise, AB müktesebatı (Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi) deniz ve kıyı sularını korumak amacıyla, kentsel AAT çamurlarının denize boşaltımını tümüyle yasaklamış, ayrıca düzenli depolamaya gönderilebilecek çamur miktarını da kademeli olarak kısıtlamıştır. Ancak mevcut durumda dahi AB'de oluşan çamurun % 35-41'inin halen araziye uygulandığı tahmin edilmektedir. Buna göre AB'de, 2005 yılı itibariyle arıtılmış çamurun düzenli depolanması %17, tarımda kullanımı %41, yakılması %19, kompostlaştırılması %12, ormancılık, arazi ıslahı vb. diğer alanlarda kullanımı ise %11 mertebelerinde seyretmektedir [52]. Son dönemde çamur yönetimi alanında, doğrudan yakma, diğer malzemelerle birlikte yakma ve ıslak oksidasyon gibi enerji geri kazanım seçenekleri giderek daha cazip hale gelmektedir.

9.11.1.1. Araziye (toprağa) Uygulama

Çamurun arazide bertarafı ve faydalı kullanımını etkileyen başlıca özellikleri, organik içeriği (uçucu katı olarak ölçülür), besi maddeleri, patojenler, metaller ve toksik organiklerdir. Çamurun araziye uygulanması durumunda, gübre özelliği (azot, fosfor ve potasyum içeriği) önem kazanır. Ticari kimyasal gübre ile çamurun karşılaştırması Tablo 9.21'de verilmektedir. Araziye verilen çamur, bitki büyümesi için gereken besi maddelerini karşılar. Bazı uygulamalarda, çamurun fosfor ve potasyum içeriği bitki ihtiyacını karşılayamayacak kadar az olabilir. Çamurdaki iz elementler, inorganik kimyasal elementler olup bitki ve hayvanlar için gerekli veya zararlı olabilir. Arıtma çamurlarının tipik ağır metal içerikleri ise Tablo 9.22'de verilmektedir. Çamurun arazide kullanım miktarı, yapısındaki ağır metal konsantrasyonuna bağlıdır.

Tablo 9.21. Ticari gübre ve çamurdaki besi maddesi seviyelerinin kıyaslanması [2]

	Besi maddesi %		
	Azot	***Fosfor***	***Potasyum***
Tarımda kullanılan gübre1	*5*	*10*	*10*
Stabilize aktif çamur tipik değeri (KM'in %'si olarak)	*3,3*	*2,3*	*0,3*

(1) Besi maddesi konsantrasyonu toprak ve bitki özelliğine göre değişir.

Tablo 9.22. Kentsel atıksu arıtma tesisi çamurlarındaki metal içerikleri [2]

Metal	***mg/kg KM Aralık***
Arsenik	*1,1-230*
Kadmiyum	*1-3.410*
Krom	*10-99.000*
Kobalt	*11,3-2.490*
Bakır	*84-17.000*
Demir	*1,000-154.000*
Kurşun	*13-26.000*
Manganez	*32-9.870*
Cıva	*0,6-56*
Molibden	*0.1-214*
Nikel	*2-5.300*
Selenyum	*1,7-17.2*
Kalay	*2,6-329*
Çinko	*101-49.000*

9.11.1.2. Çamurun Ayrı Yakılması

Yakma (termal bertaraf), özellikle AB15 (2004 yılı öncesi üyeler), ABD ve Japonya gibi zengin ülkelerde giderek en yaygın çamur bertaraf yöntemi olma yolundadır. Biyobozunur atıkların Düzenli Depolama Alanları'na kabulü ile ilgili kısıtlar, kentsel katı atıklarla birlikte arıtma çamurlarının da termal bertarafını hızla arttırmaktadır. Atık/çamur yakma teknolojisi, gerek proses tekniği gerekse enerji verimliliği ve az alan ihtiyacı gibi üstün yanları dolayısıyla son yıllarda büyük gelişme göstermiştir. Mod0ern akışkan yatak teknolojisi hem yatırım hem de işletme maliyeti bakımından, geleneksel çok gözlü (kademeli) yakma sistemlerine göre daha ekonomik hale gelmiştir. Arıtma çamurlarının yakılmasının üstün yönleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çamur hacminde çok büyük azalma (tesise kabul edilen %25~30 KM'lik kek hacminde yakma sonrası ~%90 oranında azalma) sağlanır.
- Çamur içindeki toksik bileşikler termal parçalanma sonucu zararsız hale getirilir.
- Stabilize olmamış AAT çamuru kekinin ısıl değeri linyit kömürümünkine yakındır (karışık çamurun tipik ısıl değeri ~20 MJ/kg KM (4780 kkal/kg KM) olup yakma ile çamurdaki bu enerji geri kazanılır).
- Koku oluşumu en aza indirilir (özellikle termal kurutma ve biyokurutma sürecinde oluşan yoğun kokunun ilave sistemlerle ayrıca giderimine gerek kalmaz.

Termal bertaraf sonrası atık (çamur) hacminde %90-95 oranında azalma sağlansa da kütlesel azalma %70-75 oranındadır. Dolayısıyla yakma sonrası yakılan çamurun ton KM'si başına ~250-300 kg kül açığa çıkar. AB27 ülkelerinde mevcut durumda uygulanan çamur yönetim seçeneklerinin durumu Şekil 2'de verilmiştir [52].

Şekil 9.12. AB27 ülkelerinde 2005 yılı itibariyle uygulanan çamur bertaraf seçenekleri [52]

Orta vadede (2015-2025 dönemi) AB ülkeleri genelinde araziye uygulama ve düzenli depolama seçeneklerinin yerini giderek yakmaya bırakmaları beklenmektedir.

Arıtma çamurlarının katı atık yakma tesislerinde kentsel atıklarla birlikte (ağırlıkça ~%10-15 oranında ≥%50 KM'li kurutulmuş çamur kekleri halinde) yakılması da, yaygın olmamakla birlikte, bazı özel durumlarda uygulanabilecek bir diğer seçenektir.

9.11.1.3. Çamurun Çimento Fırınlarında (Ek Yakıt Olarak) Yakılması

Çimento üretiminde kullanılan geleneksel yakıtlar doğalgaz, petrol veya kömür olup atık yağlar, plastik maddeler, atıktan üretilmiş yakıt (ATY), oto parçaları, atık lastikler ve AAT çamurları gibi ısıl değeri nispeten yüksek muhtelif malzemelerden de ek yakıt olarak yararlanılabilmektedir. Tablo 9.23'te, çimento sanayinde kullanılan alternatif yakıtlar üç sınıf halinde verilmektedir.

Tablo 9.23. Çimento endüstrisi için alternatif yakıt seçenekleri

Sıvı atıklar	*Katran, kimyasal atıklar, distilasyon kalıntıları, atık solventler, kullanılmış yağlar, vaks/parafin süspansiyonları, petrokimya atıkları, asfalt karışımları, boya artıkları, yağ çamurları*
Katı atıklar	*Pet şişeler, atık kağıtlar, kauçuk artıkları, kağıt hamuru çamuru, kullanılmış araba lastikleri, pil, akü ve bataryalar, plastik artıklar, tahta atıklar, kentsel katı atıklar, pirinç kabukları, fındık kabukları, atıktan türetilmiş yakıtlar (ATY), yağlı/petrollü toprak, arıtma çamurları*
Gaz atıklar	*Katı atık düzenli depolama sahasında oluşan depo gazı, piroliz sonucu oluşan gazlar*

Temel bir kural olarak, çimento fırınına maksimum arıtma çamuru besleme oranı, çimento fabrikasının klinker üretim kapasitesinin %5'ini geçmemelidir. Örneğin, 2.000 ton/gün kapasiteli bir çimento fırını için, en fazla 100 ton/gün kuru çamur beslenmesi tavsiye edilir [53]. Söz konusu çamur/kömür oranı kısıtlaması, çamur içeriğindeki ağır metal ve tuz gibi çeşitli zararlı malzemelerin yüksek miktarda salımını önlemek açısından önem arz eder. Bu itibarla emisyonların baca gazındaki konsantrasyonları, ilgili yasal düzenlemelere ve standartlara uygun olmalıdır.

Sanayileşmiş ülkelerdeki tesislerde, tipik bir kuru prosesli Portland Çimentosu Fabrikasında birincil enerji tüketiminin %75'i fosil yakıt tüketimi ve %25'i ise elektrik tüketiminden oluşur. Çimento üretimi sürecinde birincil (ön) prosesler, yakıt enerjisinin %99'unu tüketerek en fazla enerji gerektiren (enerji yoğun) adım olarak öne çıkar. Elektrik enerjisinin ise %33'ü hammadde işlenmesi, % 38'i de klinkerde kırma ve öğütme ekipmanlarını çalıştırmak için kullanılır.

Arıtma çamurlarının yakılması neticesinde ortaya çıkan kül, düzenli depolamada bertaraf edilebildiği gibi, yapı malzemelerinin çeşitli özelliklerinin geliştirilmesi için inşaat sektöründe

de kullanılabilir. Söz konusu külden, tuğla üretiminde ve beton harcında ince agrega olarak faydalanılabilmektedir.

9.11.2. Türkiye'de Çamur Yönetim Stratejileri

Arıtma çamurlarının yönetimi ile ilgili olarak Türkiye'de yapılan planlama çalışmaları aşağıda açıklanmıştır.

Türkiye'de arıtma çamurlarının tarımda kullanım oranı yaklaşık %5-10 düzeyinde olup, bu şekilde bertaraf edilen çamur miktarı 50.000-100.000 ton/yıl civarındadır. AB Komisyonu'nun Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi'nin uygulanmasına ilişkin 1999 tarihli raporunda yer alan verilere göre bu değer AB üyelerine kıyasla düşüktür. Rapora göre, 1998'de tarımda arıtma çamuru kullanım oranı %5 (Yunanistan) ile %65 (Fransa) arasında değişirken, AB ortalaması yaklaşık %50 mertebesindedir. AB27 ülkelerinde 2005 yılı itibariyle arıtma çamurlarının yaklaşık %41'i araziye uygulanmaktadır [52].

Türkiye için ise Yüksek Maliyetli Çevre Yatırım Planı'na göre, tarımda kullanılan arıtma çamuru miktarının bugünkü %5-10 seviyesinden gelecekte %30-40 seviyesine çıkacağı tahmin edilmektedir [54]. Bu değer 2022'de yıllık yaklaşık 2 milyon ton çamura karşılık gelmektedir. Arıtma çamurunun tarımda kullanılmasının şu şekilde gerçekleşmesi beklenmektedir:

- Çamur stabilizasyon ve susuzlaştırma sonrası, atıksu arıtma tesislerinde depolanacaktır. Depolama maliyetleri AB Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi uyarınca AAT'lerin kurulum ve işletme maliyetlerine dahildir.
- Çiftçiler ve diğer kullanıcılar, tarlalara yaymak üzere tesisten (çamur depolama) çamuru alacaklardır. Bu sebeple tesis sahiplerine çamur uzaklaştırma için yeni bir maliyet getirilmemektedir [54].

Arıtma çamurunun düzenli depolanması seçeneği, sadece kısa vadeli bir seçenek olarak düşünülmektedir. Bunun temel sebebi, AB düzenli Depolama Direktifi'yle uyumlaştırılan 'ÇŞB Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'te belirtildiği üzere organik maddelerin düzenli depolanan atık içerisinden ayrılması konusundaki ihtiyaç ve kısıtlardır. Bu seçeneğin uygulanabileceği süre içerisinde alternatif arıtma metotları geliştirilmelidir. Düzenli depolamaya alternatif teşkil edecek teknolojiler şunlardır [55]:

- Çamurun arazi uygulamalarında kullanılması
- Arazi uygulamalarında veya katı atık formuna dönüştürmek üzere çamurun kurutulması
- Çamurun yakılması

Araziye (toprağa) uygulamada dikkate alınması gereken iki önemli parametre; patojen organizmalar ve ağır metal içerikleri yönünden stabilize çamurun kalitesi ile çamurun gübre değeri ve toprak yapısını iyileştirme özellikleri yönünden çiftçiler tarafından kabul görmesidir. Çamurun kurutulması ve/veya tek başına veya çimento fabrikalarında ek yakıt olarak yakılması uygulamalarında ise, atıksu çamurunun yüksek miktarlarda oluştuğu Büyükşehirlerde, ilgili Atıksu Yönetimi Master Planı Fizibilite Raporlarında öngörülen stratejiler doğrultusunda hareket edilmesi önerilmektedir.

Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nce hazırlatılan Havza Koruma Eylem Planlarında önerilen Çamur Yönetimi Yaklaşımı aşağıda özetlenmiştir [56].

Doğrudan Araziye (Toprağa) Uygulama: Türkiye'nin coğrafi, iklimsel ve arazi kullanım durumu dikkate alınarak, özellikle <100.000 nüfuslu yerleşimlerin stabilize olmuş arıtma çamurlarının, ilgili mevzuata uygun olarak, doğrudan araziye uygulanması düşünülmelidir. Bu yolla bertaraf edilebilecek çamur miktarının toplam çamur üretiminin %30-40'ı düzeyine ulaşması beklenmektedir.

Diğer Yöntemlerle Bertaraf: Büyükşehirlerde (N >500.000), doğrudan veya organik katı atıklarla birlikte anaerobik çürütme sonrası mekanik susuzlaştırma ve kurutma yoluyla hijyenizasyon sağlandıktan sonra, arıtma çamurları düzenli depolama alanlarında günlük örtü veya ilgili yönetmelikler çerçevesinde toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilir.

Stabilize olmamış kentsel AAT çamurları, mekanik susuzlaştırma sonrası lisanslı çimento fabrikalarında yakılabilir veya bölgesel atık yakma tesislerinde diğer atıklarla birlikte yakılıp enerji geri kazanılabilir. Yakma uygulanacaksa, gerekli ısıl değeri sağlamak üzere, çamur stabilizasyonu yapılmaması esastır. Genelde bir prensip olarak ~%60 KM ve ≥%65 UKM içeren biyokatıların ek yakıtsız (ototermal) olarak yakılabildiği kabul edilir.

Stabilize olmamış arıtma çamuru keklerinin (KM≥%35) organik katı atıklarla birlikte veya ayrı olarak kompostlaştırılarak stabilize edildikten sonra toprak şartlandırıcısı ya da düzenli depolama alanlarında günlük örtü olarak kullanımı da diğer bir seçenektir.

EN<100.000 AAT için kurutma yatakları veya çamur lagünlerinde depolama sonrası araziye uygulama da duruma göre başvurulabilecek sürdürülebilir bir yönetim seçeneğidir.

ÇŞB'nin müşteri kurum olduğu, TÜBİTAK-KAMAG 108G167 No'lu Kamu Ar-Ge projesi kapsamında İTÜ, ODTÜ, BÜ ve DEÜ Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden oluşan bir uzmanlar grubu tarafından yürütülen Evsel Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi Projesi Sonuç Raporu (2013)'nda planlanan bertaraf yöntemlerinin dağılımı aşağıdaki pasta diyagramda gösterilmiştir (Şekil 9.13). Şekilden de görüldüğü üzere, arıtma çamurları için en azından yakın ve orta vadede (2015~2030) ağırlıklı olarak (%74) uygulanması öngörülen yönetim seçeneği, bazı mega kentler (İstanbul, Ankara, Bursa, İzmir) hariç, lisanslı çimento fabrikalarında ek yakıt olarak değerlendirmedir.

Şekil 9.13. TÜBİTAK-KAMAG 108G167 No'lu Proje, 2013 No'lu projede önerilen arıtma çamurlarının bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılımı

9.11.3. Türkiye'de Büyükşehir AAT Çamurlarının Yönetimiyle ilgili Öneriler

Türkiye'deki 30 Büyükşehir, Belediye nüfusunun ~%70'ine karşı gelmektedir. Başta mega kent İstanbul olmak üzere bütün Büyükşehirlerimizde kentsel AAT çamurlarının yönetiminde ciddi sorunlar yaşanmaktadır. ÇŞB tarafından Türkiye genelinde özellikle Büyükşehir kentsel AAT çamurlarının bertarafı için önerilen öncelikli nihai bertaraf seçeneği termal veya solar/biyokurutma sonrası çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanımdır. Kentsel AAT çamurlarının diskli veya pedallı kurutucularda termal kurutma birim maliyeti, amortisman dahil 100~120 $/ton ürün (%90 KM) aralığında kalmaktadır. Bantlı kurutucularda bu bedel genelde ~%20-25 oranında daha düşüktür. Bu seçeneğin uygulanabilmesi için atık yakma lisanslı çimento fabrikalarına makul taşıma mesafesinde (genelde <60 km) ve ısıl değerin 2000 kkal/kg KM olması ile AAT çamuru miktarı ve inorganik kirletici içeriğinin (ağır metaller, özellikle Hg ve Cl), klinker ve baca gazı kalitesini, ilgili standartları zorlayacak düzeylerde etkilememesi

gerekmektedir. Çimento fabrikaları~%25-30 KM'li kek halindeki çamurların tesislerine kabulüne, ön kurutma sürecindeki koku ve toz sorunu dolayısıyla sıcak bakmamaktadırlar. Bu yüzden, bazı özel durumlar hariç, çimento fabrikalarında ancak ağırlıklı olarak termal kurutmayla ≥%90 KM'ye kurutulan >2000 kkal/kg KM ısıl değerli kısmen stabilize olmuş veya stabilize olmamış arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanımı mümkün olmaktadır.

Türkiye'de özellikle EN≥500.000 olan büyük ileri biyolojik AAT olan Büyükşehirler için, farklı proses ve çamur işleme (stabilizasyon, susuzlaştırma) prosesleri de dikkate alınarak, aşağıdaki 3 genel çamur/biyokatı yönetim şemasından birinin esas alınması önerilebilir:

- Aerobik arıtma (ön çökeltimsiz A^2O) sürecinde büyük ölçüde stabilize olmuş (θ_c ≥13 gün) biyokatılar için (Şekil 9.14)

Şekil 9.14. Aerobik Arıtma Sürecinde Büyük Ölçüde Stabilize Olmuş Biyokatılar için Yönetim Seçenekleri

- Aerobik arıtma (ön çökeltimli A^2O) sürecinde stabilize olmamış ($\theta_c \leq$ gün) ve ayrı Anaerobik/Aerobik Çürütme (stabilizasyon) uygulanmış biyokatılar için (Şekil 9.15)

Şekil 9.15. Aerobik Arıtma Sürecinde Büyük Ölçüde Stabilize Olmamış ayrıca Anaerobik Çürütme Uygulanmamış Biyokatılar için Yönetim Seçenekleri

- Aerobik arıtma (ön çökeltimsiz veya ön çökeltimli A^2O) sürecinde stabilize olmamış (Θ_c<13 gün) ve ayrı Anaerobik/Aerobik Çürütme (stabilizasyon) uygulanmamış biyokatılar için (Şekil 9.16)

Şekil 9.16. Aerobik Arıtma Sürecinde Büyük Ölçüde Stabilize Olmamış Biyokatılar için Yönetim Seçenekleri

İlgili akım şemalarından da görüldüğü üzere, tek başına veya kentsel katı atıklarla birlikte termal bertaraf (yakma) uygulanacaksa, ısıl değeri düşürmemek için ***çamur stabilizasyonu yapılmaması*** gerekmektedir. Kısmen stabilize edilmiş biyokatıların uzak (>60 km) mesafedeki Çimento Fırınlarında ek yakıt olarak kullanımı için genelde termal kurutma uygulanması, nakliye masraflarının azaltılması bakımından zorunlu olmaktadır.

Yakın civarda büyük mera, tarım ve/veya bozulmuş maden alanlarının bulunduğu durumlarda, stabilize edilmiş arıtma çamurlarının doğrudan (toprak içine) veya termal, solar veya biyo kurutma sonrası araziye uygulanması uygun bir seçenek olacaktır.

Türkiye'de, Büyükşehirler dışındaki yerleşimleri de kapsamak üzere, Atıksu Arıtma Tesisi çamurlarının bertarafında uygulanabilecek seçeneklerin toplu gösterimi, ilgili temel mevzuat ve işleme yöntemleri ile birlikte Şekil 9.17'de topluca özetlenmiştir.

Şekil 9.17. Arıtma Çamurları için Nihai Bertaraf Seçenekleri

Büyükşehirler dışındaki, yerleşimlerde Endüstriyel atıksularla kontamine olmamış, tehlikesiz atık niteliğindeki arıtma çamurlarının stabilize edildikten sonra; belirlenmiş alanlarda araziye uygulanması, kompostlaştırma veya termal kurutma sonrası park-bahçelerde, tarım alanlarında ya da bozulmuş alanların ıslahında kullanılmaları mümkündür.

Problemler.

Problem 9.2

Sabit (mineral) ve uçucu (organik) kısımlarının özgül ağırlıkları sırasıyla 2,4 ve 1,0 olan; içeriğinde %95 oranında su bulunan bir çamur numunesinin un özgül ağırlığını bulunuz? (Çamurda UKM oranının %70 olduğu kabul edilecektir).

Çözüm.

Verilenler:

$Sf = 2{,}4, Su\ içeriği = \%95\ [TKM = 1 - 0{,}95 = 0{,}05;\ TKM = \%5]$

$Sv = 1{,}0 UKM = \%70\ (0{,}70)$

Katı kısımların özgül ağırlığı (S_S):

$$\frac{1}{S_s} = \frac{UKM}{S_v} + \frac{(1 - UKM)}{S_f} = \frac{0{,}7}{1{,}0} + \frac{0{,}3}{2{,}4}$$

$S_s = 1{,}21$

Çamurun özgül ağırlığı ($S_ç$):

$$\frac{1}{S_ç} = \frac{Su}{S_v} + \frac{Katı}{S_s} = \frac{0{,}95}{1{,}0} + \frac{0{,}05}{1{,}21}$$

$S_ç = 1{,}009$

Problem 9.3

AKM = 300 mg/L , $PO4^{-3}$ = 40 mg/L ve 180 mg $CaCO_3$/L sertlik ihtiva eden bir atıksuya sönmüş kireçle fiziko-kimyasal çöktürme uygulanmaktadır. Arıtma sonunda sertlik 200 mg $CaCO_3$/L'ye yükselmekte ve kimyasal çamur olarak sadece $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ oluşmakta olup, fazla kireç $CaCO_3$ formunda kalmaktadır. Uygulanan kireç dozu 250 mg $Ca(OH)_2$/L'dir. Fosfatın tamamının $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ halinde giderildiğine ve AKM giderim verimi de %80 olduğuna göre oluşacak toplam çamur miktarını kg KM/m^3 olarak hesaplayınız. (Ca:40, P :31, O :16, H :1)

Çözüm.

$Ca_5(OH)(PO_4)_3$ çamuru:

$$\frac{Ca(OH)(PO_4)_3}{(PO_4)_3}\ (PO_4) = \frac{502}{285} * 40 = 70{,}5\ mg/L$$

Sertlik artışına yolaçan (çökelme reaksiyonuna girmeyen) kireç miktarı: 200 – 180 = 20 mg CaCO3/L

Bunun için harcanan Ca,

$$\frac{Ca}{(CaCO_3)} * 20 = \frac{40}{100} * 20 = 8\ mg/L$$

$Ca_5(OH)(PO_4)_3$'teki Ca miktarı,

$$\frac{5 - 40}{502} * 70{,}5 = 28{,}1\, mg/L$$

ilave edilen toplam Ca,

$$\frac{40}{Ca(OH)_2} * 250 = \frac{40}{74} * 250 = 135{,}1\ mg/L$$

$Çamurdaki\ Ca = 135{,}1 - (28{,}1 + 8) = 99\ mg/L$

Oluşan $CaCO_3$ çamuru:

$$\frac{100}{40} * 99 = 247{,}5\ mg/L$$

Çamur tipi	*Miktarı*
AKM	*0,90 x 300 = 270 mg/L*
$Ca_5(OH)(PO_4)_3$	*70,5 mg/L*
$CaCO_3$	*247,5 mg/L*
Toplam	*588 mg/L (gr/m^3)*

Problem 9.4

Evsel atıksuların arıtıldığı bir arıtma tesisinden kaynaklanan ön-çökeltim ve biyolojik çamurların işlenmesi ve arıtılması amacıyla aşağıdaki akım şemasında verilen kabullere göre ünitelerin tasarımlarını yapınız.

Çözüm.

Graviteli Yoğunlaştırıcı Tasarımı

Ön-çökeltim çamuru miktarı (M) = 4762 kg/gün

$\rho_{çamur} = 1{,}03$

Ön-çökeltim çamurunun katı madde (KM) yüzdesi = %3

$$Q_{ön-çökeltim\ ç.} = \frac{M}{\rho_{çamur} * \%KM * 1000} = \frac{4762}{1{,}03 * 0{,}03 * 1000} \cong 155\, m^3/gün$$

Katı madde yükleme hızı Tablo 9.7'den 140 kg/m^2.gün (ön-çökeltim çamurlarının graviteli yoğunlaştırılması için yükleme hızı aralığı olan 100 – 150 kg/m^2.gün) seçilirse;

G = 140 kg/m^2.gün için yoğunlaştırıcı alanı (A);

$$A = \frac{M}{G} = \frac{4762}{140} = 34\, m^2$$

$A = \frac{\pi D^2}{4}$ *eşitliğinden tank çapının (D) hesabına geçilmeden önce, hidrolik yükleme hızının ön-çökeltim çamurları için öngörülen 15,5 – 31 m^3/m^2.gün aralığında olup olmadığı kontrol edilmelidir. Buna göre;*

$$Hidrolik\ yükleme\ hızı = \frac{Q_{çamur}}{A} = \frac{155}{34} \cong 4{,}53\, m^3/m^2 gün$$

4,53 m^3/m^2.gün < 15,5 m^3/m^2.gün olduğuna göre uygun değildir.

Bu durumda septik koşullar ve istenmeyen koku problemleri ile karşılaşılmaktadır. Bu sebeple hidrolik yükleme hızı > 15,5 m^3/m^2.gün olacak şekilde bir değer seçilmelidir.

Hidrolik yükleme hızı = 16 m^3/m^2.gün için hesaplama yapılırsa;

$Q_{çamur} = 16 * 34 = 544\, m^3/gün$

olmalıdır.

Bu durumda 544 – 155 = 389 m^3/gün debili seyrelme suyu yoğunlaştırıcı tankına geri devrettirilerek yoğunlaştırıcı istenilen hidrolik yükleme hızında işletilmelidir.

$$D = \sqrt{\frac{4\,A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 34}{\pi}} = 6{,}6\, m$$

bulunur.

Yoğunlaşmış çamur debisinin hesabı için;

$\rho_{yoğun\ çamur} = 1{,}02$

Graviteli olarak yoğunlaştırılmış ön-çökeltim çamurunun katı madde (KM) yüzdesi = %6

$$Q_{yoğun\ çamur} = \frac{4762}{1{,}02 * 0{,}06 * 1000} \cong 78\, m^3/gün$$

$$Hacim\ azalması = \frac{155 - 78}{155} \cong \%49{,}5$$

Yüzdürmeli Yoğunlaştırıcı Tasarımı

Biyolojik çamur miktarı (P_x) = 2718 kg/gün

Biyolojik çamur debisinin hesabı için;

$\rho_{çamur} = 1{,}005$

Biyolojik çamurun katı madde (KM) yüzdesi = %1

$$Q_{biyo\ çamur} = \frac{2718}{1{,}005 * 0{,}01 * 1000} \cong 270\, m^3/gün$$

Katı madde yükleme hızı Tablo 9.8'den 90 kg/m^2.gün (çökelmiş aktif çamurların yüzdürmeli yoğunlaştırılması için yükleme hızı aralığı olan 2,4 – 4 kg/m^2.saat = 57,6 – 96 kg/m^2.gün) seçilirse;

$$A = \frac{2718}{90} \cong 30 m^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 30}{\pi}} \cong 6{,}2\, m$$

bulunur.

Yoğunlaşmış çamur debisinin hesabı için;

$\rho_{çamur} = 1{,}00$

Yüzdürmeli olarak yoğunlaştırılmış biyolojik çamurun katı madde (KM) yüzdesi = %4

Katı madde tutma oranı = %90 kabul edilirse;

$$Q_{yoğun\ çamur} = \frac{2718 * 0{,}9}{1{,}00 * 0{,}04 * 1000} \cong 61\, m^3/gün$$

$$Hacim\ azalması = \frac{270 - 61}{270} \cong \%77$$

Karıştırma Tankının Tasarımı

Graviteli yoğunlaştırıcıdan gelen yoğunlaştırılmış ön-çökeltim çamuru ve yüzdürmeli yoğunlaştırıcıdan gelen yoğunlaştırılmış biyolojik çamur dairesel planlı bir karıştırıcıda karıştırılacaktır.

Karıştırma tankı için yapılan kabuller:

Bekletme süresi (t_d) = 0,5 saat

Su yüksekliği (h_{su}) = 2 m

Karıştırma tankına gelen yoğunlaştırılmış çamur debileri

$$= 78 + 61 = 139\ m^3/gün = 5{,}8\ m^3/saat$$

Karıştırma tankı hacmi $(V) = Q * t_d = 5{,}8 * 0{,}5 \approx 2{,}9\ m^3$

$$A = \frac{V}{h_{su}} = \frac{2{,}9}{2} = 1{,}45m^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1{,}45}{\pi}} \cong 1{,}36m$$

Karıştırıcı için gerekli güç (P) hesabı için yapılan kabuller:

$G = 60\ sn^{-1}$

$\mu = 2{,}004 * 10^{-3}\ N.s/m^2$

$P = G^2\ \mu\ V = 60^2\ 2{,}004 * 10^{-3} * 2{,}9 \cong 21\ W$

%75 verimde çalışan bir motor için;

$$P = \frac{21}{0{,}75} \cong 28\ W$$

Anaerobik Çürütücü Tasarımı

Karıştırma tankında karıştırılmış karışık (ön-çökeltim + biyolojik) çamurun, mezofilik (35 ℃) sıcaklıkta işletilecek tam karışımlı yüksek hızlı bir havasız çürütücüde stabilizasyonu gerçekleştirilecektir. Çürütücüye beslenen karışık çamur debisi;

$Q_{çürütücü} = 139\ m^3/gün$

θ_c (çamur yaşı) = 12 gün seçilerek çürütücü hacmi hesaplanır;

$V_{çürütücü} = 12 * 139 = 1668\ m^3$

Su yüksekliği (h_{su}) > 7,5 m (konik kısım hariç) olmalıdır. Buna göre;

h_{su} = 7,6 m seçilirse

Çürütücü tankında yapılan gerekli yükseklik kabulleri:

Kum ve benzeri inorganik maddelerin birikimleri için	*= 1 m*
Köpük tabakası için	*= 0,6 m*
Yüzen kapak ve maksimum seviye için	*= 0,6 m*
Toplam yükseklik	*= 1 + 0,6 + 0,6 = 2,2 m*

$$\frac{7{,}6 * 2{,}2}{7{,}6} = \%71$$

$$Aktif\ çürütücü\ hacmi = \frac{1668}{0{,}71} \cong 2350\ m^3$$

$Çürütme\ tankı\ sayısı\ 2\ adet\ seçilirse;$

Çürütücü $hacmi: V_1 = V_2 = \frac{2350}{2} = 1175\ m^3$

1 adet çürütücünün yüzey alanı; $A_1 = \frac{V_1}{h_{su}} = \frac{1175}{7,6} \cong 155\ m^2$

1 adet çürütücünün çapı; $D = \sqrt{\frac{4 * 155}{\pi}} \cong 14\ m$

bulunur.

Bu durumda; 2 adet 14 m çapında 7,6 m kenar su yüksekliğine sahip tabanı 1 dikey 3 yatay olacak şekilde eğimli anaerobik çürütücü tasarımı yapılacaktır.

UKM yükleme hızı hesabında çürütücüye gelen karışık çamurun katı madde miktarının belirlenmesi ve karışık çamurun katı madde içeriğinin hesaplanması gerekir.

$$\%KM = \frac{\left(Q_{yoğ.ön-çökeltim\ ç.} * \%KM_{yoğ.ön-çökeltim\ ç.}\right) + \left(Q_{yoğ.biyo\ çökeltim\ ç.} * \%KM_{yoğ.biyo\ çökeltim\ ç.}\right)}{Q_{toplam}}$$

eşitliğinden; karışık çamurun katı madde içeriği hesaplanırsa;

$$\frac{78 * 0,06 + 61 * 0,04}{78 + 61} \cong 0,051\ (\%51)$$

Karışık çamurun içerisindeki katı madde miktarı ($Q_{karışım} = Q_{toplam}$);

$$M = Q_{karışım} * \rho_{çamur} * \%KM * 1000$$

$$M = 139 * 1,02 * 0,051 * 1000 = 7262\ kg\ TKM/gün$$

Karışık çamur için $\frac{UKM}{TKM} = 0,75$ *kabul edilirse;*

$$\boldsymbol{UKM = 7262 * 0,75 \approx 5450\ kg/gün}$$

$$Katı\ madde\ yükleme\ hızı = \frac{5450}{350} \cong 2,32\ kg\ UKM/m^3 gün$$

Katı madde yükleme hızı için Tablo 9.11'de öngörülen 1,6 - 4,8 kg UAKM/m^3.gün aralık için uygun olup olmadığı kontrol edilirse;

1,6 <2,32 <4,8 kg UAKM/m^3.gün olduğu için yükleme hızı uygundur.

Gaz üretimi

$$Çürütücüye\ beslenen\ karışık\ çamurun\ debisi\ (Q_{karışım}) = 139\ m^3/gün$$

$$Karışık\ çamurun\ katı\ madde\ konsantrasyonu = \frac{7262 * 1000}{139} = 52250\ g/m^3$$

Çürütücü tankında üretilecek biyogaz hesabı için yapılan kabuller:

Katı maddenin biyolojik olarak ayrışabilen kısmı: %65

Katı maddenin BOİ$_u$ eşdeğeri = 1,42 gr BOİ$_u$/gr UAKM

Mikroorganizma dönüşüm oranı (Y) = 0,05

Mikroorganizma içsel solunum hızı (k_d) = 0,03 gün^{-1}

Çürütücü için BOİ$_u$ giderme verimi = 0,80

Çamurda nihai BOİ (BOİ$_u$) $= 52250 * 0,65 * 1,42 = 48220\ mg/L = 48,22\ kg/m^3$

Çürütücüde günlük çamur üretimi (P_x);

$$P_x = \frac{Y}{1 + k_d \theta_x}(Q\ E\ S_0) = \frac{0,05}{1 + 0,03 * 12}(139 * 0,8 * 48,22) \cong 200\ kg/gün$$

Günlük üretilen metan gazı debisi

$V_{CH_4} = 0{,}35\big((Q\ E\ S_0) - (1{,}42\ P_x)\big)$

$V_{CH_4} = 0{,}35\big((139 * 0{,}8 * 48{,}22) - (1{,}42 * 200)\big) = 1780\ m^3/gün$

Çürütücüde üretilen toplam biyogazın %66 metan içerdiği kabul edilirse;

$Q_{toplam\ gaz} = \frac{1780}{0{,}66} = 2695\, m^3/gün$

Çürütülmüş çamur hacmi hesabı

UKM = 5450 kg/gün (çürütülmeden önceki değer)

%50 UKM giderimi gerçekleştiği kabul edilirse;

Giderilen UKM = 5450 x 0,5 = 2725 kg/gün

Çürümeden sonra kalan TKM = Uçucu olmayan TKM + Kalan UKM

$= (7262 - 5450) + (0{,}5 * 5450) = 4537\ kg/gün$

Çürütücüden çıkan katı madde miktarının hesabı için;

Çürütücüye gelen TKM = 7262 kg/gün

Karışık çamurun katı madde içeriği (%KM) = %5,1

Çürütücüye gelen TKM kütlesi = $\frac{7262}{0{,}051*1{,}02} \cong 139000\ kg/gün$

Biyogaza dönüşen katı madde miktarının hesaplanması:

Yapılan kabuller:

Havanın yoğunluğu = 1,162 kg/m^3

Çürümüş gaz yoğunluğunun havaya oranı = %86

Üretilen toplam çürütücü gazı miktarı = $2695 * 1{,}162 * 0{,}86 = 2693\ kg/gün$

Bu durumda çürütücüyü terk eden toplam kütle;

$139000 - 2693 = 136307$ *kg/gün olarak hesaplanır.*

Çürütücü duru fazındaki hesaplamalar:

Yapılan kabuller:

Duru fazdaki katı madde (KM) yükü = 5 kg/gün

Duru fazdaki katı madde konsantrasyonu = 4000 mg/L (%0,3 – 1,5 aralığından %0,4 kabulü)

Duru fazda katı madde yoğunluğu = 1,00

Çürümüş çamurda katı madde (KM) yüzdesi = %5

$$\frac{S}{0{,}004} + \frac{(4537 - S)}{0{,}05} = 136307$$

olmalı,

$S \approx 198\ kg/gün = 198000\ g/gün$

Duru faz debisi ($Q_{durufaz}$) = $\frac{198000}{0{,}004*10^6} \cong 50\ m^3/gün$

Çürümüş çamur miktarı = çürümeden sonra kalan TKM – duru fazla giden TKM

Çürümüş çamur miktarı = $4537 - 198 = 4340\ kg/gün$

Çürümüş çamur (biyokatı) hacmi = $V_{ÇÇ} = \frac{4340}{0{,}05*1{,}02*1000} \cong 85\ m^3/gün$

Çürümüş çamur (biyokatı) hacmi ayrıca şu şekilde de hesaplanabilir;

$Q_{karışım} - Q_{durufaz} = Q_{çürümüş\ çamur}$

Buna göre;

$139 - 50 = 89\ m^3/gün$

$85 \cong 89\ m^3/gün$

olarak hesaplanır.

Çürütücülerin ısıtma ihtiyaçlarının hesaplanmaları sırasında öncelikle çamurun ısıtılması için gerekli enerji hesaplanmalıdır. Daha sonra, tankların kapaklarından, yan duvarlarından ve taban alanlarından meydana gelecek ısı kayıplarının hesaplamaları gerekmektedir. Çürütücülerde meydana gelecek ısı kayıpları, toplam ısı ihtiyacının hesabında mutlaka göz önüne alınmalıdır. Ayrıca çürütücülerde üretilecek toplam biyogaz çürütücülerin ısıtma ihtiyaçlarının temininde de kullanılabilmektedir.

<u>Bant-filtre Pres Tasarımı</u>

Anaerobik çürütme tankından çıkan biyokatı hacmi = 85 m^3/gün = 85000 L/gün

Anaerobik çürütme tankından çıkan TKM yükü = 4340 kg/gün

Anaerobik çürütme tankından çıkan biyokatının katı madde (KM) yüzdesi = %5

Susuzlaştırma için yapılan kabuller:

Susuzlaştırılmış çamur kekindeki katı madde (KM) yüzdesi = %25

Süzüntü suyundaki katı madde (KM) yüzdesi = %0,09 = 900 mg/L

Yıkama suyu debisi = 90 L/m.dak (1 m belt genişliği için)

$\rho_{girişçamur} = 1{,}02$

$\rho_{kek} = 1{,}07$

$\rho_{süzüntü} = 1{,}01$

Normal işletme şartlarında bant-filtre presin haftada 5 gün ve günde 8 saat çalıştığı kabul edilerek; Tablo 9.16'dan karışık çamur için yükleme hızı 250 kg/m.saat (karışık çamur için öngörülen yükleme hızı 180 – 320 kg/m.saat aralığında) seçilirse,

a) Haftalık ortalama çamur üretim hızı:

$Islak\ biyokatılar = 85000 * 7 * 1{,}02 = 607000\ kg/hafta$

$Kuru\ katılar = 607000 * 0{,}05 = 30350\ kg/hafta$

b) Günlük ve saatlik kuru katı ihtiyaçları:

$Günlük = 30350/5 = 6070\ kg/gün$

$Saatlik = 6070/8 = 760\ kg/saat$

c) Bant-filtrenin boyutlandırması:

$Genişlik\ (w) = 760/250 = 3\ m$

Bu durumda (1+1) toplamda 2 adet 3 m genişliğinde Bant-filtre kullanılacaktır (1 adet yedek olacak şekilde düşünülmüştür).

d) Günlük katı madde dengesinin yazılması:

Beslenen çamurdaki katı madde = çamur kekindeki KM + süzüntüdeki KM

S: Çamur keki debisi (L/gün)

F : Süzüntü suyu debisi (L/gün)

olarak eşitlikte yerlerine konulursa;

$6070 = (S * 1{,}07 * 0{,}025) + (F * 1{,}01 * 0{,}00009)$

$$6070 = 0{,}2675 * S + 0{,}000909 * F \qquad \textit{(Eşitlik I)}$$

e) Debi denklemlerinin yazılması:

Çamur debisi + yıkama suyu debisi = süzüntü suyu debisi + kek debisi

$$\left(85000 * \frac{7}{5}\right) + (90 * 3 * 60 * 8) = F + S$$

$$119000 + 129600 = 248600 = F + S \qquad \textit{(Eşitlik II)}$$

$S = (248600 - F)$ *denklemi Eşitlik I 'de yerine konulursa;*

$$6070 = 0{,}2675 * [248600 - F] + 0{,}000909 * F$$

$$6070 = 66501 - 0{,}2675 * F + 0{,}000909 * F$$

$$F = 226{,}680\ L/gün$$

$$S = 248600 - 226{,}680 = 21{,}920\ L/gün$$

hesaplanır.

f) Katı tutma yüzdesi:

Katı tutma (%) = [(Beslenen kısımdaki katı–süzüntüdeki katı)/Beslenen kısımdaki katı]x100

$$Katı\ tutma\ (\%) = \frac{6070 - (226{,}680 * 1{,}01 * 0{,}0009)}{6070} * 100 = \%96{,}6$$

g) Pik besleme durumunda pik faktörü 2 seçilirse;

Islak katı madde (KM) miktarı = 170000 x 1,02 x 0,05 = 8670 kg/gün

Depolamadaki çamur miktarı ihmal edilirse, günlük işletme süresi (t) ihtiyacı:

$$t = \frac{8670\ kg/gün}{(250\ kg/m\ sa) * 3\ m} \cong 11{,}56\ sa$$

Bu süre pik işletme koşullarında yedekteki bant-filtre devreye sokularak sağlanabilmektedir.

Bant-filtre preste susuzlaştırılan çamur kekleri uygun bir nihai çamur uzaklaştırma alternatifi seçilerek uzaklaştırılmalıdır.

Problem 9.5

Nüfusu 67.000 kişi olan ve konvansiyonel aktif çamur sistemi içeren bir atıksu arıtma tesisinde ortaya çıkan karışık çamurlar havasız çürütme prosesi ile stabilize edilmektedir. Hacmi yaklaşık 53 m^3/gün olan stabil çamur çürütmeyi takiben bir santrifüj sistemi ile susuzlaştırılacaktır. Gerekli santrifüj kapasitesini ve miktarını hesaplayınız?

Çözüm.

Giriş çamur debisi Q_i ile gösterilirse;

$$Q_i = 53\ m^3/gün = 53/24 = 2{,}21\ m^3/saat$$

Saatlik pik faktörü 1,5 kabul edilerek susuzlaştırılması gereken maksimum çamur debisi (Q_{maks});

$$Q_{maks} = 1{,}5 * 53 = 79{,}5 \approx 80\ m^3/gün$$

Santrifüj ekipmanının seçiminde maksimum çamur debisi dikkate alınmalıdır ve son karar için imalatçı firmadan kapasite bilgileri temin edilir. Bu örnek için; maksimum sıvı çamur hacmi 80 m^3/gün olan çamurun susuzlaştırılabilmesi için işletme süresi 7 saat ve kapasitesi her bir santrifüj için 6 m^3/saat olan bir adet santrifüj ve bir adet de yedek olmak üzere toplamda 2 adet santrifüj tasarımı yapılmalıdır.

Buna göre, santrifüj sayısına göre ortalama çamur debisinde de işletme süresi hesaplanmalıdır;

$$İşletme\ süresi = \frac{53\ m^3/gün}{1 * 6\ m^3/sa} \approx 9\ sa/gün$$

AAT'de susuzlaştırılması gereken çamur üretiminin sürekli olması durumunda (24 saat/gün); santrifüjün işletmede olmadığı zamanlarda çamurun depolanabilmesi için bir çamur tutma tankına ihtiyaç duyulur. AAT'de bulunan havasız çürütücü eğer iki kademeli ise; ikinci kademede işletilen tank çamurun depolanabileceği tank görevini görebilir.

Problem 9.6

Nüfusu 100,000 kişi olan ve konvansiyonel aktif çamur sistemi içeren bir atıksu arıtma tesisinde ortaya çıkan karışık çamurlar havasız çürütme prosesi ile stabilize edilmektedir. Çürümüş çamur daha sonra sürekli olarak işletilecek bir santrifüj sistemi ile susuzlaştırılacaktır. Çamurun şartlandırılması için gerekli polimer miktarını hesaplayınız? (Bir günde kişi başına toplam katı madde üretimi (TS) 50 gram olarak kabul edilecektir)

Çözüm.

Şartlandırılması gereken çürümüş çamur yükü $M_ç$ ile gösterilirse;

$$M_ç = 100{,}000\ kişi * 50\ gr/kişi.gün = 5{,}000{,}000\ gr/gün = 5\ ton/gün$$

Tablo 9.24'ten anaerobik olarak çürütülmüş karışık çamurlar (ön-çökeltim çamuru + aktif çamur) için gerekli 2-5 kg/ton polimer aralığından 4 kg/ton seçilirse;

Bir günde gerekli polimer ihtiyacı M_{pol} ile gösterilirse;

$$M_{pol} = 4\ kg\ kuru\ polimer/ton\ TS * 5\ ton\ TS/gün = 20\ kg/gün\ (kuru\ polimer\ ihtiyacı)$$

Bu değer, polimer çözeltilerinin hazırlanması için kullanılan ekipmanların ve susuzlaştırma için kullanılacak sistemlerin besleme hatlarının boyutlandırılmasında kullanılacaktır.

Problem 9.7

Aşağıda akım şeması gösterilen bir susuzlaştırma birimine beslenen akımın katı madde oranı %4, deşarj edilen kekin katı madde oranı %20 ve süzüntüdeki (filtrat) katı madde konsantrasyonu ise 500 mg/L ise; bu sistemin katı madde tutma oranını (%R) hesaplayınız?

$Q_0 = Q_f + Q_k$

$Q_f = Q_0 - Q_k$

$Q_0\ C_0 = Q_k\ C_k + Q_f\ C_f$

$Q_0\ C_0 = Q_k\ C_k + C_f\ (Q_0 - Q_k)$

$Q_0\ C_0 = Q_k\ C_k + Q_0\ C_f - Q_k\ C_f$

$Q_0\ C_0 - Q_0\ C_f = Q_k\ C_k - Q_k\ C_k$

$Q_0\ (C_0 - C_f) = Q_k\ (C_k - C_f)$

$Q_k = [Q_0\ (C_0 - C_f)\ /\ (C_k - C_f)]$

Kuru katılar tutma oranı %R ile gösterilirse;

R (%) = (Kek içerisindeki kuru katıların kütlesi / Besleme akımındaki çamurun kuru katı kütlesi) x 100

$R\ (\%) = (Q_k\ C_k\ /\ Q_0\ C_0)\ 100$

$R\ (\%) = C_k\ [Q_0\ (C_0 - C_f)\ /\ (C_k - C_f)]$

$$R\ (\%) = \frac{C_k}{Q_0 * C_0} * \frac{Q_0(C_0 - C_f)}{(C_k - C_f)} * 100$$

$$R\ (\%) = \frac{C_k}{C_0}\frac{(C_0 - C_f)}{(C_k - C_f)} * 100$$

Susuzlaştırma birimine beslenen akımın katı madde oranı %4 ise katı madde konsantrasyonu:

$C_0 = 4 * 10.000 = 40.000\ mg/L$

Deşarj edilen kekin katı madde oranı %20 ise katı madde konsantrasyonu:

$Ck = 20 * 10.000 = 200.000\ mg/L$

Süzüntüdeki (filtrat) katı madde konsantrasyonu (Cf) = 500 mg/L

Sistemin katı madde tutma oranı (%R) = ?

$$R(\%) = \frac{200.000 * (40.000 - 500)}{40.000 * (200.000 - 500)} * 100 = \%99$$

olarak hesaplanır.

Problem 9.8

Nüfusu 100.000 kişi olan ve yukarı akışlı havasız çamur yataklı sistem içeren bir atıksu arıtma tesisinde ortaya çıkan stabil çamurun çamur kurutma yatakları kullanılarak susuzlaştırılmak istenmektedir. Kurutma süresi (T_d) 15 gün olduğu kabul edilirse; kurutma yataklı sistemi boyutlandırınız [Yukarı akışlı havasız çamur yataklı sistemlerde hacimsel çamur üretimi 0,2-0,6 lt/kişi.gün; stabil çamurun katı madde (TKM) yükü 12-18 gr AKM/kişi.gün; katı madde yükleme hızı (SLR) 15 kgTKM/m^2; kurutulmuş çamur 5 gün geçtikten sonra kurutma yatağından uzaklaştırılmaktadır)?

Çözüm.

Öncelikle susuzlaştırılması gereken stabil çamur debisi ($Q_ç$)'nin hesaplanması gerekir;

Bunun için yukarı akışlı havasız çamur yataklı sistemlerde ortaya çıkan çamur debisinin hesabında; kişi başına hacimsel çamur üretimi 0,4 L/gün değeri seçilirse, 100.000 kişilik bir nüfus için;

$$Q_ç = 100.000 * 0{,}4 = 40.000\frac{L}{gün} = 40\ m^3/gün$$

hesaplanır.

Yukarı akışlı havasız çamur yataklı sistemlerde ortaya çıkan çamurun TKM miktarının (M_{TS}) hesabında; kişi başına TKM yükü 15 gr/gün değeri seçilirse, nüfusu 100.000 kişi için;

$$MTSS = 100.000 * 15 = 1.500.000\frac{gr}{gün} = 1.500\frac{kg}{gün}$$

hesaplanır.

Kurutma yatağının işletme döngüsü (T)'nin hesabında, kurutma süresi (T_d) ile temizleme süresi (T_c) değerlerinin toplanması gerekir. Kurutulmuş çamurun 5 gün sonra kurutma yatağından uzaklaştırıldığı verildiğine göre;

$T = Td + Tc = 15 + 5 = 20\ gün$

Buna göre, her bir döngü başına susuzlaştırılacak çamurun hacmi ($V_ç$);

$V_ç = Q_ç\ T = 40 * 20 = 800\ m^3/dön gü$

Kurutma yatağı için gerekli alan (A) hesabında;

$$A = \frac{M_{st}\ T}{SLR} = \frac{1500 * 20}{15} = 2200\ m^2$$

Kişi başına gerekli alan ($A_{kişi}$) hesaplanırsa;

$A_{kişi} = A / Nüfus = 2200 / 100.000 = 0{,}022\, m^2/kişi$

Her bir hücresi 10 m genişlikte ve 10 m uzunlukta ($A_{hücre}$ = 10 x 10 = 100 m^2) olacak şekilde toplam;

$A/A_{hücre} = 2200/100 = 22\ hücreli\ (yataklı)$

kurutma yatağı sisteminin inşa edilmesi gerekmektedir.

Kurutma yatağına her bir işletme döngüsü için yükleme yapıldıktan sonra yatak üzerine serilecek çamur tabakasının yüksekliği ($H_ç$);

$H_ç = V_ç / A = 800 / 2200 = 0{,}36\, m = 36\, cm$

olarak hesaplanır.

Problem 9.9

Yıllık 200 ton/yıl kuru çamur üretimi olan bir tesiste, stabilize edilmiş arıtma çamuru ağır metal konsantrasyonları (kuru ağırlık olarak) aşağıda verilmiştir:

Pb = 650 mg/kg; Cd = 6 mg/kg; Cr = 900 mg/kg;
Cu = 750 mg/kg; Ni = 110 mg/kg; Zn = 2400 mg/kg;
Hg = 8 mg/kg

a) *Yukarıdaki ağır metal değerleri göz önüne alındığında; söz konusu stabil çamurun araziye uygulanması uygun mudur? Uygun ise gerekli alan ihtiyacını hesaplayınız? (Azot yükleme hızı ihmal edilecektir).*

Çözüm.

Arıtma çamuru ağır metal seviyeleri 03/08/2010 tarihinde Resmi Gazetede yürürlüğe giren 27661 sayılı Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelikte verilen değerlerle karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma aşağıdaki tabloda verilmektedir. Stabilize arıtma çamurunun uygulanacağı toprakta ağır metal içeriğinin EK I-B'de verilen sınır değerlerinden büyük olmaması gerekmektedir. Çamurdaki ağır metal konsantrasyonlarından birinin dahi EK I-B'de verilen sınır değerlerini aşması durumunda, stabilize arıtma çamurunun toprakta kullanılması yasaktır. Dolayısıyla arıtma çamurunun ağır metal içeriğinin bilinmesi gereklidir. Ayrıca araziye uygulama için ilgili yönetmelikte belirtilen diğer hükümlere de uyulması gerekmektedir.

Tablo. *Arıtma Çamuru'ndaki Ağır Metal Konsantrasyonları ve İlgili Yönetmelikte Verilen Sınır Değerleri:*

Ağır Metal	Arıtma çamurundaki konsantrasyon değerleri (mg/kg kuru ağırlık)	Ek I -B sınır değerler* (mg/kg kuru ağırlık)	Ek I -E Sınır yük değerleri* (gr/da/yıl, kuru maddede)
Kurşun	650	750	225
Kadmiyum	6	10	3
Krom	900	1000	300
Bakır	750	1000	300
Nikel	110	300	90
Çinko	2400	2500	750
Civa	8	10	3

**Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik*

Tablodan görüldüğü üzere; örnekte verilen çamurun ağır metal konsantrasyonları, ilgili yönetmelikte verilen sınır değerlerinden düşüktür. Bu nedenle söz konusu stabil çamur araziye uygulanabilir.

b) *Yıllık olarak araziye uygulanabilecek arıtma çamuru miktarını hesaplayınız.*

Her bir ağır metal için yılda uygulanabilecek maksimum arıtma çamuru miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken yukarıdaki tabloda Ek I -E sütununda yer alan "Toprakta on yıllık ortalama esas alınarak bir yılda verilmesine müsaade edilecek ağır metal yükü sınır değerleri" kullanılmalıdır. Bu değerler aşağıdaki eşitlikte L_c olarak adlandırılmaktadır.

Arıtma çamurlarının kirletici yükü esas alınarak; yıllık uygulanabilecek maksimum arıtma çamuru miktarının (L_s; ton/da.yıl) hesaplanabilmesi için;

$L_s = L_c/(C\ F)$

Burada; F = Birim çevirme (dönüştürme) faktörü

Buna göre;

Kurşun;

$L_s = L_{Pb}/(C_{Pb}\ F) = (225\ gr/da.yıl)/[(650\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}35\ ton/da.yıl$

Kadmiyum;

$Ls = L_{Cd}/(C_{Cd}\ F) = (3\ gr/da.yıl)/[(6\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}5\ ton/da.yıl$

Krom;

$Ls = L_{Cr}/(C_{Cr}\ F) = (300\ gr/da.yıl)/[(900\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}33\ ton/da.yıl$

Bakır;

$Ls = L_{Cu}/(C_{Cu}\ F) = (300\ gr/da.yıl)/[(750\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}4\ ton/da.yıl$

Nikel;

$Ls = L_{Ni}/(C_{Ni}\ F) = (90\ gr/da.yıl)/[(110\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}82\ ton/da.yıl$

Çinko;

$Ls = L_{Zn}/(C_{Zn}\ F) = (750\ gr/da.yıl)/[(2400\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}3125\ ton/da.yıl$

Civa;

$Ls = L_{Hg}/(C_{Hg}\ F) = (3\ gr/da.yıl)/[(8\ mg/kg) * (1\ gr/ton)/(mg/kg)] = 0{,}375\ ton/da.yıl$

*Her bir ağır metal için yılda uygulanabilecek maksimum arıtma çamuru miktarları karşılaştırıldığında; kritik olan parametrenin miktarı 0,3125 ton/da.yıl ile en az hesaplanan 'çinko' olduğu görülmektedir. Bu örnek için azot yükleme hızının ihmal edilmesi gerektiği belirtildiğinden; araziye uygulamada gerekli alan hesabında çinko için bulunan değer esas alınmalıdır.**

Önemli Not: *Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık uygulanabilecek maksimum arıtma çamurlarının miktarları belirlenirken; ağır metallerin yanında azot içeriği de dikkate alınmaktadır. Genellikle azot açısından yükleme değerleri, ağır metaller açısından hesaplanan yükleme değerlerinden daha sınırlayıcı olmaktadır. Bu durumda azot yüklemesi hesaplandıktan sonra, hangisi daha kritikse (düşükse), o parametreye göre arazi uygulaması yapılmaktadır.*

c) Gerekli arazi ihtiyacının alan (A; da) hesabında;

A = B /L_s eşitliğine göre
B = Üretilen arıtma çamuru miktarı, ton /yıl (kuru ağırlık)
L_s= Tasarımda uygulanabilecek yıllık maksimum arıtma çamuru miktarı, ton/da.yıl
A = (200 ton/yıl) / (0,3125 ton/da.yıl) = 640 da

Bu durumda; örnekte verilen stabil çamurun araziye uygulanarak nihai bertarafı için 640 dekar alana ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

[1] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston: McGraw-Hill.

[2] Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill.

[3] Öztürk, İ., Güven, H. (2015). Türkiye'de Büyükşehir Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Çamurları için Yönetim Stratejiler. Su ve Çevre Teknolojileri, http://www.suvecevre.com/?pid=34539

[4] Ubay-Çokgör, E. vd. (2013). Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi. TÜBİTAK KAMAG Projesi (No: 108G167).

[5] Babbitt, H. and Caldwell, D.H. (1939) Laminar flow of sludges in pipes with special reference to sewage sludge. Univ. Illinois Bull. 37 (12) 1-57.

[6] Kulling, D., Stadelmann, F., Herter, U. (2001). Sewage Sludge – Fertilizer or Waste? UKWIR Conference, Brussels.

[7] Vesilind, P.A. (edit) (2004). Wastewater Treatment Plant Design. Based on the Water Environment Federation (WEF), IWA Publishing.

[8] Eggeman, T., Elanderb, RT. (2005). Process and economic analysis of pretreatment technologies. Bioresour Technol, vol. 96. p. 2019–25.

[9] Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass: a review. Bioresour Technol, 100, pp. 10–18

[10] Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batsone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., et al (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review J Hazard Mater, 183, pp. 1–15

[11] Elliot, A., Mahmood, T. (2012). Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste. Water Sci Technol 84:497–505.

[12] Elliot, A., Mahmood, T. (2007). Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues. Water Res, 41, pp. 4273–4286

[13] Esposito, G., Frunzo, L., Panico, A., Pirozzi, F. (2011). Modeling the effect of the OLR and OFMSW particle size on the performances of an anaerobic co-digestion reactor. Process Biochem 46:557–65

[14] Kim, IS, Kim, DH, Hyun, SH. (2000). Effect of particle size and sodium ion concentration on anaerobic thermophilic food waste digestion. Water Sci Technol 41:67–73

[15] Mata-Alvarez, J, Mace S , Llabres P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresour Technol 74:3–16.

[16] Sandino, J, Santha, H , Rogowski, S , Anderson, W, Sung, S, Isik, F. (2005). Applicability of ultrasound pre-conditioning of WAS to reduce foaming potential in mesophilic digesters. Residuals Biosolids Manage 17:819–35.

[17] Toreci, I , Kennedy, KJ, Droste, RL. (2009). Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment. Water Res 43:1273–84.

[18] Mottet, A , Steyera, JP, Délérisb, S , Vedrenneb, F , Chauzyc, J, Carrère, H. (2009). Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. Biochem Eng J 46:169–75.

[19] Marin, J, Kennedy, KJ, Eskicioglu, C. (2010). Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. Waste Manage 30:1772–9.

[20] Bien, JB, Malina, G , Bien, JD, Wolny, L. (2004). Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation. J Environ Sci Health 39:939–49.

[21] Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., Piet, N.L. (2014). Lens Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste Applied Energy Volume 123, Pages 143–156.

[22] Appels L , Degreve J, Bruggen BV, Impe JV, Dewil R. (2010). Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilization, heavy metal release and anaerobic digestion. Bioresour Technol 101:5743–8.

[23] Climent, M , Ferre,r I , Baeza, MM, Artola, A , Vazquez, F , Font, X. (2007). Effect of thermal, mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chem Eng J 133:335–42.

[24] Gavala, HN, Yenal, U , Skiadas, IV, Westermann, P , Ahring, BK. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. Waster Res. 37:4561–72.

[25] Raposo, F , Rubia, MAD, Fernandez-Cegri, V , Borja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. Renew Sustain Energy Rev 16:861–77.

[26] Lopez, TM, del Espinosa Llorens Ma. (2008). Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes. Waste Manage 28:2229–34.

[27] Modenbach, AA, Nokes, SE. (2012). The use of high-solids loading in biomass pretreatment – a review. Biotechnol Bioeng 109:1430–42.

[28] Wang, L , Mattsson, M , Rundstedt, J, Karlsson, N. (2011). Different pretreatments to enhance biogas production. Master of Science Thesis, Halmstad University.

[29] Taherzadeh, MJ, Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. Int J M ole Sci 9:1621–51.

[30] Carballa, M., Manterola, G., Larrea, L., Ternes, T., Omil, F., Lema, JM. (2007). Influence of ozone pre-treatment on sludge anerobic digestion: removal of pharmaceutical and personal care products. Chemosphere 67:1444-52.

[31] Kianmehr, P , Parker, W, Seto, P. (2010). An evaluation of protocols for characterization of ozone impacts on WAS properties and digestibility. Bioresour Technol 101:8565–72.

[32] Yoem, I , Lee, KR, Ahn, KH, Lee, SH. (2002). Effects of ozone treatment on the biodegradability of sludge from municipal wastewater treatment plants. Water Sci Technol 46:421–5.

[33] Lim, JW, Wang, J-Y. (2013). Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste. Waste Manage 33:813–9.

[34] Parawira, W, Murto, M , Read, JS, Mattiasson, B. (2005). Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. Process Biochem 40:2945–52.

[35] Riau, V , Rubia, MA, Perez, M. (2010). Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain Class A biosolids. A discontinuous study. Bioresour Technol 101:65–70.

[36] Shahriari, H , Warith, M , Hamoda, M, Kennedy, KJ. (2012). Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide. Waste Manage 32:41–52.

[37] Rafique, R , Poulse, TG, Nizami, A -S , Asam, ZZ, Murphy, JD, Kiely, G. (2010). Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pretreatments to enhance methane production. Energy 35:4556–61.

[38] Wett, B. , Phothilangka, P , Eladawy, A. (2010). Systematic comparison of mechanical and thermal sludge disintegration technologies. Waste Manage 30:1057–62.

[39] Schieder, D , Schneider, R , Bischof, F. (2000). Thermal hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste. Water Sci Technol 41:181–7.

[40] Cesaro, A., Belgiorno, V. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions. Chem Eng J, 240, pp. 24–37

[41] Hartmann, H., Angelidaki, I., Ahring, B.K. (2000). Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. Water Sci Technol, 41, pp. 145–153

[42] Bordeleau, É.L., Droste, R.L. (2011). Comprehensive review and compilation of pretreatments for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. Water Sci Technol, 63, pp. 291–296

[43] Neyens, E., Baeyens, J. (2003). A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. Hazard Mater, 98, pp. 51–67

[44] Deng, W.Y., Yan, J.H., Li, X.D., Wang, F., Lu, S.Y., Chi, Y., et al. (2009). Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer. Chemical Engineering Science, 64, pp. 5117–5124.

[45] Öztürk, İ., Çallı, B., Arıkan, O., Altınbaş, M. (2016). Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı El Kitabı. Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara.

[46] Roux, N., Jung, D., Pannejon, J., Lemoine, C. (2010). Modelling of the solar drying process Solia, S. Pierucci, G.B. Ferraris (Eds.), Proceeding of 20th European symposium on computer aided process Engineering.

[47] Öğleni, N., Özdemir, S. (2010). Pathogen reduction effects of solar drying and soil application in sewage sludge, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 34, pp. 509–515

[48] Salihoglu, N.K., Pinarli, V., Salihoglu, G. (2007). Solar drying in sludge management in Turkey, Renewable Energy, 32, pp. 1661–1675

[49] Singh, R.P., Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge, Waste Management, Volume 28, Issue 2, 347–358.

[50] Kandeler, E., Tscherko, D., Bruce, K.D., Stemmer, M., Hobbs, P.J., Bardgett, R.D., Amelung, W. (2000). Structure and function of the soil microbial community in microhabitats of a heavy metal polluted soil, Biol. Fert. Soils, 32, pp. 390–400.

[51] EPA (1994). Land Application of Sewage Sludge A Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503.

[52] Kelessidis A., Stasinakis A.S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries (review), Waste Management, 32, 1186-1195.

[53] Fytili, D., Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 116-140

[54] ENVEST Planners Konsorsiyumu. (2005) T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımlarının Planlanması için Teknik Yardım Projesi (EHCIP) Düzenli Depolama Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı, Ankara

[55] MEMPIS Consortium (2006). Environmental Master Plan and Investment Strategy for the Marmara Sea Basin - Turkey, Water Quality Modeling of the Sea of Marmara, Model Development and Scenario Simulations. European Investment Bank and Turkish Ministry of Environment & Forestry.

[56] TÜBİTAK-MAM, İTÜ (2010). Yirmi beş Havza için Havza Koruma Eylem Planları Projesi

10. ARITMA TESİSLERİNDE VERİM, ENERJİ KULLANIMI VE MALİYET

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk*

10.1. Proses Verimi, Güvenilirlik ve Enerji Tasarrufu İle İlgili Genel Esaslar

Arıtma yöntemi, projelendirme kriterleri ve ilgili diğer ihtiyaçlar başlıca aşağıdaki faktörlerce kontrol edilir:

- Atıksu debisi ve özellikleri
- Arıtma seviyesi
- Verimdeki değişim ve güvenilirlik
- Diğer proses ihtiyaçları

Atıksu Debisi ve Özellikleri:

Proses seçimi için gereken en önemli bilgiler bu başlık altında toplanır.

Arıtma Seviyesi:

Evsel atıksular söz konusu olduğunda, BOİ, KOİ, azot, fosfor, koliformlar, helminitler vs. gibi belli başlı parametrelerin hangi oranda giderileceği arıtma seviyesini belirler. Arazide arıtma sistemleri için arıtma seviyesi, yüzey sularına deşarj sistemi için gerekli arıtma seviyesinden daha düşüktür. Arazide arıtma, ayrı azot ve fosfor giderimi gerektirmediğinden mümkün olduğu takdirde çoğu kez daha uygundur.

Arıtmada yalnızca BOİ giderimine ağırlık vermek doğru bir yaklaşım değildir. Arıtma prosesi seçilirken, bütün önemli parametrelerin giderim verimleri belirlenip ilgili mevzuatta öngörülen alıcı ortamlara deşarj limitleri göz önüne alınmalıdır.

Verimdeki Değişim ve Güvenilirlik:

Atıksu debi ve kirletici özellikleri devamlı değişim gösterir. Bu yüzden deşarj standartlarının istatistiksel bazda sağlanması gerekir. Bazı ülkelerde arıtma sisteminin, istenen BOİ standardını, zamanın %95'inde karşılaması beklenmektedir.

Farklı arıtma prosesleri, farklı verim dalgalanmaları gösterir. Arıtılmış atıksu BOİ deşarj standardı 30 mg/L ise, bu standardı sürekli sağlamak amacıyla bir prosesi 25 mg/L, diğer bir prosesi ise 20 mg/L arıtım yapacak (çıkış suyu verecek) şekilde emniyet payı bırakarak projelendirmek gerekebilir.

Atıksu arıtma tesislerinin güvenilirlik esaslı istatistiki performans analizi ile ilgili detaylı bilgi ve uygulama örnekleri için Kaynak [1], Bölüm 15.2'ye başvurulabilir.

Diğer Proses İhtiyaçları:

Proses seçimini etkileyen diğer bazı faktörler aşağıda sıralanmaktadır:

- Gerekli alan ihtiyacı
- Gerekli enerji: Enerji konusu iki yönden incelenebilir; minimum enerji kullanımı ve enerji kesintilerinde tesisin çalışmaya devam etmesi
- İşletme ve bakım için gerekli ekipman: Ekipmanın kolay ve ucuz temin edilebilirliği
- Yetişmiş eleman ihtiyacı
- Bakım problemleri (ekipman, makine ve diğer yapılar)
- Çamur üretimi ve bertarafı: Çamur arıtımı toplam arıtım maliyetinin çok büyük bir kısmını oluşturur

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

- Mevcut hidrolik yük ve tesisteki hidrolik yük kaybı (amaç, mümkün olduğu kadar terfiden kaçınmaktır)
- İleride ihtiyaç duyulması halinde tesisin tevsi imkanı

Bazı arıtım proseslerinin enerji ve arazi ihtiyaçları Tablo 10.1'de verilmektedir.

Tablo 10.1. Değişik arıtım proseslerinin arazi ve enerji ihtiyaçları [1]

Proses	***Sıcak iklimler için enerji ihtiyacı (m^2/kişi)[a]***	***Enerji ihtiyacı (kW saat/kişi.yıl)***
Klasik aktif çamur	*0,2-0,25*	*12-15*
Uz un havalandırmalı aktif çamur	*0,15-0,2*	*16-19*
Damlatmalı filtre	*0,2-0,3[b]*	*7-11*
HÇYR + kısa bekletmeli lagün	*0,2-0,3[c]*	*Yok*
Fakültatif havalandırmalı lagün	*0,3-0,4[d]*	*12-15*
HÇYR+7 günlük lagün	*0,3-0,4*	*Yok*
Stabilizasyon havuzu	*1,0-2,8[e]*	*Yok*
HÇYR + su mercimeği balık havuzları	*2,0-2,8*	*Yok*
Yapay sulak alanlar	*2,0-3,5*	*Yok*
Vermikültür	*0,3-0,4*	*Yok*

[a] *kişi başına su kullanımı 180 L ve BOİ=50 g/gün*
[b] *çamurun susuzlaştırılma sistemine bağlıdır (mekanik veya kurutma yatakları)*
[c] *havuz yerleşimi ve standartları karşılamak için gerekli alıkoyma süresine bağlıdır*
[d] *3 metre su derinliği, sedde şevleri: 2 (yatay), 1 (düşey)*
[e] *deneysel*

Enerji Tasarrufu:

Atıksu arıtma tesisleri projelendirilirken, enerjinin korunmasına ve enerji tasarrufuna büyük önem verilmelidir. Enerji konusunda iki kademeli bir yaklaşım uygulanabilir. Birinci yaklaşım, arıtma tesisinin maliyetini ve karmaşıklığını arttırmadan, enerji tasarrufu sağlayacak, yapılabilir ve uygulanabilir metotlar seçmektir. Bunu yaparken teknolojide aşırılığa kaçmamalı, proses ve ekipmanlar dikkatli seçilmeli ve iyi bir mühendislik ve mimarlık tasarımına gidilmelidir. İkinci yaklaşım, daha gelişmiş ekipman ve cihazları içeren proseslerde sadece fazla masraf analizine yoğunlaşmaktır. Bu ikinci yaklaşımın uygulanabilirliği gelişmiş ülkelerle sınırlıdır. Birinci yaklaşımla ilgili yöntemler aşağıda verilmektedir:

(1) Arıtılmış atıksu (deşarj) kalite standartlarını sağlayabilecek en az enerji kullanan proses seçilmelidir. Tablo 10.1'de görüldüğü gibi stabilizasyon havuzlarında hiç enerji ihtiyacı yoktur. HÇYR sisteminde çok az, fakültatif havalandırmalı lagünlerde fazla, mekanik havalandırmalı lagünlerde ise çok fazla enerji ihtiyacı vardır. Ayrıca havalı çamur çürütme sırasında havasız çürütmeye göre çok daha fazla enerji kullanılır. Fazla enerji kullanan bir proses seçilmiş ise, bu seçimin temelinde çok yüksek BOİ giderimi, yüksek nitrifikasyon-denitrifikasyon verimi, işletmenin daha güvenilir olması gibi sağlam gerekçeler olmalıdır. Basit bir stabilizasyon havuzu fizibil bulunmuş ise, herhangi bir başka enerji tasarrufuna ihtiyaç yoktur ve bu metot tercih edilmelidir. Çoğunlukla, farklı enerji ve arazi ihtiyaçları olan bu iki proses birleştirilerek toplam maliyet ve enerji ihtiyacı optimize edilebilir. Seçilmiş belli bir proseste enerji ihtiyacını azaltmanın çeşitli yolları vardır. Örneğin, konvansiyonel ve uzun havalandırmalı aktif çamur sistemlerinde enerji ihtiyacını azaltmanın bir yolu, denitrifikasyon esnasında açığa çıkan oksijenden yararlanmaktır. Benzer şekilde, mekanik havalandırmalı lagünler için sıcak iklimlerde üniteler daha derin yapılarak enerji ihtiyacı azaltılabilir. Bunun yanı sıra karışım kinetiğine ve ısı kaybına karşı alınacak tedbirlere daha çok dikkat edilerek lagün hacmi ve enerji ihtiyacı küçültülebilir.

(2) Proses seçme imkanı bulunmuyorsa, yani uygulanacak proses belirlenmiş ise, en az enerji tüketimi sağlayacak ekipman ve inşaat teknikleri kullanılmalıdır. Örneğin, vidalı (burgulu, salyangoz) pompalar ve dalgıç pompalar diğer pompalara göre daha az enerji tüketirler. Aynı şekilde, lagünlerdeki oksijen ihtiyacı için mekanik havalandırmalı sistemlerde enerji ihtiyacı pnömatik olanlara göre daha azdır. Arıtma tesisi yerindeki topoğrafik eğimlerden yararlanarak, pompaj ihtiyacını azaltacak şekilde tesis yerleşimi yapılmalıdır. Soğuk iklimlerde, uygun malzemeler ve inşaat teknikleri kullanılarak ısı tasarrufu sağlanabilir.

Diğer bazı enerji tasarrufu metotları aşağıda sıralanmıştır:

- Konvansiyonel enerji kaynakları, mümkünse rüzgar ve güneş enerjileri ile desteklenebilir. Arıtma sistemlerinde pompaların, havalandırma rotorlarının ve benzeri ekipmanların çalıştırılmasında bu tip alternatif enerji kaynaklarının kullanım imkanları araştırılmalıdır.
- Isı enerjisini geri kazanan gelişmiş cihazlar kullanılabilir. Bunlar arasında, çamur çürütücülerden ısı ve enerji üretmek amacıyla metan kazanımı önemlidir. Ancak bu sistem önemli ölçüde mekanik aksam gerektirdiğinden, belli nüfusların altında (tercihen > 100.000 EN olması istenir) her zaman kullanılmamaktadır.

Atıksu arıtma tesislerinde enerji tasarrufu hakkında daha detaylı bilgi için Kaynak [2]'ye başvurulabilir.

10.2. Atıksu Arıtma Tesislerinde Maliyet Analizi

Optimum çözümü bulmak üzere düşünülen seçenekler için yıllık ilk yatırım ve işletme maliyetlerini içeren toplam maliyetler bulunur ve kıyaslanır. İlk yatırım maliyeti, tesis çalışmaya başlayana kadar yapılan bütün yatırım harcamalarını içerir. Bunlar:

- Yasal ödemeler (vergiler) dahil arazi bedeli
- Mühendislik, projelendirme ve müşavirlik hizmetleri
- İnşaat, ekipman ve montaj maliyetleri
- İnşaat esnasında temin edilen paraya (kredi) ödenen faizler

İşletme maliyeti, tesis çalışmaya başladıktan sonra yapılacak işletme ve bakım harcamalarını içermektedir. Bunlar:

- Personel
- Kimyasal maddeler
- Yakıt ve elektrik giderleri
- Nakliye masrafları
- Bakım ve tamir giderleri
- Sigorta masrafları
- Genel masraflar

10.2.1. Konvansiyonel Arıtma Sistemleriyle Arıtma Maliyeti

Atıksu arıtma maliyeti atıksuyun özelliklerine, kullanılan arıtma prosesine ve istenen arıtma derecesine bağlıdır. Bazı atıksu arıtma prosesleri için belirlenen ortalama ilk yatırım maliyetleri Tablo 10.2'de verilmektedir.

Tablo 10.2. Atıksu arıtımında yaklaşık ilk yatırım maliyetleri [1]

Arıtma sistemi	*Yaklaşık ilk yatırım maliyetleri (1995-1996 yılları için)*	
	$/kişi [a]	*$ Milyon L/ gün* [b]
Klasik aktif çamur	*12,3-14,4*	*0,68-0,8*
Uz un havalandırmalı aktif çamur	*8,2-10,3*	*0,45-0,58*
HÇYR	*8,2-10,3*	*0,45-0,58*
Havalandırmalı lagün	*6,2-8,2*	*0,35-0,45*
Stabilizasyon havuzu	*3,1-4,1*	*0,16-0,22*

[a] *Eşdeğer nüfus için su tüketimi 180 L/gün ve günlük $BOİ_5$ yükü 50 g olarak dikkate alınmıştır. Bu durumda 10^6 L/gün 5555 kişiye karşılık gelmektedir.*
[b] *Arazi fiyatı hariç*

10.2.1.1. Arıtma Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Farklı proseslerin ilk maliyet ve işletme masrafları da farklı olduğundan, aralarında karşılaştırma yapmak zordur. Anapara ile işletme masrafları birbirine eklenemez. Anapara bir defaya mahsus harcanan bir paradır, işletme masrafları ise her yıl yapılan harcamaları kapsamaktadır. Bu nedenle ya işletme ve bakım masrafları ilk yatırım bazına getirilir, ya da yatırım maliyeti yıllık baza indirgenir.

Bu konuda gerçekçi bir yaklaşım *bugünkü değer* metodudur. Birbirlerine alternatif olan farklı arıtma prosesleri bugünkü değer metoduyla mukayese edilebilirler.

Bugünkü Değer Metodu:

Farklı arıtma alternatiflerini belli bir zaman aralığında kıyaslamak için kullanılan en yaygın metotlardan birisidir. Bunun için aşağıda maddeler halinde sıralanan bilgilere ihtiyaç vardır:

- Toplam ilk yatırım maliyet bedeli (inşaat, elektrik ve malzeme; genelde arazi bedeli hariç tutulur)
- İlk yatırımın kaç yılda tamamlandığı ve her yıl ne kadar harcama yapıldığı
- Tesisin işletmeye açıldığı ilk yıldaki bakım ve işletme giderleri ve daha sonraki yıllarda tesisin ömrü boyunca (enflasyon oranında arttırılmış) yıllık bakım ve işletme giderleri
- Daha sonraki bir tarihteki toplam maliyeti belli bir faiz oranı ile bugünkü net değere çevirmek için bugünkü değere dönüştürme oranı (P /F faktörü)
- Tesisin hizmet süresi dolduğu zamanki (hurda) değeri

Atıksu arıtma tesisi yatırımlarının bugünkü değer veya yıllık eşdeğer ödemeler yöntemiyle ekonomik analizi ile ilgili temel mühendislik ekonomisi yaklaşımları Bölüm 13'te özetlenmiş olup, daha kapsamlı bilgi için Kaynak [3]'e başvurulabilir.

10.2.2. İleri Biyolojik Arıtma Sistemleriyle Arıtma Maliyeti

Genel olarak evsel atıksu arıtma sistemleri karbonlu organik maddenin giderilmesine yönelik olarak tasarlanmaktadır. Ancak alıcı su ortamında ötrifikasyonun ve kirliliğin artması sonucu atıksu deşarjında özellikle hassas bölgeler için daha sıkı deşarj limitleri getirilmiştir. Bu kapsamda azot ve fosfor parametrelerinin öncelikle kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu durumda pek çok ülkede yeni kurulacak ve mevcut olan arıtma sistemlerinde azot ve fosfor arıtımı için ilave maliyet ve daha yüksek düzeylerde arıtım verimi gerekli olmaktadır.

İleri Biyolojik Arıtma Sisteminde İşletme Gider Bileşenleri:

İşletmede olan ileri evsel atıksu arıtımında işletme maliyetini kapsayan kalemler aşağıdaki gibidir:

- Enerji giderleri: elektrik, doğal gaz vd.
- Kimyasal giderler: P gideriminde kullanılan kimyasallar
- Çamur şartlandırma kimyasalları giderleri: çamur susuzlaştırmada polimer + kireç
- Uzaklaştırma giderleri: çamur, katı atık vd. uzaklaştırma
- Onarım-bakım giderleri
- Personel giderleri
- Yönetim giderleri: telefon, sigorta, posta vd.

Ana enerji ihtiyacı, havalandırma sistemi ile ilgili olup atıksudaki organik madde ve azot yüküne göre belirlenmektedir. Kimyasal madde ihtiyacı, fosfor yüküne ve üretilen çamur miktarına bağlıdır. Bakım ve onarım maliyeti, yalnızca yük ile değil, sistemin kapasitesi ile de ilgilidir. Öncelikli olarak sistem organik madde yükünden de etkilenmektedir. Tablo 10.3 ve Tablo 10.4'te Avusturya için atıksu arıtma tesisi işletme maliyeti analizi verilmiştir [4].

Tablo 10.3. N ve P giderimi olan evsel atıksu arıtma sisteminde işletme giderleri (50000-200000 kişi, sistem havasız çürütme içermektedir)

Maliyet kalemleri	***Tüketim***		
	Aralık	***Ortalama***	***Birim***
Enerji (elektrik)	*5-16*	*10*	*KW saat/kişi.yıl*
Kimyasallar (P giderimi için)	*10-20*	*18*	*mol metal/kişi.yıl*
Çamur uzaklaştırma [a]	*45-75*	*60*	*kg susuz çamur/kişi.yıl*
Bakım-onarım	*% 0,5-1*	*% 0,6*	*İnşa maliyetinin %'si olarak (.../yıl)*
Personel [b]	*0,08-0,15*	*0,12*	*Ortalama maaş/1000 kişi.yıl*
Diğer giderler [c]	*-*	*% 15*	*Yıllık işletme maliyetinin %'si olarak*

[a] çamur tutma+ susuzlaştırma+ kurutma+ kompostlaştırmayı içerir
[b] tüm işçi masrafları: işletme+ laboratuvar+ yönetim+ idari+ muhasebe+ temizlik vd.
[c] çamur şartlandırma ve laboratuvarda kullanılan kimyasallar+ büro ihtiyaçları, sigorta, görev vd.

Tablo 10.4. Avusturya'da ileri evsel atıksu arıtma sistemi işletme giderleri (100000 kişilik tesis için)

Giderler	***Tüketim (birim)***	***Birim fiyat (€)***	***€ kişi.yıl***
Enerji (elektrik)	*10kWsaat/kişi.yıl*	*0,12*	*1,2*
Kimyasallar (P için)	*18 mol/kişi.yıl*	*0,06*	*1,1*
Çamur uzaklaştırma [a]	*60 kg/kişi.yıl*	*0,04*	*2,4*
Bakım-onarım	*İnşa maliyetinin % 0,6'sı*	*333*	*2*
Personel gideri [b]	*0,12 ort./1000 kişi.yıl*	*35*	*4,2*
Diğer giderler [c]	*% 15*	*-*	*1,7*
Toplam işletme gideri	*-*	*-*	*12,5 (12~15)*

Tablo 10.4'te verilen hesaplarda kimyasal olarak $FeCl_3$ alınmıştır. $FeCl_3$ demir sülfattan 3 kat daha pahalı, alüminyum tuzundan ise 3 kat daha ucuzdur. Çamur uzaklaştırma hesaplarında düzenli depolama alanlarına kabul bedeli de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada bakım-onarım masrafları sistemin kurulum (ilk yatırım) masraflarıyla orantılı olacak şekilde verilmiştir. Avusturya'daki 200 €/kişilik birim maliyet, tasarım yüküne göre belirlenen fiyattır. Nitrifikasyon ve besi maddesi arıtımı için Avusturya'da ileri evsel atıksu arıtma sisteminin işletme masrafı, atıksu arıtımı, enerji ve fosfor çöktürmede kullanılan kimyasallar için en az 3 €/kişi.yıl'dır. Bu miktar toplam işletme masrafı olan 12-15 €/kişi.yıl'ın %20'sine denk gelmektedir. Arıtma sistemi işletme giderleri içindeki en yüksek kalem personel giderleridir. Bu tüm Avrupa Birliği ülkeleri için geçerlidir [4].

(a) İleri Biyolojik Arıtma Sistemlerinde Yatırım Maliyetleri:

Atıksu arıtma sistemlerinde toplam maliyet, işletme ve yıllık yatırım maliyetlerinin toplamı şeklinde hesaplanmaktadır. Tasarım ve yapım masrafları üç kategoride incelenebilmektedir:

- İnşaat işleri
- Makine ve teçhizat işleri
- Elektrik, kontrol/otomasyon işleri

Almanya'da toplam yatırım maliyetinin %35'ini mekanik ekipman, teçhizat ve kontrol sistemleri harcamaları oluşturmaktadır. Kum filtre ağırlıklı ekipman yoğun sistemlerde, makine ve teçhizat maliyeti toplam yatırım bedelinin %40'ını, elektrik tesisatı ve kontrol işleri ise %10'unu oluşturmaktadır. Kalan %50'lik kısım ise inşaat işleri yatırımına kalmaktadır. Türkiye'de günümüz itibariyle, atıksu arıtma tesisi yatırımlarının ~% 45-50'sinin inşaat, kalan % 50-55'inin ise mekanik, elektrik ve diğer tesisat/kontrol işlerinden oluştuğu kabul edilebilir.

Tablo 10.5'te Avrupa'daki toplam 34 ileri atıksu arıtma sistemi ile ilgili ortalama sonuçlar özetlenmiştir. Almanya'da evsel atıksu arıtma sisteminin maliyeti, ilgili kirletici aşağıda verilen parametrelerin arıtımına bağlı olarak aşağıdaki birim değerlerle ifade edilebilmektedir:

- Arıtılan birim kg azotun maliyeti: 5-7,5 €
- Arıtılan birim kg fosforun maliyeti: 12,5-20 €
- Arıtılan organiklerin (KOİ) kg maliyeti: 0,5-1 €

Tablo 10.5. Altı Avrupa ülkesindeki atıksu arıtma sistemi maliyetleri [5]

Ülkeler	*Anaerobik çürütücü tesis sayısı*	*Yatırım Maliyeti*		*İşletme maliyeti*		*Yıllık toplam maliyet €/kişi.yıl*
		€/kişi.yıl	*Yıllık toplam maliyetin %'si*	*€/kişi.yıl*	*Yıllık toplam maliyetin %'si*	
Çekoslovakya	*4-6*	*32,5*	*59*	*23*	*41*	*55,5*
Almanya	*3-6*	*28,5*	*55*	*23*	*45*	*51,5*
Danimarka	*1-6*	*17*	*35*	*31,5*	*65*	*48,5*
Fransa	*0-5*	*11,5*	*25*	*34,5*	*75*	*46*
Hollanda	*3-6*	*20*	*50*	*20*	*50*	*40*
İtalya	*2-5*	*10,5*	*34*	*20,5*	*66*	*31*

(b) Atıksu Arıtma Sistemlerinde İşletme Maliyetleri:

Çoğu İskandinav ülkesinde büyük atıksu arıtma tesisleri besi maddesini de giderebilecek şekilde tasarlanmakta veya iyileştirilmektedir. Balmer [6] tarafından yapılan bir çalışmada İsveç'te kurulu beş arıtma sistemi için işletme maliyetleri verilmiştir. Bu sistemler aşağıda özetlenmiştir:

- Sistem A : Atıksu arıtma = N giderimi (oksik + anoksik) + Fosfor giderimi (havasız + demir sülfat)

  EN = 204.600 kişi

  Çamur arıtma: mekanik yoğunlaştırıcı + havasız çürütme + susuzlaştırma

- Sistem B: Atıksu arıtma = Nitrifikasyonlu aktif çamur (metanol) + akışkan yataklı kum filtresinde sonda denitrifikasyon + demir ile fosfor giderimi.

  EN = 237400 kişi

  Çamur arıtma: yoğunlaştırıcı + santrifüj + havasız çürütme + santrifüjde susuzlaştırma

- Sistem C : Atıksu arıtma = Kimyasal arıtma (Al + polimer) + havalı biyofiltre (BOİ ve nitrifikasyon) + biyofiltre ile denitrifikasyon (metanol)

  EN = 525600 kişi

  Çamur arıtma: mekanik yoğunlaştırıcı + havasız çürütme + filtre preste susuzlaştırma

- Sistem D : Atıksu arıtma = Önde nitrifikasyonlu aktif çamur + demir sülfat ile P giderimi + kum filtresi

  EN = 634700 kişi

  Çamur arıtma: yoğunlaştırıcı + santrifüj + havasız çürütme + susuzlaştırma

- Sistem E: Atıksu arıtma = aktif çamur-denitrifikasyon + damlatmalı filtre (nitrifikasyon) + fosfor giderimi (demir sülfat)

  EN = 671.000 kişi

  Çamur arıtma: yoğunlaştırıcı + havasız çürütme + susuzlaştırma

İncelenen 5 atıksu arıtma tesisindeki kimyasal tüketimleri ve yıllık bedelleri Tablo 10.6'da verilmiştir.

Tablo 10.6. Kimyasal tüketimleri ve fiyatları [2]

Sistem → *Kimyasallar →*	*Sistem A* $FeSO_4$	*Sistem B* $FeSO_4$	*Sistem C* *PE + Alum*	*Sistem D* $FeSO_4$	*Sistem E* $FeSO_4$
Kullanılan, mol/yıl	*11,6*	*21*	*37,6*	*36,9*	*31,6*
Kullanılan, mol/mol P	*0,44*	*1,1*	*1,67*	*1,44*	*1,48*
Polimer, kg/yıl	-	-	*0,056*	-	-
Metanol, kg KOİ/yıl	-	*13,5*	*10,5*	-	-
Metanol, kg KOİ/kg N- yıl	-	*3,69*	*3,34*	-	-
Fiyat, €/yıl	*0,29*	*2,71*	*4,5*	*0,45*	*0,39*
Eşdeğeri, €/yıl	*0,36*	*2,38*	*6,45*	*0,74*	*1,74*

Sonda-denitrifikasyon ve/veya kimyasal ön arıtmanın olması durumunda Sistem B ve C için kimyasallara yapılan harcama diğer sistemlerden daha fazladır.

Aynı çalışmada ele alınan tesislerde çamur şartlandırma için kullanılan kimyasalların miktar ve maliyetleri de Tablo 10.7'de verilmiştir.

Tablo 10.7. Çamur arıtmada kullanılan kimyasal tüketimi ve fiyatları [2]

Sistem → *Kimyasallar →*	*Sistem A* *polimer*	*Sistem B* *polimer*	*Sistem C* *polimer +kireç*	*Sistem D* *polimer*	*Sistem E* *polimer*
Kullanımı, g/yıl	*145*	*82*	*84+7960*	*112*	*103*
Kullanımı, kg/ton KM[a]	*8*	*3,5*	*3,4+327*	*5,6*	*4,7*
Fiyat, €/yıl	*0,9*	*0,24*	*1,12*	*0,28*	*0,31*

[a] *toplam çamur (KM) olarak*

Sistem B, D ve E'de santrifüj kullanılmakta olup kimyasal fiyatları yaklaşık olarak benzerdir. Sistem A'da santrifüj kullanmaktadır ancak kimyasal kullanımı fazla olduğu için maliyeti yüksektir. Tesis C, pres filtreden önce kireç kullanıldığından, maliyeti en yüksek tesistir.

Tablo 10.8. Enerji kullanımı ve maliyeti [2]

	Sistem A	*Sistem B*	*Sistem C*	*Sistem D*	*Sistem E*
Şebekeden çekilen elektrik, kW sa/EN yıl	*22,4*	*98,9*	*46,5*	*21*	*32,6*
Çürütücüde üretilen elektrik, kW sat/EN yıl	*18,6*	*0*	*19,4*	*19,8*	*19,2*
Kullanılan toplam elektrik, kW sa/EN yıl	*41*	*98,9*	*65,9*	*40,8*	*51,8*
Diğer birimlerin enerji tüketimi, kW sa/yıl	*0*	*0*	*0*	*4,7*	*0*
Elektrik birim fiyatı, €/MW sa	*56,2*	*42,1*	*33,5*	*52,6*	*47,3*
Toplam enerji harcaması, €/yıl	*2,02*	*1,98*	*1,45*	*1,99*	*1,47*

Sistem B'nin enerji ihtiyacının A ve D'den daha fazla olduğu bulunmuştur. B'de sonda akışkan yatakta denitrifikasyon uygulanmaktadır. Sistem C ağırlıklı olarak biyolojik filtre esaslı olup,

aktif çamur sisteminden daha fazla enerji harcamaktadır. Sistem D enerjiyi yalnız ısıtma amacıyla kullanmaktadır.

Aynı çalışmada incelenen tesislerdeki personel ihtiyacı ve giderleri Tablo 10.9'da verilmiştir.

Tablo 10.9. Personel ihtiyacı ve harcamaları [2]

	Sistem A	*Sistem B*	*Sistem C*	*Sistem D*	*Sistem E*
Toplam çalışan sayısı	*18*	*41*	*39,4*	*39*	*55*
İşletmede çalışan sayısı	*17*	*31,3*	*30,6*	*37*	*40,4*
Maaş+ fazla mesai (maaşın %'si)	*1,5*	*5*	*8,6*	*5,9*	*18,6*
Adam.yıl	*16,3*	*172*	*-*	*35,2*	*41,6*
Personel harcaması, €/kişi-2 yıl	*3,41*	*5,1*	*2,19*	*2,64*	*2,35*
Diğer hizmetlerin bedeli, €/kişi-2 yıl	*1,94*	*0,21*	*0,55*	*0,56*	*1,09*

Akışkan yatak için personel ihtiyacı 0,5 adam.yıl kabul edilmiştir.

Tablo 10.9'da, idari, laboratuvar, endüstriyel gözetmen, çamur uzaklaştırma ve pompa istasyonu ve ilgili atıksu toplama sisteminde çalışan tüm personel dikkate alınmıştır. Uzun süreli Ar-Ge personeli bunun dışında tutulmuş, doğrudan sistemle ilgili personeller ise dahil edilmiştir. Personel sayısı arıtma sistemi tipi, her bir ünitenin boyutu ve sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem B'de ihtiyaç duyulan adam-gücü, dış hizmetlerden dolayı diğerlerine kıyasla oldukça fazla çıkmıştır.

(c) Klasik Biyolojik Arıtma Sistemlerinin Maliyeti:

Kore'deki 42 şehirde toplam 48 arıtma sistemi bulunmaktadır. Bunun 39'u klasik aktif çamur sistemi olup diğerleri uzun havalandırmalı aktif çamur, havasız lagün, oksidasyon hendeği ve döner biyolojik disk (DBD) sistemleridir. Bu sistemlerde konvansiyonel kirleticiler (BOİ, KOİ ve AKM) arıtılmaktadırlar. Söz konusu evsel atıksu arıtma sistemleri ile ilgili bilgiler Tablo 10.10'da verilmektedir.

Tablo 10.10. Kore'deki atıksu arıtma sistemlerinin işletme masrafları (1992) [7]

Sistem sayısı	*Sistem kapasitesi (1000 m^3/gün)*	*Toplam maliyet (1000 $/yıl)*	*Birim fiyat (m^3/$)*
26	*2.654.951*	*122.519*	*0,46*

Klasik ve İleri Biyolojik Arıtma Sistemlerinin Kıyaslaması:

Hollanda'da yapılan bir çalışmada üç kademeli biyolojik arıtma sistemi yatırım maliyetinin klasik 2. kademe biyolojik arıtma sistemi maliyeti ile karşılaştırılması Tablo 10.11'de verilmiştir. Üç kademeli reaktörün ilk kademesinde biyolojik fosfor ve KOİ giderimi yapılmakta olup, ikinci reaktör biyofilm esaslı nitrifikasyon, üçüncü reaktör ise yine biyofilm esaslı denitrifikasyon reaktörüdür.

Tablo 10.11. 100.000 kişi kapasiteli atıksu arıtma sistemi yatırım maliyeti değerleri (€) [8]

Sistem sayısı	*Klasik sistem* [a]	*Üç kademeli sistem*
Yatırım maliyeti, toplam (€)	*21.100.000*	*19.600.000*
Yatırım maliyeti, €/kişi	*465*	*432*
Yıllık yatırım maliyeti, €	*4.000.000*	*4.206.000*
Yıllık yatırım maliyeti, €/kişi	*40*	*42*
Gerekli asgari alan (m^2)	*20.000*	*7.500*

[a] *düşük yüklemelerde ve geri besleme akımlarında çalışan oksidasyon hendeği*

Verilen maliyet hesapları arazi bedelini içermemektedir. Kıyaslama Hollanda'da çok sık rastlanan düşük yüklemelerde çalışan oksidasyon hendeği ile yapılmıştır. Üç kademeli sistem, oksidasyon hendeğinin kapladığı alanın %40'ını kaplamaktadır.

Tablo 10.12'de iyileştirilmiş ve geliştirilmiş uzun havalandırmalı aktif çamur sisteminin maliyet bilgileri verilmektedir. Bu sistemde nitrifikasyon ve denitrifikasyon için anoksik ve aerobik alanlar oluşturulmakta ve reaksiyonlar aynı anda meydana gelmektedir. Bu sisteme konvansiyonel olmayan sistem denilmektedir. İşletme masraflarındaki düşüş, daha düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonu nedeniyle elektrik enerjisindeki tasarruftan kaynaklanmaktadır.

Tablo 10.12. Önde denitrifikasyonlu ve biyolojik azot giderimli sistemler için maliyet kıyaslaması [9]

Sistem sayısı	***Önde denitrifikasyonlu aktif çamur sistemi***	***Konvansiyonel olmayan (birleşik anoksik+ aerobik) sistem***
	Yatırım maliyeti ($)	
Oksidasyon reaktörü	*764.700*	*1.117.647*
Denitrifikasyon	*588.235*	*-*
Havalandırma sistemi	*400.000*	*276.470*
Geri besleme	*105.882*	*-*
Dalgıç karıştırıcı	*188.235*	*-*
Diğer[1]	*6.541.176*	*6.541.176*
Toplam	***8.588.235***	***7.935.294***
	İşletme Masrafları ($/yıl)	
Elektrik enerjisi	*705.882*	*352.941*
Diğer[1]	*887.058*	*887.058*
Toplam	***1.588.235***	***1.240.000***

[1] *Diğer: Kimyasallar, çamur uzaklaştırma, onarım, personel*

Tablo 10.13'te N ve P arıtılabilecek şekilde değiştirilen ve iyileştirilen biyolojik azot giderimi esaslı VIP prosesinin maliyet analizi verilmektedir.

Tablo 10.13. VIP prosesi maliyet verileri [10]

	Sistem 1	***Sistem 2***	***Sistem 3***	***Sistem 4***	***Sistem 5***
Toplam yapım (inşa) maliyeti, $	*53.900.000*	*65.634.000*	*250.000*	*-*	*36.000.000*
İşletme maliyeti, $/yıl	*3.261.560*	*4.546.068*	*2.021.448*	*3.616.620*	*2.932.480*
Kapasite, m^3/gün	*113.500*	*151.400*	*8.327*	*56.775*	*68.130*
Bakım-onarım fiyatı, $/yıl	*3.262.560*	*4.546.068*	*2.021.448*	*2.190.000*	*2.932.480*
Bakım-onarım, 1000 m^3/gün	*28.724*	*30.027*	*242.758*	*38.573*	*43.042*

Tablo 10.13'te verilen Sistem 3 küçük olmasına rağmen bakım ve işletme giderleri açısından daha masraflı olmaktadır. Fosforun arıtımında kimyasal çöktürme metodundan biyolojik metoda geçilmesi sonucu işletme masraflarında yılda 68.000 $ kar edilmiştir. Ancak bu sistemlerin devreye alınmasında problemlerle karşılaşılmıştır. Fosfor arıtım veriminin atıksu girişindeki BOİ/TP oranı ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür.

10.2.3. Türkiye'den Örnekler

İSKİ Master Planında Esas Alınan Genelleştirilmiş İlk Yatırım ve İşletme Maliyetleri [11]:

Atıksu Arıtımı:

İnşaat ve yıllık işletme ve bakım maliyetleri için genelleştirilmiş arıtma tesisi maliyet eğrileri Tablo 10.14'te verilen bilgilerin kendi içindeki ilişkileri kullanılarak üretilmiş ve sırasıyla Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'de gösterilmiştir. Değişik temel işlemleri ve arıtma bileşenlerini esas alan beş farklı arıtma derecesi için bunlar şu şekilde verilmiştir:

- İlk arıtma; giriş terfi merkezi, debi ölçümü, ızgaradan geçirme, kum giderme ve genel olarak binalar ve saha tanzimi kalemlerinden oluşan maliyetleri kapsamaktadır.

- Birinci derece arıtma; ilk arıtmadaki maliyet kalemlerinin yanı sıra, ön-çökeltim, klorlama ve çamurun kendi halinde bekletilerek yoğunlaştırılması, havasız çürütme ve bant filtrelerde su giderme maliyetlerini de kapsamaktadır.
- Bardenpho prosesi ise besi maddelerinin giderildiği ileri kademe (BNR-3. derece); arıtmadaki aktif çamur prosesi ile aynı temel işlemleri taşımaktadır; ancak, prosese nitrifikasyon ve denitrifikasyon için anoksik arıtma kademeleri ilave edilmiştir. Şekillerde gösterildiği gibi, üçüncü derece arıtmanın ilave edilmesi, maliyette çok az artış meydana getirmektedir. İzafi olarak küçük maliyet arıtışının sebebi, İstanbul'un atıksu arıtma tesislerinin ilave besi maddesi giderimi üniteleri düşünülerek tasarımlarının yapılmış veya yapılacak olmasıdır ve besi maddesi giderimi ünitelerini ilave etmek nispeten kolaydır.
- İleri arıtmada, besi maddesi giderimine ilaveten filtrasyon kademesi de eklenmiştir.

İşçilik, enerji, malzeme, kimyasal maddeler için harcamalar ABD'deki genel deneyimlerden faydalanılarak ayrı olarak, yıllık işletme ve bakım maliyetleri ise her bir temel işlemin maliyetlerinin toplanması ile geliştirilmiştir. Yerel birim fiyatlar bu tahminlere uygulanmış ve özellikle işgücü ile ilgili fiyatlar ve uygulamalar dikkate alınmıştır.

Birincil ve biyolojik arıtma arasında bir ara arıtma kademesi niteliği taşıyan iyileştirilmiş birincil arıtma özellikle ele alınmıştır. Pıhtılaştırma ve katı maddelerin çökeltilmesini sağlamak için kimyasal madde ilave edilmesi (< 50 mg/L $FeCl_3$ + < 1 ppm anyonik PE) BOİ gideriminde düşük maliyetli bir proses olup, biyolojik arıtma ile karşılaştırıldığında tasarruf sağlayabilecektir. Gelecekteki deniz modelleme çalışmaları, belli arıtma tesislerinin deşarjları için BOİ yüklerinin belli bir limit dahilinde sınırlanması gerektiğini gösterebilir. Bu limit, arıtma tesisi çıkış suyu kalitesi açısından birincil ve biyolojik arıtma arasına düştüğü takdirde, iyileştirilmiş birincil arıtma (veya yüksek yüklü aktif çamur sistemi) yeniden değerlendirilmelidir.

Tablo 10.14. Arıtma maliyetlerinin hesap şekli [11]

	İlk arıtma	*Birincil arıtma*	*İyileştirilmiş birincil arıtma*	*İkincil arıtma*	*Üçüncü kademe (BNR)*	*İleri arıtma*
a	*0,330*	*0,530*	*0,552*	*1,060*	*1,274*	*1,378*
b	*0,770*	*0,818*	*0,816*	*0,820*	*0,803*	*0,813*

Arıtma tesisleri inşaat maliyetleri (Milyon $) = a (Kapasite (1000 m^3/gün))^b

	İlk arıtma	*Birincil arıtma*	*İyileştirilmiş birincil arıtma*	*İkincil arıtma*	*Üçüncü kademe (BNR)*	*İleri arıtma*
a	*0,011*	*0,023*	*0,024*	*0,045*	*0,0488*	*0,054*
b	*0,793*	*0,8195*	*0,827*	*0,81*	*0,8623*	*0,863*

Arıtma tesisleri yıllık işletme ve bakım maliyeti (Milyon $) = a (Arıtılan Debi (1000 m^3/gün))^b

Arıtma tesisleri yenileme maliyetleri (Milyon $) $=$ (İnşaat maliyeti $*$ 0,2)

Hizmet süresi: 20 yıl

Mekanik ve elektrik: %20

Arıtma tesisi hurda değeri (Milyon $) $=$ ((İnşaat yılı $+$ 50 – 2040)/50) İnşaat maliyeti

Şekil 10.1. Atıksu arıtma tesisleri için inşaat maliyetleri (1998 yılı ortası kuru) [11]

Şekil 10.2. Atıksu arıtma tesisleri için yıllık işletme ve bakım maliyeti (1998) [11]

Borular ve Diğer Malzemeler:

$$\text{Yenileme maliyeti (Milyon \$)} = \text{Ardışık toplam (yeni tesisler)} * 0{,}02$$

$$\text{Yıllık işletme ve bakım maliyeti (Milyon \$)} = \text{Ardışık toplam (yeni tesisler)} * 0{,}006$$

İnşaat için genelleştirilmiş maliyet eğrilerinden elde edilen sonuçlar İstanbul'daki arıtma tesisleri için yerel maliyet tahminleri ve halen inşa halindeki arıtma tesislerinin ihale fiyatları ile karşılaştırılmıştır. Bu genelleştirilmiş maliyet eğrileri, planlama amacına yönelik yerel maliyetlerin tahmin edilmesinde yeterli fikir vermekte, kapasite ve arıtma derecelerine göre çeşitli seçenekler dahilinde arıtma tesislerinin karşılaştırılabilmesine uyumlu bir esas teşkil etmektedir.

Atıksu kanallarına ve arıtma tesislerine yapılan büyük yatırımları korumak ve biyolojik arıtma proseslerinin etkin bir şekilde işletilmesini sağlamak üzere endüstriyel atıksu ön-arıtmasının kontrolü için etkin bir program gerekmektedir. Ancak, burada endüstriyel atıksu kontrol programının kurumsal yapıda gelişmesi için herhangi bir özel maliyet dahil edilmemiştir.

Arıtma tesisindeki çamur işleme tesisi maliyeti, tesis için genelleştirilmiş yatırım maliyeti içine dahil edilirken (Şekil 9.1 ve 9.2), çamur uzaklaştırma ve işletme maliyetleri ise genelleştirilmiş işletme ve bakım maliyetleri içerisine dahil edilmiştir. Çalışma alanına özgün alternatif çamur yönetim planlarının ayrı bir değerlendirmesi ile birlikte, arıtma yeri için bireysel maliyet tahminleri yapılmamıştır. Bu tahminler nihai olarak seçilecek çamur yönetim stratejisine bağlıdır.

Çamur Arıtımı ve Uzaklaştırılması:

Genelleştirilmiş arıtma tesisi maliyetlerine ilave edilen çamur arıtma sistemlerinde, Master Plan'da önerilen arıtma derecelerinin her biri için Tablo 10.15'teki prosesler esas alınmaktadır:

Tablo 10.15. Master Plan'da önerilen çamur arıtma yöntemleri

Arıtma derecesi	*Çamur arıtma yöntemi*
İlk arıtma	*Yok*
Birinci derece arıtma	*Yerçekimi ile yoğunlaştırma*
	Bant filtre[1]
İkinci derece arıtma, üçüncü derece arıtma	*Yerçekimi ile yoğunlaştırma*
İleri arıtma	*Yüzdürme ile yoğunlaştırma*
	Havasız çürütme[2]
	Bant Filtre[2]

[1] *Birinci derece arıtmaya yönelik*
[2] *Birinci derece arıtmaya ve aktif çamur sistemlerine yönelik*

Genel arıtma tesisi maliyeti içinde öngörülen inşaat ve işletme maliyetlerinin ayrılması için aşağıdaki fonksiyon kullanılabilir:

$$C = A\,Q^{b} \qquad (10.1)$$

Burada,

Q : cinsinden ortalama atıksu debisi (m^3/gün)
C : 1000 $ cinsinden tahmini çamur maliyeti

Çeşitli arıtma dereceleri için A ve b katsayılarının değerleri aşağıda verilmiştir:

İnşaat Maliyetleri:

- Birinci kademe arıtma, A: 288519; b: 0,6463
- İkinci kademe ve daha üstü, A: 1748472; b: 0,7384

Yıllık İşletme ve Bakım Maliyetleri:

- Birinci kademe Arıtma, A : 0,5554; b: 0,8653
- İkinci kademe ve daha üstü, A : 2,3851; b: 0,8518

Atıksuların Toplanması:

Tali atıksu kanalları, kuşaklama kolektörleri, tüneller ve basınçlı hatlar için geliştirilen genel maliyet eğrileri Şekil 10.3-Şekil 10.6 ve Tablo 10.16-Tablo 10.19'da verilmiştir. Bu maliyet eğrileri öncelikle yerel birim fiyatlara ve inşaat ihalelerinde verilen fiyatlara dayanmakta ve 1993 yılı ortalarındaki fiyatları yansıtmaktadır. Gösterilen maliyetler sadece inşaatı içermekte, mühendislik hizmetleri, beklenmedik masraflar ve vergileri kapsamamaktadır. Pompa istasyonları için inşaat maliyetleri, İstanbul'da daha önce projelendirilmiş istasyonlar için yapılan maliyet tahminlerinden geliştirilmiştir.

Atıksu kanalizasyon birim maliyetleri baca ve baca kaplamalarını, boruları, birleşimleri, kazıları, döşemeyi, dolguyu, ulaşım ve sınıra kadar olan tali bağlantıları içerir. Tahminlerde, kaplamasız alanlar için olan değerler kullanılmıştır.

Yerel atıksu kanalizasyonu tali kanallar için inşaat maliyetleri, bacaların fiyatı, bağlantıları (mülkiyet sınırına kadar), yol ve kaldırımların eski haline getirilmesi dahil kanalın beher metresi için 150$ olarak tahmin edilmiştir. Yerel tali yağmursuyu drenajı için inşaat maliyetleri, yağmursuyu kanalının beher metresi için 200 $ olarak tahmin edilmiştir. Bu değerler, mühendislik hizmetlerini, beklenmedik masrafları ve vergileri kapsamamaktadır. Atıksu kolektörleri ve yağmursuyu kanalları, bilgisayar destekli tasarım yöntemine dayanarak, baca sayısını, kolektör veya kanal boyunca kazı derinliğini de dikkate alan, detaylı bir maliyet araştırması yapılarak tahmin edilmiştir.

Atıksu kanalları ve diğer borular için yıllık işletme ve bakım maliyeti, söz konusu atıksu kanalı veya boru hattının yatırım maliyetinin %0,6'sı olarak tahmin edilmektedir. Yıllık yenileme maliyeti ilk yatırım maliyetinin %2'si olarak düşünülmektedir; ancak yenileme 20 yıl sonra uygulanacaktır.

Tablo 10.16. Tali atıksu kanallarının temin ve inşaat birim fiyatları (1998 ortası kuru) [11]

Çap (cm)	*Birim*	*Kaplamasız alanlarda ($)*	*Kaplamalı alanlarda ($)*	*Malzeme cinsi*
30	*m*	*120*	*128*	*Beton*
40	*m*	*128*	*137*	*Beton*
50	*m*	*139*	*149*	*Beton*
60	*m*	*147*	*158*	*Beton*
70	*m*	*191*	*203*	*Betonarme*
80	*m*	*201*	*214*	*Betonarme*
90	*m*	*234*	*248*	*Betonarme*
100	*m*	*246*	*261*	*Betonarme*
120	*m*	*280*	*297*	*Betonarme*

Not: Yukarıdaki fiyatlara baca maliyeti, borular, bağlantı parçaları, kazı, yataklama, yerleştirme, dolgu, taşıma ve mülkiyet hududuna kadar ev bağlantıları dahil, mühendislik ve beklenmeyen giderler ile vergiler dahil değildir. Maliyet hesaplarında kaplamasız alan fiyatları kullanılmıştır.

Şekil 10.3. Tali atıksu kanallarının temin ve inşaat birim fiyatları (1998 yılı) [11]

Şekil 10.4. Kolektörlerin temin ve inşaat birim fiyatları (1998 yılı) [11]

Şekil 10.5. Tünellerin inşaat birim maliyetleri (1998 yılı) [11]

Şekil 10.6. Atıksu basınçlı boru hatları temin ve inşaat birim tahmini maliyetleri (1998 yılı) [11]

Tablo 10.17. Kolektörlerin temin ve inşaat birim fiyatları (kaplamasız alanlar; 1998 yılı) [11]

Çap (cm)	*Birim*	*Birim maliyet ($)*	*Malzeme cinsi*
140	*m*	*575*	*Betonarme*
160	*m*	*637*	*Betonarme*
180	*m*	*724*	*Betonarme*
200	*m*	*826*	*Betonarme*
220	*m*	*1047*	*Betonarme*
240	*m*	*1350*	*Betonarme*
260	*m*	*1748*	*Betonarme*
280	*m*	*2500*	*Betonarme*
300	*m*	*3000*	*Betonarme*
320	*m*	*3500*	*Betonarme*
340	*m*	*3650*	*Betonarme*
360	*m*	*3800*	*Betonarme*

Tablo 10.18. Tünellerin inşaat birim maliyetleri (1998 yılı) [11]

Çap (cm)	*Birim*	*Birim maliyet ($)*	*Malzeme cinsi*
200	*m*	*2000*	*Betonarme*
300	*m*	*3000*	*Betonarme*
380	*m*	*4000*	*Betonarme*
440	*m*	*5000*	*Betonarme*
480	*m*	*6000*	*Betonarme*
520	*m*	*7000*	*Betonarme*
560	*m*	*8000*	*Betonarme*

Tablo 10.19. Atıksu basınçlı boru hatları temini ve inşaatı için tahmini birim maliyetleri (1998 yılı) [11]

Çap (cm)	*Birim*	*Birim maliyet ($)*	*Malzeme cinsi*
15	*m*	*102*	*Düktil Font*
20	*m*	*129*	*Düktil Font*
25	*m*	*164*	*Düktil Font*
30	*m*	*243*	*Düktil Font*
40	*m*	*284*	*Düktil Font*
50	*m*	*393*	*Düktil Font*
60	*m*	*476*	*Düktil Font*
70	*m*	*239*	*Çelik*
80	*m*	*288*	*Çelik*
90	*m*	*356*	*Çelik*
100	*m*	*418*	*Çelik*
110	*m*	*474*	*Çelik*
120	*m*	*534*	*Çelik*

Deniz Deşarjları:

Deniz deşarjı hatlarının birim maliyetlerinin hesabında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$Birim\ maliyet\ (\$/m) = 3426{,}6 * e^{0{,}441D} \tag{10.2}$$

Burada D , beton kaplı çelik boru çapını (m) göstermektedir.

Terfi Merkezleri için Genel Maliyetler:

Terfi merkezleri için genelleştirilmiş yatırım maliyeti aşağıdaki formüle göre ABD ve Dünya Bankası yöntemlerine uygun olarak hesaplanmaktadır.

$$Maliyet\ (1000\ \$) = a * Q^b \tag{10.3}$$

Burada,

Q : 1000 m^3/gün olarak ortalama debi
a : 54,3
b : 0,82

İşletme ve bakım maliyetleri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Maliyet\ (1000\ \$) = b\ f_1\ e\ Q^n + b\ f_2\ l\ Q^r + m\ Q^s \tag{10.4}$$

Burada,

Q : 1000 m^3/gün olarak ortalama debi
$b\ f_1$: enerji birim fiyatı
$b\ f_2$: günlük işçilik (tekniker/teknisyen) birim fiyatı
e : 19,8
n : 0,909
l : 154
r : 0,55
m : 1,086
s : 0,82

Kullanılan katsayılar Türkiye şartlarına (1998/1999) uygundur. Atıksu terfi merkezleri için indirgenmiş nakit akışı analizlerine göre, 50 yıllık işletme dönemi analiz edilmiş ve elektro-mekanik ekipmanların 20 yılda bir yenilenmesi kabul edilmiştir [11].

Uyarı: Bu bölümde verilen maliyet verileri, çok genel ve mutlaka güncellenmesi (düzeltilmesi) gereken verilerdir. Konu hakkında daha kapsamlı ve Türkiye'ye özgü 2010 yılı güncel maliyet analizlerini içeren bilgiler Kaynak [12] Bölüm 10'dan elde edilebilir.

Problem 10.1

Yıllık Geri Ödeme miktarı hesabı: Bir kasaba, yeni kurulacak bir terfi merkezinde kullanılmak üzere temin bedeli 150000 $ ve ortalama ekonomik ömrü 10 yıl olan atıksu pompaları satın alacaktır. Bu iş için % 10 faizle banka kredisi kullanılması halinde her yıl ödenmesi gereken bedelin (yıllık yatırım maliyeti) ne olacağını hesaplayınız.

Çözüm.

n = 10 yıl ve i = % 6 için sermaye ödeme faktörü (SÖF), şimdiki değer faktörü (ŞDF) ve batık fon faktörü (BFF) değerleri Tablo a'da verilmiştir.

Tablo a. *i = % 6 için birleşik faiz faktörleri*

n (yıl)	***SÖF***	***ŞDF***	***BFF***
1	*1,06000*	*0,9434*	*1,00000*
5	*0,23740*	*0,7473*	*0,17740*
10	*0,13587*	*0,5584*	*0,07587*
15	*0,10296*	*0,4173*	*0,04296*
20	*0,08718*	*0,3118*	*0,02718*

Buna göre;

$yıllık\ geri\ ödeme\ =\ (SÖF) * (YM\ (yatırım\ maliyeti))$

$yıllık\ geri\ ödeme\ =\ (0{,}13587) * (150000)\ \approx\ 20381\ \$/yıl$

olarak hesaplanır. Bu bedel 10 yıl boyunca eşit taksitlerle kredi alınan bankaya ödenecektir. Dolardaki yıllık enflasyon da dikkate alındığında, 10 yıl sonunda ödenen toplam meblağın;

$(10) * (20381)\ =\ 203810\ \$$ *olmayacağı unutulmamalıdır.*

Konuyla ilgili başlıca örnekler Bölüm 13'te de verilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Metcalf ve Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4. Baskı, McGraw-Hill, ABD.

[2] Öztürk, İ., Dereli, R.K., Ersahin, M.E. (2015). Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği ve İyi İşletim Pratikleri, İSTAÇ Teknik Kitaplar Serisi-5, İstanbul, Türkiye.

[3] Öztürk, İ., Kınacı, C., Genceli, E.A., Özgün, H., Cüceloğlu, G., Sabuncugil, A.Ö. (2015). Çevre Ekonomisi ve Tam Maliyet Esaslı Tarife Hesabı, Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara, Türkiye.

[4] Nowak, O. (2000). Expenditure on the Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants for Nutrient Removal, Water Science and Technology, 41(9), 281-288.

[5] Bode, H., Grunebaum, T. (2000). The Cost of Municipal Sewage Treatment-Structure, Origin, Minimizitaion-Methods of Fair Cost Comparison and Allocation, Water Science and Technology, 41(9), 289-298.

[6] Balmer, P. (2000). Operation Cost and Consumption of Resources at Nordic Nutrient Removal Plants, Water Science and Technology, 41(9), 273-279.

[7] Kim, I.S., Ryu, J.Y., Lee, J.J. (1996). Status of Construction and Operation of Large Wastewater Treatment Plants in South Korea, Water Science and Technology, 33(12),11-18.

[8] Marsman, E.H., Roeleveld, P.J., Rensink, J.H. (1997). High Nutrient Removal in the Three-Sludge Sewage Treatment System: Results and Economic Evaluation, Water Science and Technology, 35(10), 129-136.

[9] Collivignarelli, C., Bertanza, G. (1999). Simultaneous Nitrification-Denitrification Processes in Activated Sludge Plants: Performance and Applicability, Water Science and Technology, 41(9), 21-28.

[10] Randall, C.W., Çokgör, E.U. (1999). Performance and Economics of BNR Plants in the Chesapeake Bay Watershed, USA, Water Science and Technology, 41(9), 21-28.

[11] IMC (1999). İSKİ Su Temini, Atıksu Toplama ve Arıtma, Yeraltısuyu Toplama ve Dere Islahları Master Planı. İstanbul Master Plan Konsorsiyumu.

[12] Öztürk, İ. (2011). Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye.

[13] Arceivala, S.J. (2002). Çevre Kirliliği Kontrolünde Atıksu Arıtımı, Tata McGraw-Hill, Türkiye.

11. ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİNDE ÖLÇÜ VE KONTROL

[1]*Elekt-Elektronik Müh. Mehmet Öztürk ve* [2]*Prof. Dr. İzzet Öztürk*

Bir proses kontrol sistemi (1) kontrol edilen proses ile, (2) kontrol düzeninin bileşiminden meydana gelir. Proses değişkenleri, kontrol sistemindeki algılayıcılar tarafından ölçülür. Ölçülen değer, iletilir, görüntülenir veya operatörün uygun proses ayarlamalarını yapabilmesi için kaydedilir. Kapalı çevrimli diğer otomatik kontrol sistemlerinde proses değişkeni önceden belirlenen bir referans değeri ile karşılaştırılır ve kontrolör görevini üstlenen mikroişlemciye (bilgisayara) iletilir. Tipik bir kontrol sistemindeki elemanlar Şekil 11.1'de görülmektedir.

Şekil 11.1. Tipik kontrol sisteminin bileşenleri [1].

11.1. Kontrol Değişkenleri

Bir atıksu arıtma tesisinde çok sayıda değişken ölçülür ve kontrol edilir. Bu değişkenler, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç gruba ayrılır. Bu değişkenlerin yaygın örnekleri aşağıda verilmiştir.

Fiziksel : Basınç, debi, sıcaklık, sıvı seviyesi, ağırlık, yoğunluk vb.

Kimyasal : pH, bulanıklık, iletkenlik, çözünmüş oksijen vb.

Biyolojik : Oksijen tüketim hızı, TOK azalma hızı, çoğalma hızı vb.

11.1.1. Birleşik Kontrol

Otomatik kontrol sistemi altı ana kısımdan oluşur:

(1) Değişkenlerin izlenmesi için ölçüm cihazları

(2) Sinyal iletim cihazı (Transmiter)

(3) Veri görüntülenmesi veya kaydı

(4) Kontrol çevrimi

(5) Kontrolör

(6) Bilgisayar/Sunucu ve merkezi kontrol odası

11.1.2. Ölçme Bölümü veya Algılayıcı Cihazlar

Algılayıcı cihazlar (sensörler) proses değişkenlerini algılayan, ölçen veya hesaplayan cihazlardır. Bir algılayıcı cihaz on-line, off-line, sürekli veya zamandan bağımsız olabilir.

[1] Elektrik-Otomasyon Mühendisliği Bölümü, Zorlu Enerji

[2] Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İTÜ.

Yaygın olarak kullanılan on-line proses ölçüm cihazları ve uygulamaları ileride Tablo 11.1'de verilmiştir.

11.1.3. Sinyal İletim Cihazları (Transmiter)

Sinyal iletim cihazları, algılayıcı cihazlardan gelen sinyalleri kayıt veya kontrol cihazına iletmek için kullanılır. Bu sinyaller mekanik, pünomatik veya elektriksel olarak iletilebilir.

11.1.4. Mekanik Sinyal İletimi

Mekanik iletim, bir kalem veya gösterge hareketi ya da bir şamandıra veya kablo ile yapılır. Bu iletim yöntemi, genellikle çalışma alanında iş görme veya kontrol biriminin yerleşimi ile sınırlanır.

11.1.5. Pünomatik Sinyal İletimi

Pünomatik iletim bir detektör ve bir kuvvetlendiriciden meydana gelir. Detektör bir delikten ibarettir. Düzenlenmiş hava girişi, daralan bir tüp boyunca bu deliğe girer. Klape delikte içeri ve dışarı doğru hareket ettikçe basınç değişimi iletilir. Deliğin arka kısmındaki küçük basınç değişimleri klapenin hareketiyle orantılıdır. Basınç değişimi düzenlenip, güçlendirilerek alıcı veya kontrol birimine gönderilir.

Pünomatik iletimin, elektrik akımı ile iletimine göre üstünlükleri;

- Elektrik çarpma tehlikesi olmayışı,
- Sıcaklık nemden daha az etkilenmesi ve
- Donma probleminin olmayışı sayılabilir.

Ayrıca daha güvenilir, daha az kompleks ve iletişimleri daha kolaydır. Ancak bununla birlikte, uzun tüplerde sinyal kaybı olması, detektör ile kontrol birimi arasında kısa aralıklar gerektirmesi (en az 300 m), temiz ve kuru hava gerektirmesi ile sızıntı problemi gibi mahzurları vardır.

11.1.6. Elektrik Akımı ile Sinyal İletimi

Sinyallerin elektrik akımı ile iletilmesi gerilim ve akım darbesi genişliği veya genliği değişimi ile gerçekleştirilir. Gerilim ve akım ile sinyal iletiminde, sinyaller miliamper seviyesinde doğrusal akım halinde veya gerilim sinyalleri halinde iletilir.

Darbe genişliği veya darbe sayısı değişimi ile sinyal iletiminde gerilimin genliği ölçülen veri süresi ile orantılıdır. Genliğin modülasyonu halinde, sinyaller normal telefon hatları ile iletilir. Sinyaller genellikle on-off veya frekans modülasyonu yöntemi ile iletilir.

Güvenilir radyo ve mikro dalga cihazlarındaki son gelişmeler, radyo/mikrodalga ile sinyal iletimini arttırmıştır. Radyo/mikrodalga özellikle veri toplama noktalarının çok fazla ve geniş alanlara yayıldığı ve telefon hatlarının mümkün olmadığı ya da pahalı olduğu yerlerde uygulanır. Radyo/mikrodalga ile sinyal iletimi şimdiki durumda pahalı olmasına rağmen özellikle büyük sistemler için kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca elektronik kontrol sistemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Bunların temel üstünlükleri;

1. Zaman kaybına yol açmaksızın çok büyük uzaklıklarda kullanılması,
2. Elektrik sinyallerin, kolaylıkla dijital bilgisayarlarla uyum içinde kullanılması,
3. Elektronik birimlerde çoklu sinyal girişlerinin rahatça kullanılması,
4. Emniyet teknikleri ile elektriksel problemlerin hemen hemen ortadan kaldırılması,
5. Elektronik aletler daha az yer tutarlar ve montajları daha ucuz olması

olarak sıralanabilir.

11.2. Arıtma Sisteminde Otomatik Kontrolle İlgili Değişik Uygulamalar

11.2.1 Proses Ölçüm Parametreleri ve Ölçüm Noktalarının Seçimi [5]

Kontrol edilecek değişkenler aşağıda verilen kategorilerde değerlendirilir:

- Giriş atıksuyunda birinci kademe arıtma işlemleri,
- Hidrolik ve katı madde dengesi,
- Geri devir debileri ve içsel geri devir kontrolleri,
- Hava ve oksijen teminleri,
- Kimyasal dozlama sistemleri (koagülan, organik karbon vb.).

Ölçüm ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması veya arızalanması gibi acil durumlarda, önceden belirlenmiş kriterlerin ssağlanması için gerekli stratejiler planlanmalıdır. Aşağıda proses bazında öngörülen ölçüm noktaları, atıksu ve çamur akımları özelinde özetlenmiştir (Şekil 11.2).

Şekil 11.2 Proses bazında öngörülen ölçüm noktaları [5]

Atıksu arıtma tesislerinde gerçek zamanlı olarak ölçülen parametreler aşağıda özetlenmektedir:

- Akış, seviye, basınç ve sıcaklık,
- pH gibi kimyasal parametreler,
- İletkenlik, redoks, çözünmüş oksijen ve bulanıklık,
- Hat üzerinde amonyak, nitrit, nitrat ve fosfat,
- Aktif çamur konsantrasyonu.

Ölçüm noktalarının seçiminde aşağıdaki hususlara uyulmalıdır:

- Proses koşulları en verimli şekilde yansıtmalıdır.
- Diğer ölçüm cihazları ile etkileşim olmamalıdır.

- Ölçüm cihazı için önerilen uzaklıklara ve yerleşime dikkat edilmelidir.
- Numune alma, ölçüm ve veri iletimi en kısa zamanda gerçekleştirmelidir.
- Numune almada gerektiğinde ön işlem (filtrasyon vb.) otomatik olarak gerçekleştirilmelidir.

Arıtma sisteminde Otomatik Kontrolle ilgili bazı uygulamalar aşağıda (Şekil 11.3-Şekil 11.9) gösterilmiştir [1]:

YB, AB	: Yüksek ve alçak basınç
DT	: Diferansiyel Transmiter
PK	: Oransal Kontrolör
M	: Motor
K	: Kayıt
A	: Diferansiyel seviye alarmı
R	: Referans basınç farkı
E	: Etkin hata
U	: Kontrol işareti
E	: Kapak açısı

Şekil 11.3. Diferansiyel basınç ölçümü ile debi kontrolü [1].

Şekil 11.4. Diferansiyel basınç ölçümüyle debi kontrolünün blok diyagramı [1].

DT	: Diferansiyel transmiter
PK	: Oransal kontrolör
BT	: Basınç transmiteri
K	: Kayıt
YBA, ABA	: Yüksek ve alçak basınç alarmı
R	: Referans basınç
P	: Basınç
Pμ	: Kaynak basıncı
E	: Etkin hata
KV	: Kontrol valfı

Şekil 11.5. Havalandırma sistemi kontrol stratejisi [1].

R	: Referans basınç
PK	: Oransal on / off kontrolörü
AYS, AAS	: Yüksek ve alçak seviye alarmı
S	: Selenoid

Şekil 11.6. Köpük pompası ve seviye kontrolü [1].

ST : Seviye transmiteri
PK : Oransal kontrolör
SD : Sürücü devre
K : Kayıt
ASA, YSA : Alçak ve yüksek seviye alarm

Şekil 11.7. Çamur pompası [1]

DT : Debi transmiteri
KCT : Katı madde transmiteri
KCM : Katı madde miktarı hesaplayıcı
K : Kaydedici
PK : Oransal kontrolör
R : Referans
SD : Sürücü devre

Şekil 11.8. Aktif çamur kontrolü [1]

DT : Debi transmiteri
K : Kayıt
KA : Klor analizörü
R : Referans
SD : Sürücü devre
M : Motor
AM : Akış miktarı hesabı
S : Selenoid
P (ID) K : PID kontrolörü
IK : Isı kontrolörü

Şekil 11.9. Klorlama tesisi [1]

P&ID'de sık kullanılan semboller listesi Şekil 11.10'da liste halinde verilmiştir.

ALC	Automatic water level controller *Otomatik su seviyesi kontrolü*
ALCR	Clorine residual analyzer *Bakiye klor analizörü*
CLRR	Chlorine residual recorder *Bakiye klor kaydedici*
ADO	Dissolved oxygen analyzer *Çözünmüş oksijen analizörü*
DOE	Dissolved oxygen element *Çözünmüş oksijen aygıtı*
DOR	Dissolved oxygen recorder *Çözünmüş oksijen kaydedici*
FE	Flow element *Debi aygıtı*
FIC	Flow indicating controller *Debi kontrolü*
FIR	Flow indicating recorder *Debi kaydedici*
FIT	Flow indicating transmitter *Debi transmitteri*
FQ	Flow totalizer *Toplam debi sayacı*
FY	User's choice *Kullanıcı tercihi*
HP	High pressure *Yüksek basınç*
HS	Hand switch *El anahtarı*
KC	Percentage timer *Zaman rölesi*
IE	UV intensity element *UV elementi*
IT	UV intensity recorder *UV kaydedici*
IR	UV intensity transmitter *UV transmitteri*
LAC	UV lamps controller *UV lambaları kontrolü*
LAH	Level alarm high *Yüksek seviye alarmı*
LAL	Level alarm low *Düşük seviye alarmı*
LC	Level controller *Seviye kontrolü*
LDAH	Differential level high alarm *Diferansiyel yüksek seviye alarmı*
LDC	Differential level control *Diferansiyel seviye kontrolü*
LDR	Differential level recorder *Diferansiyel seviye kaydedici*
LIR	Level indicating recorder *Seviye göstergesi kaydedici*
LIT	Level indicating transmitter P/I (pneumatic/current transducer) *Seviye göstergeli transmitter (P/I ile), (pünomatik/akım transmitteri)*
LP	Low pressure *Düşük basınç*
M	Motor and controller *Motor ve kontroler*
PIR	Pressure indicating recorder *Basınç göstergeli kaydedici*
PIT	Pressure indicating transmitter *Basınç göstergeli transmitter*
S	Solenoid *Selenoit*
SQRT	Squire root extractor *Karekök ekstraktörü*
SSE	Suspendid solids element *Askıda Katı Madde aygıtı*
SSR	Suspendid solids recorder *Askıda Katı Madde kaydedici*
TE	Temperature element *Sıcaklık aygıtı*
TIC	Temperature indicating controller *Sıcaklık göstergeli kontrolör*
TIR	Temperature indicating recorder *Sıcaklık göstergeli kaydedici*
TIT	Temperature indicating transmitter *Sıcaklık göstergeli transmitter*
	Sürekli çizgi merkezi kontrol panosuna monteli enstrümanı gösterir
	Kesikli çizgi sahada monteli enstrümanı gösterir

Şekil 11.10. P&ID'de sık kullanılan semboller listesi [2]

11.3. Atıksu Arıtımında Kontrol Stratejilerinin Önemi

Atıksu arıtma tesislerinin kontrolünde temel felsefe giren büyüklüklerdeki değişimlerin ve çevreden gelen bozucuların etkisini kontrol çevrimleriyle en aza indirmek ve sistemde ek kapasite sağlamaktır. Bunun için de arıtmanın dinamik davranışını iyi incelemek ve iletişim

kapasitesi konusunda bilgi toplamak gerekir. Arıtım sistemlerine ait modellerin tam kurulamamış olması biline gelen kontrol stratejilerinin bu proseslerde uygulanamamasına neden olur. Gelecekte atık suların iletiminde, yönlendirilmesinde, pompalanmasında ve kimyasal katkıların uygulanmasında kontrol çevrimlerinden daha etkin bir şekilde yararlanılacağı kesindir. Bu tür uygulamalara örnek olarak aktif çamur ve çökeltim havuzları verilebilir (Şekil 11.11).

Şekil 11.11. Atıksuların arıtımda kontrol stratejisi [1]

Bu uygulamada atık sular havuza tek bir nokta yerine farklı noktalardan dahil edilir. Bunun sonucu havuzun çeşitli noktalarında eşit şartlar sağlandığından verim artar. Ancak suyun havuza verildiği noktalardaki kapakların, havuzdaki koşullara uygun olarak ne şekilde kontrol edileceğinin ve ölçümlerin nasıl yapılacağının belirlenmesi gerekir.

Kontrol çevrimlerin çok önem taşıdığı diğer bir uygulama havasız arıtma tesislerinde görülür. Bu tür arıtmada verimin artırılması ve yan ürünlerin en yüksek seviyede tutulabilmesi ancak hassas ölçüm ve kontrol mekanizmalarının uygulamasıyla mümkündür. Atıksu arıtımında yaygın kullanılan on-line proses ölçüm cihazları ve uygulama alanları Tablo 11.1'de gösterilmiştir.

11.4. Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama (SCADA) Sistemleri

Proses (İşlem), Endüstriyel ve Bina Otomasyonunda Kullanılan Programlanabilir Kontrolörler (PLC), Döngü Kontrolörleri, Dağıtılmış Kontrol Sistemleri (DCS), I/O Sistemleri ve Akıllı Sensörler (kontrol ünitesi üzerinde bulunan) gibi çeşitli cihazlardan saha verilerini sürekli ve gerçek zamanlı olarak toplayan, tanımlanan kıstaslara göre bu bilgileri değerlendirmeye tabi tutup gerektiğinde kullanıcıya erken uyarı mesajları üreten, üretimi etkileyen çeşitli etkenlerin merkezi bir noktadan grafiksel veya eğri (trend) olarak gözetlenmesini sağlayan ve sahadaki kontrol noktalarının uzaktan denetlenebilmelerine imkân sağlamak amacıyla kullanılan sistemler Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama (SCADA "Supervisory Control and Data Acquisition") sistemi olarak tanımlanabilir [3].

SCADA sistemi, veri toplama ve telemetri (kablosuz veri aktarma)'nın bir kombinasyonudur. Veri toplama ve merkezden veri gönderme, analiz yapma ve daha sonra bu verilerin bir operatör ekranında gösterilmesi işlevlerini gerçekleştirir. SCADA sistemi saha ekipmanlarını görüntüler ve aynı zamanda denetler.

SCADA sistemleri; sistem operatörlerine (kullanıcılarına), merkezi bir kontrol noktasından geniş bir coğrafi alana petrol ve gaz alanları, boru sistemleri, su şebekeleri, termik ve hidrolik enerji üretim sistemleri ile iletim ve dağıtım tesisleri gibi alanlarda vanaları, kesicileri, ayırıcıları, elektrik makineleri, motor, elektronik, elektrohidrolik ve elektropünomatik valfler anahtarları uzaktan açıp kapama, ayar noktalarını değiştirme, alarmları görüntüleme, ısı, nem, frekans, ağırlık, sayı, elamanların durumları gibi ölçü bilgilerini toplama işlevlerini güvenilir, emniyetli ve ekonomik olarak yerine getirme avantajı sunmaktadır.

Tablo 11.1. Atıksu arıtımında yaygın kullanılan on-line ölçüm cihazları ve uygulama alanları [1]

Ölçülen değişkenler	*Cihaz*	*Ölçülen sinyal*	*Yaygın uygulama*
Debi	*Venturimetre*	*Basınç farkı*	*Gaz, sıvılar*
	Ağızlıklı debi ölçer	*Basınç farkı*	*Gaz, sıvılar*
	Orifis	*Basınç farkı*	*Gaz, sıvılar*
	Elektromanyetik ölçer	*Manyetik alan ve gerilim*	*Sıvılar, çamurlar*
	Türbin ölçer	*Pervane dönüşü*	*Temiz sıvılar*
	Akustik ölçer	*Ses dalgaları*	*Sıvılar, çamurlar*
	Parshall savağı	*Su yüzeyindeki seviye farkı*	*Sıvılar*
	Palmer-Bowlus savağı	*Su yüzeyindeki seviye farkı*	*Sıvılar Temiz*
	Savaklar	*Savaklar üzerindeki yük*	*Sıvılar*
Basınç	*Sıvı-hava diyafram*	*Bir metal diyafram üzerinde basınç dengesi*	*Basınç 0-200 KN/m^2*
	Genleşmeölçer	*Sensor boyutlarında değişme*	*Basınç 0-35000 KN/m^2*
	Körükler	*Göstergeye bağlanmış mekanik bağlantı yeri*	*Basınç 0-20000 KN/m^2*
	Bourdon tüpü	*Eğri bir tüpün dairesel olmayan en kesit alanının eğrisel hareketi*	*Basınç 0-35000 KN/m^2*
Sıvı seviyesi	*Yüzgeç*	*Sıvı yüzeyinde yüzen bir cismin hareketi*	*Sıvı yükü 0-11 m*
	Kabarcık tüpü	*Kontrollü hava kabarcığı üreten bir tüpte, dışarıdaki statik yüke göre biraz daha yüksekteki geri basıncın ölçülmesi*	*Sıvı yükü 0-56 m*
	Diyafram bulb	*Diğer taraftaki sıvı basıncının değişmesi nedeniyle diyaframın atmosfere açık kısmında basınç değişimi*	*Sıvı yükü 0-15 m*
Çamur seviyesi	*Fotosel*	*Bir çamur örtüsünden geçen ışığın karşı taraftan fotosel ile saptanması*	*Ön-çökeltim son-çökeltim yoğunlaştırıcı*
	Ultrason/Radar	*İki güç çevirici arasında iletilen ultrasonik sinyallerin saptanması*	*Ön-çökeltim son-çökeltim yoğunlaştırıcı*
Sıcaklık	*Sıcaklık pili*	*İki farklı metalden yapılmış bir devrede meydana gelen akım*	*Anaerobik çürütücü, sıcak su kazanları*
	Termal lamba	*Kapalı bir kaptaki gazın mutlak basıncının mutlak sıcaklıkla orantılı olması*	*Çamur boru hatları, su boru hatları*
	Direnç sıcaklık ölçer	*Isıya duyarlı bir elemanın elektriksel direncindeki değişme*	*Elektrik makinalarının rulman ve dönme sıcaklıkları, anaerobik çürütücüler sıcak su kazanları*

Tablo 11.1 Atıksu arıtımında yaygın kullanılan on-line ölçüm cihazları ve uygulama alanları[1] (devam)

Ölçülen değişkenler	*Cihaz*	*Ölçülen sinyal*	*Yaygın uygulama*
Hız	*Takometre (jeneratör veya drag cup tipi)*	*Gerilim, akım*	*Değişken hızlı pompa, blower veya karıştırıcı*
Ağırlık	*Hidrolik yük birimi veya genleşmeölçer*	*Bir kol veya yay mekanizması, bir diyafram boyunca iletilen basınç, sensörde boyut değişme*	*Kimyasal maddeler*
Yoğunluk	*Gamma radyasyonu*	*Radyasyon kaynağı ile detektör arasındaki sıvı tarafından gamma ışınlarının absorbsiyonu*	*Biyokütle konsantrasyonu, geri devredilen yoğunlaştırılan ve çürütülen çamurlar*
	Ultrasonik sensör	*Ultrasonik iletici ile alıcı arasındaki sıvı tarafından ultrasonik sinyallerin kaybı*	*Biyokütle konsantrasyonu, geri devir yoğunlaştırma ve çürümüş çamurlar*
pH	*Seçici iyon elektrotu*	*Hidrojen iyonu aktivitesi ile üretilen gerilim*	*Atıksu, kimyasal çözelti anaerobik çürütücü, yoğunlaştırma (su alma) çıkış suları*
Oksidasyon/ Redüksiyon potansiyeli	*Elektrot*	*Oksidasyon veya redüksiyon sebebiyle potansiyel değişimi*	*Ham atıksu havalandırma havuzunda uygun çözünmüş O_2 sağlanması anaerobik çürütücü*
Toplam çözünmüş tuzlar	*İletkenlik*	*Çözelti içerisinden elektrik akımı geçirilmesi*	*Giriş, çıkış suyu*
Çözünmüş oksijen	*Membran elektrot*	*Moleküler oksijenin indirgenmesiyle meydana gelen CO_2*	*Giriş, havalandırma havuzu, tesis çıkışı*
Toplam organik karbon	*Karbon analizörü*	*Numunenin yakılmasıyla meydana gelen CO_2*	*Tesis girişi, havalandırma havuzu girişi tesis çıkışı*
Bakiye klor	*Sensör*	*Elektrik çıkışı*	*Klor temas tankı tesis çıkışı*
Gazlar, O_2,NH_3, CT_2, H_2S, CH_4	*Sensörler*	*Elektriksel impulsları kullanılan değişik türdeki sensör modülleri*	*Kapalı binalardaki veya tesislerin etrafında zararlı (tehlikeli) durumların kontrol edilmesi*
Oksijen tüketim hızı	*Sensör kullanan respirometreler*	*Zamanla çözünmüş oksijende meydana gelen azalma*	*Havalandırma havuzu*
Anaerobik biyolojik şartlar	*Sensör, yakma*	*CO_2 ve CH_4 üretme hızı*	*Anaerobik çamur çürütücü*

Burada, mekanik ve elektronik aygıtlar arabirimlerle bağlanarak işletme fonksiyonlarını yürütürler. Denetim komutları bu düzeyde tesisin çalışmasını sağlayan elektriksel sinyallere ve makine hareketlerine dönüşür, bu dönüşümler elektronik algılayıcılar aracılığıyla toplanır. Toplanan veriler elektrik işaretlerine çevrilerek SCADA sistemine aktarılır. Aktüatörler, tahrik

motorları, vanalar, lambalar, hız ölçü cihazları, yaklaşım detektörleri, sıcaklık, kuvvet ve moment elektronik algılayıcıları burada bulunur.

SCADA sisteminden verilen komutlar, bu katmanda, elektrik işaretlerine çevrilerek, gerçek dünyada istenen hareketlerin oluşması sağlanır (vanaların açılıp-kapanması, ısıtıcıların çalıştırılıp-durdurulması gibi).

SCADA sistemi, hidroelektrik, nükleer güç üretimi, doğalgaz üretim ve işleme tesislerinde, gaz, yağ, kimyasal madde ve su boru hatlarında pompaların, valflerin ve akış ölçüm ekipmanlarının işletilmesinde, kilometrelerce uzunluktaki elektrik aktarım hatlarındaki açma kapama düğmelerinin kontrolü ve hatlardaki ani yük değişimlerinin dengelenmesi gibi çok farklı alanlarda kullanılabilmektedir.

Sistemin işletilmesinde insan çabası tek başına yetersiz kalmaktadır. Sistemde meydana gelecek olayların anında tespit edilmesi klasik yöntemler ile mümkün olmamaktadır.

Sistemin daha etkin işletilmesi için, daha güvenilir, daha ekonomik işletme için işletmede bilgisayar otomasyonuna ihtiyaç vardır. Bunun için sistem kontrol ve izleme yazılımları gerçekleştirilmiştir.

Yazılım sayesinde operatörler bilgisayar ekranındaki sistem diyagramından sistemi uzaktan kumanda edebilecektir. Arızaların algılanması yerlerinin tespiti ve arızanın giderilmesi yine uzaktan kumandalı olarak belli bir merkezden yapılabilecektir. Sistemle ilgili alarm sinyalleri operatörleri uyaracak şekilde oluşturulması ve görüntülenmesi gerçekleştirilebilecektir. Çeşitli veriler tarih ve zaman olarak (arıza şekli, arıza yeri) veri tabanı şeklinde saklanabilir. Böylelikle kişilere bağlı kalmaksızın sistem hakkında toplanan verilere dayalı ayrıntılı bilgi edinilmesi sağlanabilecektir.

Dinamik grafik çizim araçları kullanılarak izlenmesi istenen süreç gerçeğe çok yakın bir şekilde canlandırılabilmekte ve alarmlar çarpıcı hale getirilebilmektedirler. SCADA yazılımları kendi bünyelerinde bulunan çekirdek yazılımları kullanılarak grafiklerle birlikte hareket, boyutlandırma, yanıp sönme ve doldurma, boşaltma gibi operatörlerin dikkatini çekip kullanım kolaylığı sunabilecek özellikleri içermektedirler. Operatörlerin görmesini kolaylaştıracak değişik renk, boyut ve şekillerde alarm hazırlamak ve alarm durumunda alınacak acil tedbirleri ekranda göstermek mümkün olmaktadır. Klasik denetleyicilerde olduğu gibi modern SCADA sistemlerini kullanım sırasında da elle kontrol yapabilmek için grafik tetikleyicileri olarak adlandırılan yazılım parçaları kullanılmaktadır.

Herhangi bir tesiste olabilecek olan otomatik kontrol sistemlerinin kullanıcılar tarafından tek bir ekran üzerinden yönlendirilebilmesi çok arzu edilen bir durumdur. Bu sayede kullanıcıların sistemlerini yönetmeleri için, sistemin bulunduğu yere gitme zorunluluğu ortadan kalkmış ve kontrol müdahalelerini bulundukları yerde bilgisayarlar üzerinden vererek büyük kolaylıklar sağlanmış olur.

SCADA sistemi; geniş alana yayılmış üretim tesislerin bir merkezden bilgisayar aracılığı ile izlenmesi ve kumandası olarak tanımlanabilir. Temel olarak SCADA bir yazılımdır ve sistemi kontrol edecek bilgisayarla kurulur. Tek bir bilgisayar üzerinden çalışabileceği gibi büyük tesislerde bilgisayar ağı üzerinde çalışarak birden fazla kumanda ve izlemeye imkan tanır.

11.4.1. SCADA Sisteminin Temel Yapısı

SCADA sistemleri bugün birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geniş bir coğrafi alana yayılmış, bölgesel ve yerel tesislerin bir çoğunda kullanılmaktadır [3]. SCADA sisteminin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Kimya Endüstrisi

- Doğalgaz ve Petrol Boru Hatları
- Petrokimya Endüstrisi
- Elektrik Üretim ve İletim Sistemleri
- Elektrik Dağıtım Tesisleri
- Su Toplama, Arıtma ve Dağıtım Tesisleri
- Hava Kirliliği Kontrolü
- Çimento Endüstrisi
- Otomotiv Endüstrisi
- Bina Otomasyonu
- Proses Tesisleri

Türkiye'de birçok SCADA uygulamasına rastlamak mümkündür. Örneğin, İstanbul metrosunda bulunan yürüyen merdivenler, havalandırma fanları, aydınlatma sistemi, yangın ihbar ve koruma sistemleri ve enerji dağıtım sistemleri tamamen bilgisayarlarla izlenebilmekte ve gerekli müdahaleler merkezi kontrol ünitesinden yapılmaktadır.

Farklı sistemler için farklı özellikler gerekli olsa da tüm SCADA sistemleri genellikle aşağıdaki özelliklere sahiptirler [3]:

- Çoklu Kullanıcılık
- Grafik arayüzü
- İşlemlerin taklit edilmesi (benzetim)
- Gerçek zamanlı ve geçmişe yönelik izleme
- Alarm sistemi
- Veri toplama ve kayıt
- Veri analizi
- Varlık Yönetimi
- Rapor hazırlama

11.4.2. SCADA Sisteminin Katmanları

Tümleşik bir SCADA sistemi şu katmanlardan oluşur [3].

- **İşletme kontrol katmanı:** Fiziksel kontrollerin yapıldığı katmandır. Mekanik ve elektromekanik aygıtlar uzak terminal birimlerine (RTU) bağlanarak işletme fonksiyonlarını yerine getirir.
- **Süreç denetim katmanı:** İzleme ve veri toplama fonksiyonları ile tesisler ve makineler arası eş zamanlılığı sağlar. Bu katman merkezi kontrol odası ve SCADA yazılımını kapsar.
- **İşletme yönetim katmanı:** Bir üst katmanda alınmış stratejilere uygun olarak işletme kararları alarak bölümler arası işbirliği sağlar. İşletme Müdürlüğü görevini üstlenir.
- **Kaynak yönetim katmanı:** İşletmenin üretimi için gerekli kaynakların planlandığı, üretim ve hizmet stratejilerinin belirlendiği katmandır.

Son yıllarda artan rekabet ve pazar kapma mücadelesi verimliliği arttırarak piyasadan gelen değişik taleplere hızlı bir şekilde uyum sağlaması için gereklilik haline gelmiştir. Yönetim katmanında alınan kararların üretim katmanına eş zamanlı uygulanması ancak üretimden yönetime işletmenin tüm katmanlarının sağlıklı bir veri alışverişi trafiğine sahip olması ile sağlanabilir. SCADA programının İşletme Kaynakları Planlaması (Enterprise Resource Planning-ERP) yazılımlarıyla veri alışverişi yaparak sahadaki verilerin yönetime aktarılması ve yönetimce yapılan değişikliklerin sahaya yansıtılması gerekmektedir. Bu ise programlarla kullanılacak veri tabanlarının OPC, SQL veya MySQL gibi standart ve erişime açık olması ile sağlanabilir.

Şekil 11.12a. SCADA Sistemi Ekran Görüntüsü Örnekleri [4]

Şekil 11.12b. SCADA Sistemi Ekran Görüntüsü Örnekleri [4]

Şekil 11.12c. SCADA Sistemi Ekran Görüntüsü Örnekleri [4]

11.4.3. SCADA Sisteminin Temel Elemanları

Bir SCADA sistemi,

- Kontrol edilen (giriş çıkış elemanları, makine ve iş istasyonları),
- Kontrol eden (Mikrodenetleyiciler, PLC ya da Dağıtılmış Bilgisayar Sistemleri- DCS),
- SCADA yazılımı (merkezî bir bilgisayara yüklenmiş),
- Ağ elemanları (çoklu sistemler için) olarak özetlenebilir.
- SCADA yazılımları, dört katmanlı (bazı yaklaşımlara göre beş katmanlı) otomasyon piramidinin üçüncü katmanında yer alır [3].

Şekil 11.13. Bir SCADA Sisteminin Hiyerarşik Görüntüsü [3]

Yukarıdaki piramit incelendiğinde en alt kısımda üretim hatlarında makine, konveyör vb. sistemler üzerine yerleştirilmiş elemanlar bulunmaktadır. Bu elemanlar iş yapan yani kontrol edilen elemanlardır. Genellikle bir motor ya da ısıtıcı benzeri elemanlardır. Bunların yanı sıra geri besleme için kullanılan sensörler de bu kısımda yer alır. İkinci katmanda ise mikroişlemci tabanlı kontrol elemanları bulunmaktadır. Kontrol edilen elemanlara hükmetmesi ve sistemin istenen şekilde davranması bu elemanlar sayesinde olur. Bilgisayarlar ve PLC'ler endüstride en çok kullanılan sistemlerdir. Ayrıca özel olarak motor hız, konum kontrolörleri, sıcaklık denetleyicileri ve sürücüler gibi pek çok modüllerde ya tek başına ya da bilgisayar ve PLC ile birlikte kullanılmaktadır.

Piramidin ilk iki katmanı üretim yapan tüm işletmelerde kaçınılmaz olarak bulunmaktadır. Üçüncü katman ise modülümüzün konusunu teşkil eden SCADA sistemlerinin bulunduğu kısımdır. Tüm alt sistemlerin üçüncü katman tarafından izleme ve kontrolü yapılır. Dördüncü katman ise siparişten üretime, üretimden satışa kadar tüm zinciri bir bütün olarak kapsayan ve izleyebilen sistemlerdir. Böyle bir sistemde her türlü davranışa çok hızlı tepki verilebilir. Genellikle büyük ölçekli ve maliyetli üretimler (otomotiv firmaları gibi) yapan sektörler bu sistemden sonuna kadar faydalanır.

Şekil 11.14. SCADA Sistemindeki Temel Elemanlar [3]

Tipik bir SCADA donanımında; Ana Sunucu Bilgisayar ile (Server-Master), İstemci Bilgisayar (Client-Slave) arasındaki iletişim hatları ve RTU arasındaki iletişim hatları ve saha donanımından oluşur.

- Ana Sunucu – Ana Terminal (MTU): MTU (Ana Terminal Birimi) SCADA Sistemlerinde ana kontrolör görevi üstlenen ana istasyon veya bilgisayarlardır. MTU sistemi Bilgisayar tabanlı ağ yapısı üzerinde server ve client bilgisayarlar yazıcı ve diğer elemanlardan oluşur.
- Uzak Terminal Birimleri (RTU): Bir şebekede bulunan sistem değişkenlerini toplayan, gerektiğinde depolayan, ayrıca bu bilgileri kontrol merkezine, belirli bir iletişim yolu ile gönderen bir SCADA birimidir.
- İletişim Hatları: Ana merkezde bulunan MTU ile uzak bölgelerde bulunan RTU cihazları arasında bilgi alışverişi yapması için oluşturulan ağ yapılarıdır.
- Saha Donanımı: Saha ekipmanları PLC, DCS ve Akıllı elektronik kartlar olarak tanımlanır.

11.4.4. SCADA Sisteminin İşlevleri

SCADA sisteminin işlevleri şunlar olabilir:

- İzleme (monitoring) işlevleri,
- Kontrol işlevleri,
- Veri toplama,
- Verilerin kaydı ve saklanması.

SCADA sistemleri kullanarak uygulama yazılımı geliştirmek için iletişim protokollerinin tanımlanması ve veri tabanı yapısının tanımlanması gerekmektedir. İletişim protokolleri

SCADA'nın işletmedeki bilgi omurgası olması görevini yapması için birbirleri ile iletişim kurması gereken birimlerin haberleşmesini sağlamaktadır.

SCADA sisteminin gözlem ve denetim fonksiyonlarını üstlenmesi için sürece ait giriş ve çıkış bilgileri bir veri tabanında tanımlanır. Veri tabanında süreç değişkenlerine tekabül eden her bir bilgi etiket, kapı veya nokta olarak tanımlanır. Bu süreç değişkenlerinin bulunması gereken seviyelerle ilgili alarmlar ve bu değişkenlerin işlenmesi gerektiğinde kullanılacak işlem blokları veri tabanı tanımlanması fazında gerçekleştirilir [3].

11.4.5. SCADA Sisteminin Sunduğu Hizmetler

Bu sistemin sunduğu hizmetler;

- Bilgisayarlı merkezi kumanda ile sistemin bir merkezden kolaylıkla yönetimi ve izlenmesi,
- Sabit ve gezici personel sayısının azalması, personelin daha verimli alanlarda kullanılması,
- Elektrik, benzin, su, ısınma, basınçlı hava ve benzeri işletme giderlerinden tasarruf,
- Üretilen ürün veya hizmetin maliyetinin azalması, daha ucuza satılması ve kârlılık,
- Sürekli ölçüm sayesinde üretilen ürün ve hizmetin belirli kalite standartlarına uygun olması, tüketiciye ulaşan ürün ve hizmetin standartlaşması,
- İhmalden doğan arızaların en aza indirgenmesi,
- Arıza doğurabilecek durumların önceden algılanarak gerekli önlemlerin otomatik olarak alınması ve donanım korunması,
- İşletilen sistemle ilgili istatistik bilgilerin düzenli ve güvenilir bir şekilde tutulması, üst yönetime hızlı bilgi akışının sağlanması, sistemin verimli ve ekonomik çalıştırılmasıdır.
- Kullanıcı tarafından tanımlanmış işletmeye ait mimikler (işletme simülasyonu) ve mimik ekranda kullanılacak nesneler vasıtası ile işletmenin takibi (seviye, sıcaklık, basınç, sayısal sinyaller, vana ve motor durumları, sistem durumu vb.)
- Reçete ekranları vasıtasıyla reçetenin girilmesi ve işleyen reçeteler hakkında operatörlerin bilgilendirilmesi,
- Parametre ekranları vasıtasıyla, sistem için gerekli olan parametrelerin girilmesi (Setpoint, alt ve üst alarm değerleri vb.)
- PID kontrol parametrelerinin girilebilmesi ve gözetlenmesi,
- İşletme değerlerinin tarihsel ve gerçek zamanlı trendlerinin tutulması,
- Anlık ve periyodik raporların (üretim, reçete, stok vb.) otomatik olarak alınması,
- Otomatik çalışan sisteme, SCADA ekranlarından manuel müdahale yapılabilmesi,
- Alarm ve durumların (event) gösterilmesi ve yazıcıya ve/veya veri tabanına kaydedilmesi,
- İleri düzeyde kalite kontrol (örneğin istatistiksel proses kontrol- PLC) desteği [3].

11.4.6. İleri Seviye Kontrol Sistemleri

Günümüzde, yazılım ve ekipman teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte Otomasyon/SCADA sistemlerine yeni işlevsellikler eklenmiştir. Bu işlevlerin bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- SCADA sistemleri ile kurumsal yönetim sistemleri (ERP) entegre edilerek üretim planlaması daha verimli bir hale getirilebilmektedir. Örnek olarak tesiste kullanılan sarf malzemeleri takip edilerek azalmaları durumunda otomatik olarak satın alma süreci başlatılabilmektedir.
- SCADA sistemlerine entegre olarak çalışan Varlık Yönetimi ve Durum İzleme Sistemleri (Asset Management and Condition Monitoring) ile tesisteki akıllı cihazlar (enstrümanlar, kontrol vanaları, elektrik panoları, blower, türbin, pompa gibi büyük

ekipmanlar vb.) sistem tarafından, oluşabilecek arızalara karşı sürekli olarak denetlenmekte ve arızalar oluşmadan önleyici bakımlar otomatik olarak planlanabilmektedir.

- SCADA sistemine entegre olarak çalışan yazılımlar ile tesis içerisindeki kontrol döngüleri sürekli olarak arka planda test edilip ince ayarları (fine tuning) yapılabilmekte. Bu sayede kontrol vanası, VFD gibi ekipmanların daha stabil çalışmaları sağlanarak servis ömürleri uzatılabilmektedir.
- Değişken Hızlı Sürücüler (VFD) sayesinde büyük güçteki pompaların kapasiteleri istenen debi ve basınca göre ayarlanabilmekte ve bu yapılırken verimde ciddi bir kayıp yaşamadan enerjiden tasarruf edilebilmektedir.
- Mobil İletişim ve internet üzerinden toplumu ilgilendiren çevre ile ilgili veriler SCADA sistemi kullanılarak online olarak yayınlanabilmektedir. Tesiste meydana gelebilecek arıza ve alarm durumlarında uzaktan bağlantılar ile hızlı teknik destek alınabilmekte ve tesisin arıza sebebiyle duruşları minimize edilebilmektedir.
- SCADA sistemine entegre yazılımlar ile arıza durumlarında operatörleri yönlendirerek arızanın asıl kaynağının bulunmasını kolaylaştıracak analiz raporları otomatik olarak hazırlanabilmekte ve bu sayede tesisin duruş süresi ve üretim kaybı minimize edilebilmektedir.
- Büyük tesislerdeki alarm ve durum kayıtlarının yönetimi ve operatörlerin zamanında aksiyon alabilmesi ile önceliklerin düzenlenmesi için SCADA sistemine entegre yazılımlar kullanılabilmektedir.

11.5. Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramlarında (P&ID) Kullanılan Sembol ve Tanımlamalar

Proje tasarımının temel dokümanlarından olan Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramlarında (P&ID) kullanılan semboller ISA S5.1 standardı ile belirlenmiştir. Bu standarda göre kullanılan kısaltma ve sembollere ilişkin temel bilgiler aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir [1].

11.5.1. Enstrüman TAG numaraları

P &ID'lerde her enstrüman ya da işlev aşağıdaki şekilde yer aldığı gibi bir alfa numerik kodlar ile tanımlanmaktadır.

	TİPİK TAG NUMARASI
TIC 103	*- Enstrüman kimliği ya da Tag Numarası*
T 103	*- Döngü Kimliği*
103	*- Döngü Numarası*
TIC	*- İşlevse Kimlik*
T	*- İlk Harf*
IC	*- Devam eden Harfler*
	GENİŞLETİLMİŞ TAG NUMARASI
10-PAH-5A	*- Tag Numarası*
10	*- Opsiyonel Ön Ek*
A	*- Opsiyonel Son Ek*

Şekil 11.15. Tipik TAG Numaralandırma Sistemi [6]

Bu TAG numaralandırma sistemine ilişkin harf tanımlamaları standardı ve harf kombinasyonları Tablo 11.2 ve Tablo 11.3'te verilmiştir.

Tablo 11.2. TAG numaralandırma sistemindeki harflerin anlamları [6]

İlk harf	*Ölçülen ya da Değiştirilen Değişken*	*Tamamlayıcı*	*Sonraki harfler*	*Okunan ya da Pasif Çıktı İşlevi*	*Tamamlayıcı*
A	*Analysis (Analiz)*		*Alarm*		
B	*Burner, Combustion (Bürlör, Yanma)*		*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*
C	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*			*Control*	
D	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*Differential (Diferansiyel)*			
E	*Voltage (Voltaj)*		*Sensor (Primary Element) (Sensör – Ana Eleman)*		
F	*Flow Rate (Debi)*	*Ratio (Fraction) (Oran – Kesir)*			
G	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*		*Glass, Viewing Device (Cam– Gözlem Cihazı)*		
H	*Hand (El)*				*High (Yüksek)*
J	*Power (Güç)*	*Scan (Tarama)*			
K	*Time, Time Schedule (Zaman, Program)*	*Time Rate of Change (Zaman değişim oranı)*		*Control Station (Kontrol İstasyonu)*	
I	*Current (Electrical)(Akım)*		*Indicate (Gösterge)*		
L	*Level (Seviye)*		*Light (Işık)*		*Low (Düşük)*
M	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*Momentary (Anlık)*			*Middle, Intermediate (Orta Seviye)*
N	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*		*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*
O	*User's Choice (Kullanıcı Tercihi)*		*Orifice, Restriction (Orifis, Kısıtlama)*		
P	*Pressure, Vacuum (Basınç, Vakum)*		*Point (Test) Connection (Bağlantı/Test Noktası)*		
Q	*Quantity (Miktar)*	*Integrate, Totalize (Integral, Toplama)*			
R	*Radiation (Radyasyon/Işınım)*		*Record (Kayıt)*		
S	*Speed, Frequency (Hız, Frekans)*	*Safety (Güvenlik)*		*Switch (Anahtar)*	
T	*Temperature (Sıcaklık)*			*Transmit (İletim)*	
U	*Multivariable (Çoklu Değişken)*		*Multifunction (Çoklu Fonksiyon)*	*Multifunction (Çoklu Fonksiyon)*	*Multifunction (Çoklu Fonsiyon)*
V	*Vibration, Mechanical Analysis (Titreşim, Mekanik Analiz)*			*Valve, Damper, Louver (Vana, Damper, Klepe)*	
W	*Weight, Force (Ağırlık, Kuvvet)*		*Well (Kuyu)*		
X	*Unclassified (Tanımsız)*	*X Axis (X Ekseni)*	*Unclassified (Tanımsız)*	*Unclassified (Tanımsız)*	*Unclassified (Tanımsız)*
Y	*Event, State or Presence (Durum, Hall ya da yapı)*	*Y Axis (Y Ekseni)*		*Relay, Compute, Convert (Aktarma, Hesaplama, Çevirme)*	
Z	*Position, Dimension (Konum, Ölçü)*	*Z Axis (Z Ekseni)*		*Driver, Actuator, Unclassified Final Control Element (Sürücü, Aktüatör, Sınıflanmamış son kontrol elemanı)*	

Tablo 11.3. Tipik harf kombinasyonları [6]

İlk Harf	Ölçülen ya da Değiştirilen Değişken	Kontrolörler				Okuma Ekipmanı		Anahtarlar ve Alarm Cihazları			İleticiler			Solenoidler, Röleler, Hesaplayıcı Cihazlar	Ana Eleman	Test Noktası	Kuyu ya da Prob	Cam, Gözlem Cihazı	Güvenlik Cihazı	Son Eleman
		Kayıt Eden	Gösteren	Kör	Regülatör Kontrol Vanası	Kayıt Eden	Gösteren	Yüksek	Düşük	Komb.	Kayıt Eden	Gösteren	Kör							
A	Analiz	ARC	AIC	AC		AR	AI	ASH	ASL	ASHL	AR T	AIT	AT	AY	AE	AP	AW			AV
B	Brülör/Yanma	BRC	BIC	BC		BR	BI	BSH	BSL	BSHL	BRT	BIT	BT	BY	BE		BW	BG		BZ
C	(Kullanıcı Tercihi)																			
D	(Kullanıcı Tercihi)																			
E	Voltaj	ERC	EIC	EC		ER	EI	ESH	ESL	ESHL	ERT	EIT	ET	EY	EE					EZ
F	Debi	FRC	FIC	FC	FCV,	FR	FI	FSH	FSL	FSHL	FRT	FIT	FT	FY	FE	FP		FG		FV
FQ	Toplam Debi	FQRC	FQIC		FQCV	FQR	FQI	FQSH	FQSL			FQIT	FQT	FQY	FQE					FQV
FF	Debi	FFRC	FFIC	FFC		FFR	FFI	FFSH	FFSL						FE					FFV
G	(Kullanıcı Tercihi)																			
H	El		HIC	HC						HS										HV
I	Akım	IRC	IIC			IR	II	ISH	ISL	ISHL	IRT	IIT	IT	IY	IE					IZ
J	Güç	JRC	JIC			JR	JI	JSH	JSL	JSHL	JRT	JIT	JT	JY	JE					JV
K	Zaman	KRC	KIC	KC	KCV	KR	KI	KSH	KSL	KSHL	KRT	KIT	KT	KY	KE					KV
L	Seviye	LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LSH	LSL	LSHL	LRT	LIT	LT	LY	LE		LW	LG		LV
M	(Kullanıcı Tercihi)																			
N	(Kullanıcı Tercihi)																			
O	(Kullanıcı Tercihi)																			
P	Basınç/Vakum	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PSH	PSL	PSHL	PRT	PIT	PT	PY	PE	PP			PSV,	PV
PD	Basınç, Fark	PDRC	PDIC	PD C	PDCV	PDR	PDI	PDSH	PDSL		PDRT	PDIT	PDT	PDY	PE	PP			PSE	PDV
Q	Miktar	QRC	QIC			QR	QI	QSH	QSL	QSHL	QRT	QIT	QT	QY	QE					QZ
R	Işınım	RRC	RIC	RC		RR	RI	RSH	RSL	RSHL	RRT	RIT	RT	RY	RE		RW			RZ
S	Hız/Frekans	SRC	SIC	SC	SCV	SR	SI	SSH	SSL	SSHL	SRT	SIT	ST	SY	SE					SV
T	Sıcaklık	TRC	TIC	TC	TCV	TR	TI	TSH	TSL	TSHL	TRT	TIT	TT	TY	TE	TP	TW		TSE	TV
TD	Sıcaklık, Fark	TDRC	TDIC	TDC	TDCV	TDR	TDI	TDSH	TDSL		TDRT	TDIT	TDT	TDY	TE	TP	TW			TDV
U	Çoklu Değişken					UR	UI							UY						UV
V	Titreşim/Mekanik					VR	VI	VSH	VSL	VSHL	VRT	VIT	VT	VY	VE					VZ
W	Analiz	WRC	WIC	WC	WCV	WR	WI	WSH	WSL		WRT	WIT	WT	WY	WE					WZ
WD	Ağırlık/Kuvvet	WDRC	WDIC	WDC	WDCV	WDR	WDI	WDSH	WDSL	WSHL	WDRT	WDIT	WDT	WDY	WE					WDZ
X	Ağırlık/Kuvvet, Fark (Tanımsız)																			
Y	Durum/Hal/Yapı		YIC	YC		YR	YI	YSH	YSL				YT	YY	YE					YZ
Z	Konum/Ölçü	ZRC	ZIC	ZC	ZCV	ZR	ZI	ZSH	ZSL		ZRT	ZIT	ZT	ZY	ZE					ZV
ZD	Ölçme/Fark	ZDRC	ZDIC	ZDC	ZDCV	ZDR	ZDI	ZDSH	ZDSL	ZSHL	ZDRT	ZDIT	ZDT	ZDY	ZDE					ZDV

11.5.2. Enstrüman Çizgi Sembolleri

P &ID'lerde kullanılan çeşitli semboller aşağıda (Şekil 11.16-Şekil 11.22) gösterilmiştir.

Enstrüman- proses bağlantısı ya da enstrüman beslemesi	
Elektrik sinyali	
Pünomatik sinyal	
Hidrolik sinyal	
Kılcal esnek tüpler	
Elektromanyetik ya da sonik sinyal	
Sistem bağlantısı (yazılımsal veya haberleşme bağlantısı)	

Şekil 11.16. Enstrüman çizgi sembolleri [6]

	Saha	Ana panel (kontrol odası)	Yardımcı pano (saha)	P&ID kısa form
Ayrık enstrümanlar				
Kontrol sistemi				DCS
Güvenlik sistemi XXX-ESD.FAG		XXX	XXX	XXX
Çeşitli bilgisayar				
Lojik sekans ve kilitlemeler				I
Lamba / ışıklı				
Sesli alarm				

Şekil 11.17. Enstrüman işlev sembolleri [6]

ORİFİS PLAKASI	
VENTURİ METRE	
TÜRBİN METRE	
POZİTİF YER DEĞİŞTİRME TİPİ DEBİMETRE	
ULTRASONİK METRE	
ULTRASONİK METRE (BORU PARÇASI İLE BİRLİKTE)	
ROTAMETRE	

Şekil 11.18. Debimetre sembolleri [6]

Şekil 11.19. Basınç ve sıcaklık transmiteri sembolleri [6]

Şekil 11.20. Glob kontrol vanası sembolü [6]

Şekil 11.21. Tipik vana sembolleri [6]

Şekil 11.22. Tipik pompa sembolü [6]

KAYNAKLAR

[1] Eroğlu, V., Öztürk, İ. vd. (1990). Kağıt Sanayii Araştırma ve Uygulama Merkezi Kurulması Projesi, 1.Ara Rapor, Kağıt Sanayiine Bakış, İTÜ.

[2] Qasim, S. R. (1999). Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operation. Lancaster, Pa. : Technomic Pub. Co.

[3] T.C. MEB, (2014). Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri – SCADA Sistemlerine Giriş.

[4] Ataköy Biyolojik AAT SCADA Projesi Ekran Görüntüleri.

[5] Güçlü, İ.H., Öztürk İ. vd. (2012). Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü

[6] ANSI/ISA – S5.1 (1992). American National Standard Instrumentation Symbols and Identification, ISA Publications.

SİLİVRİ İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ

12. ENDÜSTRİYEL KİRLENME KONTROLÜ

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk* [2]*Dr. Ufuk Koşkan ve* [3]*Dr. Hacer Timur*

12.1. Endüstriyel Atıksu Kaynak ve Özellikleri

12.1.1. İstenmeyen Atık Özellikleri

Endüstrinin yapısı ve alıcı ortamın planlanan kullanım amacına bağlı olarak atıksudaki bazı maddelerin deşarjdan önce uzaklaştırılması gerekir. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir [2], [4]:

- ***Çözünmüş organik maddeler:*** Tüm alıcı sularda minimum çözünmüş oksijen seviyesini sağlamak üzere, alıcı ortamdaki çözünmüş organiklerin miktarları sınırlandırılmıştır.
- ***Askıda katılar:*** Hareketsiz bölgelerde katıların çökmesi su canlılarını etkiler. Organik katı içeren çamur örtüleri, bozunma sürecinde, oksijen kullanımına ve kötü kokulu gaz çıkışına neden olur.
- ***Eser organikler:*** Alıcı su, içme suyu olarak kullanılacaksa deşarj edilecek endüstriyel atıksuların fenol ve diğer tat/koku veren organik maddeleri içermemesi gerekir. Endüstriyel atıksular bu maddeler giderilmeden deşarj edilmişse ilave su arıtımı gerekir.
- ***Ağır metal, siyanür ve toksik organikler:*** Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) özel limit gerektiren toksik organik ve inorganik kimyasalların bir listesini hazırlamıştır. Öncelikli kirleticiler olarak adlandırılan bu kirleticiler Tablo 12.1'de verilmiştir.
- ***Renk ve bulanıklık:*** Bu iki parametre, değişik amaçlı su kullanımında zararlı olmamakla birlikte estetik problem arz ederler. Tekstil, maya ve kağıt üretimi gibi bazı endüstrilerde renk giderimi için henüz ekonomik olarak uygulanabilir bir yöntem geliştirilmemiştir.
- ***Azot ve fosfor:*** Atıksu, göl, gölet ve diğer rekreasyonel alanlara deşarj edilecekse azot ve fosfor, ötrofikasyonu hızlandırıp istenmeyen alg büyümesine yol açar.
- ***Biyolojik ayrışmaya dirençli (refrakter) maddeler:*** Belirli bir su kalitesi için bu tür maddeler istenmeyebilir. Deterjanlardan kaynaklanan ABS (alkil benzen sulfonat) biyolojik olarak ayrışmaz ve köpüğe neden olur. Bazı refrakter maddeler de su canlıları için toksiktir.
- ***Yağ ve yüzen maddeler:*** Estetiği bozduğundan dolayı yönetmeliklerde kısıtlama getirilmiştir.
- ***Uçucu maddeler:*** Hidrojen sülfür ve diğer uçucu organikler hava kirliliği probleminden dolayı yönetmeliklerce kısıtlanmışlardır.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.
[2] Dr., Kimya Mühendisi
[3] Dr., Kimya Mühendisi

Tablo 12.1. EPA öncelikli kirleticiler listesi *

1. Asenaphthen	*43. Bis(2-kloroetoksi) metan*	*79. Benzo(ghi)perilen (1,12-benzoperilen)*
2. Akrolein	*44. Diklorometan*	*80. Floren*
3. Akrilonitril	*45. Klorometan*	*81. Fenantren*
4. Benzen	*46. Bromometan*	*82. Dibenzo(a,h)antrasen (1,2,5,6-dibenzantrasen)*
5. Benzidin	*47. Tribromometan*	*83. Inden(1,2,3-cd) piren (2,3- o-penilenefrin)*
6. Carbontetraklorür	*48. Diklorobromometan*	*84. Piren*
7. Klorobenzen	*49. Triklorofloromet an*	*85. Tetrakloretilen*
8. 1,2,4-Triklorobenzen	*50. Diklorodiflorometan*	*86. Toluen*
9. Hexaklorobenzen	*51. Klorodibromometan*	*87. Trikloroetilen*
10. 1,2-Dikloroetan	*52. Heksaklorobütadien*	*88. Vinil klorür(kloroetilen)*
11. 1,1,1-Trikloroetan	*53. Heksaklorosiklopentadin*	*89. Aldrin*
12. Hexakloroetan	*54. Izopron*	*90. Dieldrin*
13. 1,1-Dikloroetan	*55. Naftalin*	*91. K lordan*
14. 1,1,2-Trikloroetan	*56. Nitrobenzen*	*92. 4-4'-DDT*
15. 1,1,2,2-Tetrakloroetan	*57. 2-Nitrofenol*	*93. 4,4'-DDE (p,p'-DDX)*
16. Kloroetan	*58. 4-Nitrofenol*	*94. 4,4'-DDD (p,p'-TDE)*
17. Bis(klorometil)eter	*59. 2,4-Dinitrofenol*	*95. α-Endosulfan-alfa*
18. Bis(2-kloroetil)eter	*60. 4,6-Dinitro-o-kresol*	*96. ß-Endosülfan-beta*
19. 2-Kloroetil vinil eter	*61. N -Nitrozodimetilamin*	*97. Endosülfan sülfat*
20. 2-Kloronafhalne	*62. N -Nitrozodifenilamin*	*98. Endrin*
21. 2,4,6-Triklorofenol	*63. N -Nitrozodi-n-propilamin*	*99. Endrin aldehit*
22. para-Kloro-meta-kresol	*64. Pentaklorofenol*	*100. Heptaklor*
23. Kloroform	*65. Fenol*	*101. Heptaklor epoksit*
24. Klorofenol	*66. Bis(2-etilheksil)ftalat*	*102. α-BHC-alfa*
25. 1,2-Diklorobenzen	*67. Bütil benzil ftalat*	*103. ß-BHC-beta*
26. 1,3-Diklorobenzen	*68. Di-n-bütil ftalat*	*104. γ-BHC(lindan)-gama*
27. 1,4-Diklorobenzen	*69. Di-n-aktil ftalat*	*105. δ-BHC-delta*
28. 3,3'-Diklorobenzidin	*70. Dietil ftalat*	*106. PCB-1242(Aroklor 1242)*
29. 1,1-Dikloroetilen	*71. Dimetil ftalat*	*107. PCB-1254(Aroklor 1254)*
30. 1,2-trans-Dikloroetilen	*72. Benzo(a)antrasen (1,2-benzantrasen)*	*108. PCB-1221(Aroklor 1221)*
31. 2,4-Diklorofenol	*73. Benzo(a)piren (3,4-benzopiren)*	*109. PCB-1232(Aroklor 1232)*
32. 1,2-Dikloropropan	*74. 3,4-Benzofloranten*	*110. PCB-1248(Aroklor 1248)*
33. 1,2-Dikloropropilen	*75. Benzo(k)floroanten (11,12- benzofloranten)*	*111. PCB-1260(Aroklor 1260)*
34. 2,4-Dimetilfenol	*76. Krisen*	*112. PCB-1016(Aroklor 1016)*
35. 2,4-Dinitrotoluen	*77. Asenaftalin*	*113. Toksafen 114. 2,3,7,8-*
36. 2,6-Dinitrotoluen	*78. Antrasen*	*114. Tetraklorodibenzo-p-dioksin (TCDD)*
37. 1,2-Diphenilhidrazin		
38. Etilbenzen		
39. Fluoranten		
40. 4-Klorofenil fenil eter		
41. 4-Bromofenil fenil eter		
42. Bis(2-kloroizopropil)eter		

** Türkiye'de öncelikli kirleticiler ile tehlikeli maddelerle ilgili alıcı ortam limitleri (çevresel kalite standartları), OSİB Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi ile ÇŞB (önceki ÇOB) Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevrede Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliklerinde verilmiştir.*

12.1.2. Atıksu Kaynak ve Özellikleri

Endüstriyel atıksuların kirliliği ve hacmi, üretim bazında (örneğin; m^3/ton kağıt veya kg BOİ/ton kağıt), atıksu karakterindeki değişimler ise istatistiksel dağılım ile verilir. Üretim tesislerinde atıksu akım (debi) karakterindeki değişim istatistik yöntemlerle incelenir. Bu değişimin büyüklüğü üretilen ürünün farklılığına, atıksuyun kaynaklandığı proseslere, üretimin kesikli ya da sürekli olmasına bağlıdır. Bu konuda gösterilen özen ve hassasiyet, sıçrama dökülme gibi olayları minimize edeceğinden istatistiksel değişkenleri azaltacaktır. Kesikli proseslerde tipik debi eğrileri Şekil 12.1'de, atıksu debi ve karakterindeki günlük değişimler ise Şekil 12.2'de verilmiştir.

Şekil 12.1. Kesikli bir üretimde debi değişimleri

Aynı üretimi yapan tesislerin atıksu debi ve karakterinde de değişimler olabilir. Bunun nedeni, üretim prosesindeki farklılıklar, geri kazanım uygulamaları ve bakımdır. Bu yüzden her fabrika için atıksu yükü ve değişimini saptamak üzere yeterli karakterizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Şekil 12.2. Bir domates işleme tesisinde debi ve atıksu karakterindeki günlük değişimler

12.1.2.1. Endüstriyel Atık Araştırması

Endüstriyel atık araştırması, su kullanan ve atık üreten tüm proseslerin kütle dengesini ve belirli proseslerde ve tüm tesiste atık karakteristiklerindeki değişimleri içeren bir prosedürdür. Bunun sonunda suyun korunması ve tekrar kullanımı olasılıkları ile arıtma tesisine gidecek atıksuyun debi ve kirliliğindeki değişimler belirlenir. Gerekli bilgileri minimum emek ile gerçekleştirmek için takip edilecek genel prosedür dört adımda özetlenebilir:

(1) Fabrikadaki bir mühendisin yardımı ile proses bazında kanal sisteminin haritası hazırlanır. Bu harita, örnekleme istasyonları ve beklenen atıksu debilerini içermelidir.

(2) Örnekleme ve analiz çizelgesi hazırlanır. Debiyle orantılı, sürekli örnek alınması en iyi yöntemdir ancak bu tarz örnek alma, her zaman uygun olmayabilir. Kompozit örneğin periyodu ve örnekleme sıklığı o prosese göre belirlenir. Bazı sürekli proseslerde 8, 12 veya 24 saat boyunca saatlik örnekleme yapılır. Çok dalgalanma gösteren proseslerde ise 1 veya 2 saatlik kompozit örnekler alınıp analiz edilmesi gerekebilir. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde, belli kapasitede dengeleme ve depolama kapasitesi olduğundan, daha sık örnekleme nadiren gerekir. Kesikli prosesler ise kesikli deşarj sırasında kompozitlenmelidir.
Örneklerde yapılacak analizler analizin karakterine ve amacına bağlıdır. Örneğin, pH anlık örneklerde ölçülmelidir. Çünkü bazı durumlarda kompozitleme ile çok asidik veya bazik sular nötralize olarak tasarımda yanlış bilgiye neden olabilir. Kısa kalış süreli biyolojik arıtma tesisi tasarımı söz konusu olduğunda BOİ yüklerindeki değişimler, 8 saatten daha kısa kompozit örnek alımını gerektirebilir. Havalandırmalı lagünlerde ise 24 saatlik kompozit yeterli olmaktadır. Azot ve fosfor, gerekli besin elementi ihtiyacını belirlemek amacıyla ölçülüyorsa, biyolojik sistemin belirli derecede tampon kapasitesi olduğundan, 24 saatlik kompozitte ölçülmesi yeterlidir. Biyolojik sistem için toksik deşarjlar istisnadır. Bazı toksik maddelerin tek dozu bile biyolojik prosesi bozacağından

bu tür maddelerin sürekli ölçülmesi gerekir. Toksik maddelerin mevcut olması durumunda arıtma tesisinde ayrıca dikkate alınmaları ve öncelikle kaynağında kontrolleri gerekir.

Debi ölçüm ve hesabı Bölüm 1.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

(3) Atıksu debi dengesi çizelgesi hazırlanır. Veriler toplanıp analizler yapıldıktan sonra tüm önemli atıksu kaynaklarının dikkate alındığı su denge diyagramı hazırlanır. Bir mısır işleme prosesi su denge diyagramı Şekil 12.3'te örnek olarak verilmiştir. Bu konuda daha ayrıntılı bilgi için Kaynak [1] Bölüm 5'e başvurulabilir.

Çıkış yönü	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Yıkayıcılar	Kesiciler	Tarama makinası	Tambur yıkayıcı	Kabuk giderme	Tambur soğutucu	Tutma tankı	Sarsmalı elek	Kanal	Izgara
Giriş yönü				Kanal					Izgara	Arıtma
Q, m^3/dk	0,082	0,102	0,039	0,068	0,017	0,093	0,064	0,008	0,473	0,457
BOİ, kg/g	1125	1035	176	438	275	734	84		3870	2813
KOİ, kg/g	1638	2088	250	464	392	963	86		5850	4491
AKM kg/g	819	1116	83	126	65	239	23		2475	765
UAKM, kg/g	783	1062	43	41	41	120	17		2115	855
Analizler:										
BOİ, mg/L	9830	7112	3130	4600	11300	5630	918		5730	6200
KOİ, mg/L	14000	14400	4450	4780	16100	7280	950		3670	6030
AKM, mg/L	6950	7660	1460	1300	2670	1830	250		3670	1170
UAKM, mg/L	6690	7290	760	420	1710	910	190		3140	1030

Şekil 12.3. Mısır işleme tesisi debi-madde denge diyagramı

(4) Önemli atık karakterlerindeki istatistiksel değişimler oluşturulur. Bazı atık karakteristiklerindeki değişimler atıksu arıtma tesisi tasarımında çok önemlidir. Bu tür verilerin eklenik olasılık dağılımlarını gösteren özel grafikler hazırlanmalıdır. Bu şekilde hazırlanmış bir grafik Şekil 12.4'te verilmiştir. Bu grafikler yardımıyla belli bir aşılma ihtimaline karşı gelen kirletici konsantrasyonları kolayca bulunabilir.

Şekil 12.4. Ham atıksuda BOİ ve AKM'nin eklenik olasılık dağılımı

12.1.3. Su Geri Kullanımı ve Kaynakta Atık Kontrolu

Endüstriyel proseslerde, ürün kalite kontrolü ile tekrar kullanım için üst limit belirlenir. Örneğin kağıt endüstrisi kapalı sistem su devresinde çözünmüş organik maddeler, her bir çevrimde bir miktar daha artarak birikir. Bu da kabuk kontrol maliyetini yükseltir, kağıt makinelerinin kapalı kalma sürelerini arttırır, bazı durumlarda da kağıt stoklarında renk bozulmalarına neden olur. Maksimum geri kazanım bu problemlere yol açmayacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

Geri (tekrar) kullanım söz konusu olduğunda suyun kullanılacağı amaca göre arıtma seviyeleri de farklı olur. Kağıt makineleri duş sularında püskürtme uçlarında tıkanmaya neden olmamak için tekrar kullanılacak sudaki askıdaki katıların giderilmesi gerekir. Domates işleme tesislerinde domates yıkama suyunun saf olması gerekmez, ancak mikrobiyolojik kirlenmeye yol açmamak üzere dezenfeksiyon gerekir.

Yan ürün geri kazanımı genellikle su geri kullanımı ile birlikte olur. Kağıt üretiminde elyaf geri kazanımı arıtılmış suyun tekrar kullanımına olanak verir. Kaplama tesislerinde yıkama sularının iyon değiştirmeye tabi tutulması ile tekrar kullanılabilir kromik asit elde edilir. Endüstride buna benzer birçok durum vardır.

Bira üretiminde su tasarrufu, 3. yıkamanın kaynatmada ve sonraki yıkamanın fıçı temizlemede kullanımı ve soğutma suyunun temizleme amacıyla kullanımı ile sağlanır. Toplam kirlilik yükü, atık taneciklerin yarı kuru vaziyette ayrılması, mayanın fermentörlerden filtrasyon ve kurutma için uzaklaştırılması ve soğuk depolama tanklarında çökeltinin çamur halinde uzaklaştırılması ile azaltılabilir. Birçok durumda bu operasyonlar sonucu ticari değeri olan yan ürünler elde de edilir.

Rafinerilerde kullanılmış kostik çözeltisi yüksek konsantrasyonda sülfür, merkaptan ve fenolat içerir. Bu atığın arıtma tesisine verilmeksizin bağımsız olarak arıtımı, arıtma tesisi maliyetini önemli ölçüde düşürerek ticari değeri olan ürün oluşumunu sağlayabilir.

Birçok kimyasalın üretildiği bir organik kimya endüstrisinde detaylı bir atık yükü azaltma çalışması sonucu kaynakta kirlilik kontrolü ile 42.000 m^3/gün debi ve 25.300 kg BOİ/gün'lük BOİ yükü 31.400 m^3/gün debiye ve 16.800 kg BOİ/gün'e indirilmiştir [2]. Bu sonuca ulaşmak için yapılmış çalışmalar Tablo 12.2'de verilmiştir.

Tablo 12.2. Atık yükü azaltmak için proses içi değişiklikler [2]

Değişiklik	***Açıklama***	***Toplam azalan kirlilik yükü, %***
Ekipman revizyonu ve ilavesi		*25*
Ünitenin kapatılması	*Eski ünite veya üründen dolayı ünitenin kapatılması. Bu kapatmalar kirliliğin sonucu değildir ancak kirlilikten dolayı hızlandırılmıştır.*	*10*
Sıyırıcının değiştirilmesi	*Çıkış gazlarının yakılması sırasında amin çıkışına neden olan sıyırıcının değiştirilmesi*	*3*
Ayırma, toplama ve yakma	*Belirli konsantre atıksu akımları*	*35*
Ham maddeyi değiştirme		*3*
Tekrar proses etme	*Belirli proseslerdeki yan akımları daha çok ürün geri kazanma ve atıksu akımını konsantre etmek üzere toplama ve ilave işleme tabi tutma*	
Diğer bazı projeler	*Tek tek büyük çapta atık azalmasına neden olmayacak çeşitli değişiklikler*	*21*

Proses düzenlemeleri ile bazı atıksu akımları azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir. Buna en çarpıcı örnek boyama hatlarında tasarruflu ve sprey yıkamalı tankların kullanımıdır. Bu sayede atıksu debi ve konsantrasyonunda belirgin bir düşme sağlanır. Süt endüstrisinde sızıntıları toplayacak şekilde ekipman değişiklikleri, atıksu kanalına gidecek BOİ yükünün azalmasına neden olur. Tekstil üretiminde haşıllama maddesinin değiştirilmesi arıtıma girecek net kirlilik yükünün düşmesini sağlar.

Bunların dışında çeşitli endüstrilerle ilgili birçok örnek mevcuttur. Su tekrar kullanımı ve yan ürün geri kazanımı olanakları ile ilgili olarak atıksu arıtma gereksinimleri geliştirilmeden önce ***kirlilik profili analizi*** yapılmalıdır.

Arıtma tesisi tasarım kriterleri geliştirilmeden önce bazı atıkların ayrılması dikkate alınmalıdır. Bazı eski tesislerde bu ekonomik veya mümkün değildir. Bazı atıkların birleştirilmesinin tehlike arz edeceği durumlarda ayırma gerekebilir. Örneğin kaplama endüstrisinde asidik metal banyosu atıklarının siyanürlü sularla karışması sonucunda toksik HCN oluşur.

Endüstrilerde, atıksu akımının bir bölümünün askıda katı yükünün büyük bir bölümünü oluşturması gibi durumlarda sadece atıksuyun bu bölümünde AKM giderimi yapılması gerekir.

Soğutma suları gibi kirlenmemiş sular ayrılarak alıcı ortama doğrudan deşarj edilirler.

Atıksu geri kullanımı, yan ürün geri kazanımı ve atık ayrılması, atık arıtımı proses tasarımı için temel teşkil edecek revize kütle dengesi-akış diyagramının oluşmasını sağlayacaktır.

12.2. Atıksu Arıtma Prosesleri

Şekil 12.5, çeşitli karakterde atıksuları arıtabilecek kapasiteye sahip entegre bir sistemin şematik diyagramını göstermektedir. Şekilde merkezde klasik birincil ve ikincil arıtma prosesleri bulunmaktadır. Üçüncül arıtım ve bazı atıksuları arıtan özel arıtma sistemleri de şemada yer almaktadır.

Toksik olmayan atıklar birincil ve ikincil arıtma sistemlerinde arıtabilmekte, diğer atıksular ise ancak ön arıtımdan geçirildikten sonra bu sistemlere verilmektedir. Birincil arıtımda atıksu biyolojik arıtıma uygun özelliğe getirilir. Büyük katı parçacıklar tutulur ve kum ayrılır. Dengeleme, atıksuyun debi ve konsantrasyonundaki zamana bağlı değişimleri dengeler. Gerektiğinde dengeleme tankından sonra atıksuyun pH'ı ayrıca nötralize edilir. Yağ, gres ve

askıda katılar, yüzdürme, çöktürme ve filtrasyon ile giderilir. İkincil arıtma, BOİ olarak 50-1000 mg/L aralığındaki çözünmüş organik bileşiklerin biyolojik parçalanmasıdır. Bu işlem aerobik proses olup genellikle açık ve havalandırılan havuz veya lagünlerde yapılır. Bazı durumlarda (kuvvetli organik atıksularda) atıksu, anaerobik reaktörlerde ön arıtımdan geçirilebilir. Biyolojik arıtmadan sonra mikroorganizma ve diğer askıda katılardan oluşan çamur (karışık sıvı) son çökeltim havuzunda çöktürülür. Bu çamurun bir kısmı prosese geri döndürülür, fazla çamur ise sistemden uzaklaştırılır.

Birçok arıtma sistemi, birincil ve ikincil arıtmayı içermekte olup aynı zamanda mikroorganizma için toksik olan maddeleri de giderebilmekteydi. Ancak günümüzde alıcı ortam canlıları üzerinde toksik etkisi olan öncelikli kirletici ve kalıntıları arıtabilmek önem kazandığından bunun için yeni sistemler tasarlanmalı veya kurulu sistemlere uygun yeni üniteler eklenerek mevcut sistemin kapasitesi arttırılmalıdır.

Üçüncül arıtma prosesleri, bazı özel bileşenlerin giderilmesi için biyolojik arıtmadan sonra sisteme eklenir. Örneğin filtrasyon, askıda ve kolloidal katıların gideriminde; granüler aktif karbon organiklerin adsorpsiyonunda; kimyasal oksidasyon da gene organiklerin gideriminde kullanılırlar. Üçüncül arıtma sistemleri büyük hacimlerdeki atıksuları arıtmak durumunda olduklarından dolayı oldukça pahalıdırlar. Kirleticiye özel olmadıkları için bazı durumlarda verimsiz de olabilmektedirler. Örneğin; diklorofenol, ozonlama veya granüle aktif karbon ile giderilebilir, ancak bu prosesler aynı zamanda diğer birçok organikleri de giderecektir.

Biyolojik arıtımı engelleyen ağır metal, pestisit gibi maddeler bakımından zengin atıksular için ***kaynakta arıtım*** gerekmektedir. Biyolojik olarak parçalanmayan özel maddeleri içeren daha düşük hacimli atıksuları arıtmak, seyrelmiş ancak büyük hacimli atıksuları arıtmaktan hem daha kolay, hem de daha ekonomiktir. ***Kaynakta arıtım*** için kullanılan prosesler çöktürme, aktif karbon adsorpsiyonu, kimyasal oksidasyon, hava veya buharlı sıyırma, iyon değiştirme, ters osmoz, elektrodiyaliz ve ıslak hava oksidasyonudur.

Mevcut arıtma sistemlerinin kapasitelerini arttırmak ve verimlerini yükseltmek için proseste bazı değişikliklerin yapılması, pratikte sık uygulanan bir durumdur. Bunun bir örneği mikroorganizmaların parçalayamayacağı organikleri adsorbe etmek için biyolojik arıtma sistemine toz aktif karbon ilave edilmesidir. Diğer bir örnek ise, biyolojik arıtmadan sonra atıksudaki fosfor ve kalıntı askıda katıların koagülasyonla giderimidir.

Şekil 12.5. Endüstriyel atıksu arıtımı için alternatif teknolojiler

Atıksu arıtma proseslerinin veya çeşitli proses kombinasyonlarının seçiminde aşağıdaki kriterler esas alınır;

- ***Atıksu karakteri:*** Bu, kirleticinin askıda, kolloidal veya çözünmüş, biyolojik olarak parçalanabilen gibi hangi formda olduğunu ve toksisitesini kapsamalıdır.
- ***Çıkış suyu kalitesi:*** Çıkış suyunun zehirlilik (bioassay) deney sonuçları gibi ileriye yönelik istenebilecek deşarj kısıtlamalarına da planlamada yer verilmelidir.
- ***Herhangi atıksu arıtma seçeneği için mevcut yer ve maliyet:*** İstenen arıtma verimine çoğu zaman bir veya daha fazla arıtım kombinasyonu ile ulaşılabilir. Ancak bu seçeneklerden yalnızca bir tanesi en ekonomiktir. Bu nedenle proses tasarımına geçemeden önce detaylı bir fizibilite analizi yapılmalıdır.

Birçok durumda atıksuyun özellikleri saptandıktan sonra ya belirlenen tasarım parametreleri ile ya da laboratuvar veya pilot ölçekli deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak proses tasarım kriterleri belirlenir.

Buna örnek olarak, bir tekstil fabrikası atıksuyunun arıtma sistemi tasarımı için yapılan laboratuvar çalışmaları verilebilir. Kimyasal arıtımda en uygun kimyasalı bulmak ve ulaşılabilecek optimum verimi saptamak önemlidir. Bu nedenle çeşitli kimyasalların denenmesi sonucunda alum ve kirecin birlikte kullanımında %42 KOİ giderimine ulaşılmıştır [1]. Benzer deney diğer sektörlerin atıksuları için de uygulanabilir. İkinci bir örnek de yüksek konsantrasyonlu alkaloid fabrikası atıksuyunun kimyasal arıtılmasıdır. Ancak bu durumda alum, toplam organik karbonun (TOK) %10'unu giderebilmiştir [3]. Bu atıksu için mevcut biyolojik arıtma sisteminin işletme şartları tekrar belirlenerek iyileştirme yapılmış ve 1. ve 2. kademe biyolojik arıtmada sırasıyla %88 ve %96 BOİ arıtım verimlerine ulaşılmıştır. Kimyasal arıtma uygulanmış tekstil atıksuyunun biyolojik arıtımında ise laboratuvar sonuçlarına göre %90 KOİ arıtım verimi elde edilmiştir. Bu değerleri sağlayan tasarım kriterleri belirlenerek sistemin tümünün tasarımı yapılabilmektedir.

Toksik ve toksik olmayan organik ve inorganikleri içeren kompleks kimyasal atıksuların arıtılması durumunda uygun arıtma sistemini seçebilmek için daha sıkı eleme yapmak gerekir (Şekil 12.6). Burada not edilmesi gereken önemli bir konu, biyolojik arıtmadan önce ağır metallerin giderilmesi gerektiğidir. Ağır metaller biyolojik proses için toksik olabilir ve çamurda birikebilir. Bu durum çamur uzaklaştırmada da problemlere yol açabilir.

Şekil 12.6. Endüstriyel atıksu arıtım teknolojisi seçiminde yöntem değerlendirme [2]

Kimyasal atıkların arıtım alternatifleri Tablo 12.3'te özetlenmiştir. Biyolojik atıksu arıtımı için alternatifler de Tablo 12.4'te verilmiştir. Klasik atıksu arıtma proseslerinin kullanılması durumunda ulaşılabilecek en düşük arıtılmış çıkış suyu kalitesi verileri de Tablo 12.5'te gösterilmiştir.

Tablo 12.3. Kimyasal arıtma teknolojileri [2]

Arıtma Metodu	***Atık tipi***	***İşletme şekli***	***Arıtım derecesi***	***Yorum***
İyon değişimi	*Kaplama, nükleer*	*Reçine rejenerasyonlu sürekli filtrasyon*	*Demineralize su ve ürün geri kazanımı*	*Rejenerantta nötralizasyon ve katı madde giderimi*
İndirgeme ve çöktürme	*Kaplama, ağır metal*	*Kesikli veya sürekli arıtım*	*Askıda koloidal maddelerin tam giderimi*	*Kesikli arıtma için 1 günlük kapasite; Sürekli arıtma için 3 saat kalma zamanı; Çamur uzaklaştırma veya susuzlaştırma gerekebilir.*
Koagülasyon	*Karton, rafineri, kauçuk, boya, tekstil*	*Kesikli veya sürekli arıtım*	*Askıda koloidal maddelerin tam giderimi*	*Flokülasyon ve çöktürme tankı veya çamur (blanket) yatağı; pH kontrolü gerekebilir.*
Adsorpsiyon	*Toksik ve organikler, zor ayrışan bileşikler*	*Toz karbonlu granüle kolon*	*Birçok organikte tam arıtım*	*Toz karbon aktif çamur prosesinde kullanılır*
Kimyasal oksidasyon	*Toksik ve zor ayrışan bileşikler*	*Kesikli veya sürekli ozon veya katalizlenmiş hidrojen peroksit*	*Kısmi veya tam oksidasyon*	*Organiklerin daha çok biyolojik parçalanabilir olması için kısmi oksidasyon*

Tablo 12.4. Biyolojik arıtma teknolojileri, [2]

Arıtma Metodu	*İşletme şekli*	*Arıtım derecesi*	*Alan gereksinimi*	*Ekipmanlar*	*Yorum*
Stabilizasyon havuzları	*Aralıklı veya sürekli deşarj; fakültatif veya anaerobik*	*Aralıklı*	*Kazılı toprak; 10-60 gün kalma zamanı*		*Sık olarak koku kontrolü*
Havalandırmalı lagünler	*Tam karışımlı veya fakültatif sürekli beslemeli havuzlar*	*Yazın yüksek; kışın düşük verim*	*Toprak havuz, 22,4-4,88 m derinlik; 8,55-17,1 m^2/m^3.gün*	*Sabit veya yüzen mekanik havalandırıcılar veya difüzörler*	*Lagünde katı madde giderimli; periyodik susuzlaştırma ve çamur giderimi*
Aktif çamur	*Tam karışım veya tampon akışlı; çamur geri devirli*	*%90 organik madde giderimi*	*Toprak veya beton havuz; 3,66-6,1 m derinlik; 0,561-2,62 m^3/m^3.gün*	*Difüzörlü veya mekanik havalandırıcılı; çamur ayırma ve geri devir için çöktürme*	*Fazla çamur susuzlaştırılır ve atılır*
Damlatmalı filtre	*Sürekli beslemeli; çıkış geri devri gerekebilir*	*Yüklemeye bağlı olarak kesikli veya yüksek*	*5,52-34,4 $m^2/10^3$ m^3.gün*	*6,1-12,19 m'ye kadar plastik dolgu*	*Şehir AAT veya aktif çamurdan önce ön arıtım*
Döner biyodisk	*Çok kademeli sürekli*	*Aralıklı veya yüksek*	-	*Plastik diskler*	*Çamur giderme gerekebilir*
Anaerobik reaktörler	*Geri devirli tam karışım; yukarı veya aşağı akışlı filtre, akışkan yatak; yukarı akışlı çamur yatağı*	*Aralıklı*	-	*Gaz toplama, ön arıtım gerekebilir*	-
Yağmurlama sulaması	*Aralıklı besleme*	*Tam; yeraltı suyuna sızma ve yüzey suyuna karışma*	*$6,24 * 10^{-7}$ – $4,68 * 10^{-6}$ $m^3/s.m^2$*	*Alüminyum sulama borusu ve sprey uçları; hareketli*	*Çamur ayırma gerekli, atıksudaki tuz konsantrasyonı sınırlı düzeyde*

Tablo 12.5. Atıksu arıtma proseslerinde ulaşılabilen en iyi çıkış suyu kalitesi [2]

Proses	*BOİ*	*KOİ*	*AKM*	*Azot*	*Fosfor*	*TÇK*[1]
Çökelme, % giderim	*10-30*	-	*59-90*	-	-	-
Yüzdürme, % giderim[2]	*10-50*	-	*70-95*	-	-	-
Aktif çamur, mg/L	*<25*	[3]	*<20*	[4]	[4]	-
Havalandırmalı lagün, mg/L	*<50*	-	*>50*	-	-	-
Anaerobik lagün, mg/L	*>100*	-	*<100*	-	-	-
Derin kuyu enjeksiyonu	*Atığın hepsi*	-	-	-	-	-
Karbon adsorpsiyonu, mg/L	*<2*	*<10*	*<1*	-	-	-
Denitrifikasyon-Nitrifikasyon, mg/L	*<10*	-	-	*<5*	-	-
Kimyasal çöktürme, mg/L	-	-	*<10*	-	*<1*	-
İyon değişimi, mg/L	-	-	*<1*	[5]	[5]	[5]

[1]*TÇK: Toplam çözünmüş katı*
[2]*Kimyasal kullanılması durumunda daha yüksek giderim elde edilir.*
[3]$KOİ_{giriş} – [BOİ_{u\ (giderilen)}/0,9]$
[4]$N_{giriş} – 0,054$ *(fazla biyolojik çamur) kg;* $P_{giriş} – 0,0117$ *(fazla biyolojik çamur,* P_x*) kg*
[5]*Kullanılan reçine, moleküler durum ve istenen verime bağlıdır.*

12.3. Endüstriyel Atıksu Arıtımı

12.3.1. Ön (İlk) ve Birinci Kademe Arıtım

12.3.1.1. Dengeleme

Dengelemenin amacı, atıksu karakterindeki dalgalanmaları kontrol ederek veya en aza indirerek daha sonraki arıtım prosesleri için optimum şartları sağlamaktır. Atıksu miktarı ve akımındaki değişimler göz önüne alınarak dengeleme havuzunun boyutu ve tipi belirlenir. Endüstriyel arıtmada dengelemenin amacı;

- Organik madde konsantrasyonundaki ani değişimleri dengeleyerek biyolojik arıtma sistemine şok yüklemeyi önlemek,
- Nötralizasyon için uygun pH kontrolünü sağlamak veya kimyasal ihtiyacını en aza indirmek,
- Fiziko-kimyasal arıtma sistemine aşırı atıksu girdisini en aza indirmek, kontrollü kimyasal beslemeye uygun ortam hazırlamak,
- Üretimin olmadığı zamanlarda da biyolojik arıtma sistemine sürekli besleme akımı sağlamak
- Şehir arıtma sistemine yükü eşit dağıtacak şekilde kontrollü atıksu deşarjı sağlamak.
- Toksik maddelerin biyolojik arıtma sistemine yüksek konsantrasyonda girmesini önlemek

olarak özetlenebilir.

Karıştırma, genellikle dengeleme oluşturmak ve havuzda çökebilen katıların çökelmesini önlemek için yapılır. Buna ilave olarak indirgenebilen bileşiklerin oksidasyonu veya kısmi BOİ giderimi de dengeleme tankında meydana gelebilir. Karıştırma;

- Perdeli karıştırma ve dağıtma,
- Türbin karışım,
- Difüzörle havalandırma,
- Mekanik havalandırma.

yöntemleriyle yapılabilir.

Difüzörle havalandırmada gerekli hava ihtiyacı takriben 3,74 m^3 hava/m^3 atıksu alınabilir. Dengeleme tankı, giren atıksu debisindeki değişkenliği dengelemek için değiştirilebilir hacimde tasarlanır böylece sabit bir çıkış debisi elde edilebilir. Değişken hacimli havuz düşük

hacimli atıksuların kimyasal arıtımı için de uygulanmaktadır. Bu tip havuzlar, atıksuyun doğrudan kanalizasyona deşarj edilmesi durumunda da kullanılırlar. Normalde şehir arıtma sistemine düşük debide atıksu girdisi olduğu zamanlarda yüksek debide endüstriyel atıksu deşarjı istenebilir (Şekil 12.7). 24 saat süresince sabit organik yük deşarjı, ideal bir işletme sistemidir.

Şekil 12.7. Endüstriyel ve evsel AAT'lerde saatlik debi (akım) değişimi

Dengeleme tankı ya atıksu debisi, ya da konsantrasyonunu veya her ikisini birden dengelemek üzere tasarlanabilir.

Atıksu arıtma sisteminden müsaade edilen maksimum çıkış suyu konsantrasyonu göz önüne alınarak da dengeleme tankı boyutlandırılabilir. Örneğin, aktif çamur sisteminde müsaade edilen maksimum çıkış suyu konsantrasyonu eğer 50 mg/L BOİ ise, dengeleme havuzundan deşarj edilecek maksimum debi hesaplanır ve buna göre hacim bulunur.

Hemen hemen sabit atıksu debili ve kirlilik dağılımı ~ Normal (Gauss) dağılımlı olan bir atıksu için gerekli olan dengeleme süresi:

$$t = \frac{\Delta t\,(S_i^2)}{2\,(S_e^2)} \tag{12.1}$$

Burada;

Δt : Kompozit örnekleme aralığı, saat
t : dengeleme süresi, saat
S_i^2 : Ham atıksu konsantrasyonu değişimi (standart sapmanın karesi)
S_e^2 : Muhtemel çıkış suyu konsantrasyonu değişimi, (örneğin %99 güven seviyesinde beklenen değer)

olarak tanımlanır. Aktif çamur veya havalandırmalı lagünler gibi tam karışımlı sistemler kısmen hacim dengeleme amacıyla da kullanılabilirler. Örneğin, tam karışımlı havalandırma tankında kalma zamanı 8 saat, dengeleme için gereken toplam kalma zamanı da 16 saat ise, bu durumda yalnızca 8 saatlik kalma zamanlı bir dengeleme tankına ihtiyaç olacaktır.

Endüstriyel atıksu arıtma tesisleri girişinde, ızgara ve eleklerden sonra genelde 6~8 saatlik akımı dengeleyebilecek kapasitede bir dengeleme havuzu bulundurulur.

Problem 12.1

Debisi 0,22 m^3/s olan atıksu akımının BOİ karakterizasyonu aşağıdaki şekilde verilmiştir. 17 gün boyunca her gün 4 saatlik sürede veri toplanmıştır. Atıksu akımının ortalama BOİ konsantrasyonu 690 mg/L , maksimum BOİ konsantrasyonu ise 1.185 mg/L'dir.

Aktif çamur sistemi tasarlanırken yapılan hesaplamalara göre, arıtma sistemi çıkışındaki deşarjın, deşarj standartlarını sağlaması için ($BOİ_{ort}$ 15 mg/L ve $BOİ_{maks}$ 25 mg/L), dengeleme havuzu çıkışındaki akımın BOİ konsantrasyonu 896 mg/L'den büyük olmamalıdır.

Arıtma çıkışındaki akımın, deşarj standartlarını sağlayacak özellikte olması için gerekli olan dengeleme havuzunu tasarlayınız. Hesaplamalarda, dengeleme havuzu çıkış akımındaki BOİ konsantrasyonun, %95 olasılıkla 896 mg/L'ye eşit veya küçük olması durumu hedeflenmelidir [2], [4].

Çözüm.

Giriş akımı BOİ'lerinin ortalama, standart sapma ve varyans değerleri hesaplanabilir. Bu değerler şekilden grafiksel olarak bulunabilir.

Grafikten %50 değerine karşı gelen değer:

%50 değeri ≈ $\bar{X}$ ≈ 690 mg/L

Standart sapma (S_i)'yi hesabı: BOİ değerlerinin Normal Dağılıma uyduğu kabulü ile standart sapma, S_i,

$$S_i = \frac{X_{0,84} - X_{0,16}}{2} = \frac{990 - 380}{2} = 305\, mg/L$$

Şekil a. *Örnekteki AAT'de giriş BOİ değerlerinin eklenik olasılık dağılımı grafiği*

Standart sapmanın karesi olan varyans:

$$S_i^2 = 305^2 = 93.025\ mg^2/L^2$$

Tesis deşarjındaki BOİ'nin standart sapma hesabı:

$$\bar{X} = 690\, mg/L$$

$$X_{max} = 896\, mg/L$$

Normal Olasılık Dağılım tablolarında, %95 güven seviyesinde, Z =1,65'tir.

$$S_e = \frac{X_{max} - \bar{X}}{Z} = \frac{896 - 690}{1{,}65} = 125\ mg/L$$

Bu durumda deşarjın BOİ'lerinin varyansı:

$$S_e^2 = (125)^2 = 15.625\ mg^2/L^2$$

Gerekli bekletme süresi:

$$t = \frac{\Delta t\ (S_i^2)}{2\ (S_e^2)} = \frac{4\ (93.025)}{2\ (15.625)} = 11{,}9\ sa\ \approx 0{,}5\ gün$$

12.3.1.2. Nötralizasyon

Birçok endüstrinin atıksuyu asidik veya bazik olduğundan alıcı ortama veya kimyasal ve/veya biyolojik arıtma sistemine deşarj edilmeden önce nötralize edilmeleri gerekmektedir. Biyolojik arıtma sisteminde, optimum biyolojik aktivite 6,5-8,5 pH aralığında elde edilir. Biyolojik proseste reaksiyon sonucu oluşan CO_2 tampon etkisi gösterir ve nötralizasyon meydana gelir. Bu nedenle, atıksu için gerekli nötralizasyon derecesi biyolojik arıtma sisteminde giderilen BOİ miktarına veya atıksudaki asitliğe bağlıdır.

Proses Tipleri

Asidik ve Alkali Atıksu Akımlarının Karışımı: Bu tip bir proseste istenilen nötralizasyona ulaşmak için dengelemede yeterli kalma zamanı gerekir.

Kireçtaşı Yatağında Asidik Atıksu Nötralizasyonu: Bu, aşağı veya yukarı akışlı sistem olabilir. Aşağı akışlı sistemde yeterli kalma zamanını sağlamak için gerekli maksimum hidrolik yüzey yükü $4{,}07 \times 10^{-7}$ m^3/dk m^2'dir. Asit konsantrasyonu, H2SO4'ün kabuklanmayı önlemek için kullanılması durumunda en fazla %0,6 olmalıdır. Çok sulandırma veya dolomit kireç taşının kullanılması durumunda etkin nötralizasyon için uzun kalma zamanı gerekir. Yukarı akışlı yataklarda, reaksiyon sonucu oluşan ürünün ortamda çökmeden uzaklaştırılması için hidrolik besleme hızı arttırılır. Tipik bir kireçtaşı-yatağı sistemi Şekil 12.8'de verilmektedir.

Şekil 12.8. Basitleştirilmiş kireçtaşı yatağı nötralizasyonu akış diyagramı [2].

Asidik Atıksuyun Kireç ile Karıştırılması: Bu tür nötralizasyon, kullanılan kirecin cinsine göre değişir. Kirecin yapısındaki magnezyum, kuvvetli asit çözeltisinde çok reaktif olup pH 4,2'nin altında etkindir. Kireç söndürmede reaksiyon, ısı ve karıştırma ile hızlandırılır. Reaksiyon 10 dk'da tamamlanır. Bu çözelti, nötralizasyon amacıyla kullanılmadan önce birkaç saat bekletilmelidir. NaOH, Na_2CO_3 veya NH_4OH da atıksu nötralizasyonu için kullanılabilir.

Bazik (Alkali) Atıksular: Herhangi bir kuvvetli asit, bazik atıksuyu nötr yapmada kullanılabilir. Ancak sülfürik asit veya hidroklorik asit olması durumunda fiyatın yüksekliği kullanımı kısıtlayabilir. Zira reaksiyon çok hızlıdır.

%14 ve üzeri CO_2 içeren gazlar da nötralizasyonda kullanılabilir. CO_2, atıksudan kabarcık halinde geçerken, karbonik aside dönüşür ve reaksiyona girer. Reaksiyon hızı yavaştır ancak, pH 7-8'in altına düşürülmeyecekse CO_2 kullanımı uygun olabilir. Gazın diğer bir kullanım şekli de, dolgulu kulelerde atıksu akışının tersi yönünde geçirmektir.

Kesikli arıtım, atıksu debisinin en fazla 380 m^3/gün olması durumunda kullanılabilir. Sürekli arıtımda hava, karıştırma amacıyla kullanılır ve pH kontrolü otomatik olarak yapılır. Minimum havalandırma hızı, 2,7 m sıvı derinliği için 0,3-0,9 m^3 hava/dk m^2 'dir.

Akış halindeki atıksuda otomatik pH kontrolünün, aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı bazı mahzurları vardır;

- Kuvvetli asit-kuvvetli baz nötralizasyonunda kullanılan kimyasal madde miktarı ile pH arasındaki ilişki özellikle pH=7 civarında doğrusal değildir. pH kontrolünde titrasyon eğrisi Şekil 12.9'da görüldüğü gibi çok basamaklıdır.
- Atıksu pH'ının değişim hızı 1 birim pH/dk'dır.
- Atıksu debisi birkaç dakikada iki katına ulaşabilir.
- Atıksuya ilave edilen az miktarlardaki kimyasal madde kısa zamanda ortamda tamamen dağılmalıdır.

Şekil 12.9. Kuvvetli asit için kireç-atıksu titrasyon eğrisi

Kimyasal ilavesinin adım adım yapılması daha iyi sonuçlar verir (Şekil 12.10). 1. reaksiyon tankında, pH önce 3-4'e, 2. reaksiyon tankında da 5-6'ya veya istenen pH'a yükseltilir.

Şekil 12.10. Çok kademeli nötralizasyon prosesi [2]

12.3.1.3. Yağ Ayırma

Yağ tutucuda serbest yağ tankın yüzeyine toplanır ve daha sonra sıyırma ile ortamdan uzaklaştırılır. Graviteli (tip) yağ tutucu tasarımı, çapı 0,015 cm'den büyük serbest yağ taneciklerinin giderilmesi esasına dayanır. Elde edilebilecek en düşük değer (verim); arıtılmış atıksuda 50 mg/L yağ konsantrasyonudur.

Lamelli (plakalı) yağ tutucu, paralel ve oluklu levhalardan oluşur. Plakalı yağ tutucu, 0,006 cm'den büyük yağ damlacıklarını ayırmak için tasarlanmıştır. Ham atıksuda %1'den az yağ bulunması durumunda plakalı yağ tutucu çıkışında serbest yağ konsantrasyonu 10 mg/L'ye düşmektedir. Burada problem, yüksek yağ yüklemelerinde, yağ taneciğinin kesme kuvvetinden dolayı arıtım veriminin düşmesidir. Bu durumda atıksu girişi oluklu plakanın zıttı yönünde yapılmalıdır. Böylece ayrılan yağ tanecikleri akışın tersi yönünde hareket ederek yükselir (burada plakalar 45° açılı ve 10 cm aralıklı yerleştirilir). Hidrolik yük, sıcaklık ve yağın özgül ağırlığı ile değişir. Nominal debiler, 20°C sıcaklık ve 0,9'luk özgül ağırlık içindir. 0,5 m^3/m^2 saat'lik hidrolik yüklemelerde 0,006 cm boyutundaki yağ damlacıkları tutulmaktadır. Tasarım çalışmalarında emniyet faktörü genellikle %50 uygulanır. Plakalı bir yağ tutucu sistemi Şekil 12.11'de görülmektedir.

Emülsifiye yağın serbest forma dönüşmesi için, emülsiyon özel bir işlemle kırılır ve daha sonra serbest yağ gravite, koagülasyon veya havalı yüzdürme ile tutulur. Emülsiyonun kırılması kompleks bir proses olup pratik uygulamadan önce laboratuvar veya pilot ölçekli deneylerin yapılması gerekir. Emülsiyon, kırmada birçok teknik kullanılabilir. Örneğin ***deterjan*** ile emülsiyon 5-60 dk'da ve %95-98 oranında parçalanabilir. Emülsiyon ortamı asidik yapılarak, alum veya demir tuzları eklenerek veya emülsiyon kırıcı polimerler kullanılarak kırılabilir. Ancak alum veya demir kullanmanın en önemli mahzuru daha fazla çamur oluşmasıdır.

Şekil 12.11. Ters akışlı plakalı yağ tutucu [2]

12.3.2. Kimyasal Çöktürme

12.3.2.1. Koagülasyon

Koagülasyon (pıhtılaştırma), askıda ve kolloid formdaki atık maddelerin giderilmesinde kullanılır. 1 nm (10^{-7} cm)- 0,1 nm (10-8 cm) boyuttaki parçacıklar kolloid olarak tanımlanırlar. Bu partiküller kendiliklerinden çökelmezler ve klasik fiziksel arıtma yöntemleriyle giderilemezler.

Atıksudaki kolloidler hidrofobik veya hidrofilik olabilirler. Hidrofobik kolloidler (çamur, vs.) sıvı ortama bir yakınlık göstermezler ve elektrolit ortamda kararsızdırlar. Bunlar kolayca koagüle olabilirler. Proteinler gibi hidrofilik kolloidler ise suya yakınlık gösterirler. Absorbe olan su, flokülasyonu (yumaklaştırmayı) geciktirir ve bu yüzden etkin bir koagülasyon için özel işlem gerektirir.

Kolloid maddeler elektriksel özelliğe haizdirler. Bu özellikleri itici güç oluşturarak bir araya toplanmayı ve çökelmeyi engeller. Kolloid maddelerin kararlılığı itici elektrostatik kuvvetlere, hidrofilik kolloidler durumunda ise koagülasyonu engelleyen su tabakasında çözünmeye bağlıdır.

Kolloid maddelerin kararlılığı önemli ölçüde elektrostatik yüke bağlı olduğundan koagülasyon ve flokülasyon ve koagülasyon sağlamak için bu yükün nötralizasyonu gerekir. Zeta potansiyeli, elektrostatik yükün büyüklüğü dolayısı ile stabilizasyonun derecesini ifade eder. Kolloid bir çözeltide Stabilizasyonun bozulması dolayısı ile çökelmenin sağlanması için zeta potansiyelinin düşürülmesi gerekir. Endüstriyel atıksuların çoğunda kolloid maddeler negatif yüklü olduğundan atıksuya yüksek değerlikli katyon ilavesi ile zeta potansiyeli düşürülür. Arsenik oksidin çöktürülmesinde katyon değerliğinin çöktürme gücüne etkisi aşağıdaki durumda gerçekleşir.

$Na^{+} : Mg^{2+} : Al^{3+} = 1 : 63 : 570$

Optimum koagülasyon zeta potansiyeli 0 olduğunda ortaya çıkar, Bu izoelektrik noktası olarak adlandırılır. Etkin bir koagülasyon ± 0,5 mV zeta potansiyeli aralığının üstünde oluşur. Koagülasyon prosesi mekanizması Şekil 12.12'de verilmiştir.

Şekil 12.12. Koagülasyon mekanizması

Koagülant yardımcısı olarak genellikle Fe ve Al tuzları kullanılır. Koagülant ilavesini takiben 1~3 dk hızlı, daha sonra da 20~30 dk yavaş karıştırma uygulanır. Flokları güçlendirmek üzere katyonik polimerler de kullanılabilir.

12.3.2.2. Koagülant Özellikleri

Atıksu arıtma uygulamalarında en çok kullanılan koagülant alüminyum sülfattır ($Al_2(SO_4)_3.18H_2O$). Alkali bir ortamda suya alum ilave edildiğinde aşağıdaki reaksiyon oluşur:

$$Al_2(SO_4)_3.18H_2O + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3HCaSO_4 + 2Al(OH)_3 + 18H_2O \quad (12.2)$$

Alüminyum hidroksit $Al_2O_3.x\ H_2O$ kimyasal formunda olup amfoterik yapıdadır. Yani asit ya da baz gibi davranır. Asidik şartlarda:

$$[Al^{3+}][OH^-]^3 = 1{,}9 * 10^{-33}$$

pH 4'te çözeltide 51,3 mg/L Al^{3+} mevcuttur. Alkali şartlarda ise susuz alüminyum oksit çözünür:

$$Al_2O_3 + 2OH^- \rightarrow 2AlO_2^- + H_2O \quad (12.3)$$

$$[AlO_2][H^+] = 4 * 10^{-13}$$

pH 9,0'da çözeltide 10,8 mg/L alüminyum vardır.

Alum flokları pH 7,0'de çok az çözünür. pH 7,6'nın altında flok yükü pozitif, pH 8,2'nin üstünde ise negatiftir. Bu limitler arasında flok yükü karışıktır. Bu ilişki zeta potansiyeline bağlı olarak Şekil 12.13'te verilmiştir.

Şekil 12.13. Alüminyum hidroksit için Zeta potansiyeli-pH ilişkisi

Demir tuzları da yaygın olarak kullanılan bir koagülanttır. pH 3,0-13,0 aralığında çözünmeyen sulu demir oksit oluşur:

$$Fe^{3+} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$$

$$[Fe^{3+}][OH^-]^3 = 10^{-36}$$

Asidik pH'da flok yükü pozitif, alkali pH'da negatif, pH 6,5-8,0 aralığında ise karışıktır.

Ortamda anyonların bulunması flokülasyon derecesini etkiler. Sülfat iyonu asit aralığında flokülasyonu yükseltir, alkali aralığında ise düşürür. Klorür iyonu hem asit hem bazik pH da flokülasyonu biraz yükseltir.

Kireç gerçek bir koagülant değildir ancak bikarbonat alkalinitesiyle birleşerek kalsiyum karbonat, ortofosfat ile birleşerek kalsiyum hidroksiapatit oluşturur. Magnezyum hidroksit yüksek pH seviyelerinde çöker. İyi ayırma için ortamda bir miktar jelimsi $Mg(OH)_2$ olması gerekir, ancak bu durumda oluşan çamurun susuzlaştırılması zorlaşır. Kireç çamuru genellikle sıkıştırılabilir, susuzlaştırılabilir ve tekrar kullanım için çökeltideki kalsiyum karbonatı kirece dönüştürmek üzere kalsinleştirilir.

12.3.2.3. Koagülant Yardımcıları

Bazı kimyasalların ilavesi ile daha büyük bir hızla çöken flok oluşumu dolayısıyla koagülasyon hızlanır. Aktifleştirilmiş silika çok ince alüminyum hidrat parçacıklarını birbirine bağlayan kısa zincirli bir polimerdir. Silika yüksek dozlarda, elektronegatif özelliğinden dolayı flok oluşumunu engeller. En uygun doz 5-10 mg/L'dir.

Polielektrolitler yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir. İçerdikleri adsorplanabilen gruplardan dolayı partiküller veya yüklü floklar arasında köprü oluştururlar. Alum veya demir üç klorür ile birlikte düşük dozlarda (1-5 mg/L) polielektrolit ilavesi ile büyük floklar (0,3-1 mm) oluşur. Polielektrolitler pH'dan etkilenmeksizin koloidin etkin yükünü azaltarak koagülasyonu sağlarlar. Üç tip polielektrolit vardır: katyonik polielektrolitler, negatif kolloid veya flokları adsorblar; anyonik polielektrolitler, kolloid parçacıklarda anyonik gruplarla yer değiştirerek kolloid ve polimer arasında hidrojen bağına izin verir; iyonik olmayan (naniyonik) polimerler ise katı yüzeyleri ile polimerdeki polar gruplar arasında hidrojen bağı ile parçacıkları adsorblayarak floklaşmalarını sağlar. Koagülantların yaygın uygulamaları Tablo 12.6'da verilmiştir.

Tablo 12.6. Kimyasal koagülant uygulamaları [2]

Kimyasal proses	*Doz aralığı mg/L*	*pH*	*Açıklama*
Kireç	*150-500*	*9-11*	*Kolloid koagülasyonu ve P giderimi. Düşük alkalinitede, yüksek ve değişken P. Temel reaksiyonlar:* $Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ $MgCO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCO_3$
Alum	*75-250*	*4,5-7*	*Kolloid koagülasyonu ve P giderimi. Yüksek alkalinitede, düşük ve kararlı P. Temel reaksiyonlar:* $Al(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4$
$FeCl_3$,$FeCl_2$	*35-150*	*4-7*	*Kolloid koagülasyonu ve P giderimi.*
$FeSO_4 7H_2O$	*70-200*	*4-7*	*Yüksek alkalinitede, düşük ve kararlı P. Çıkış suyunda bir miktar demirin olmasına izin veriliyorsa veya kontrol edilebiliyorsa. Ekonomik atık demir kaynağı varsa (çelik end.). Temel reaksiyonlar:* $FeCl_3 + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3HCl$
Katyonik polimer	*2-5*	*Fark yok*	*Kolloid koagülasyonu veya metalle birlikte koagülasyon yardımcısı olarak. İnert kimyasal birikimi istenmediğinde*
Anyonik ve bazı iyonik olmayan polimerler	*0,25-1,0*	*Fark yok*	*Flokülasyon ve çöktürme hızını arttırmak için yardımcı olarak ve filtrasyon için flokları güçlendirmek için.*
Ağırlaştırıcılar ve kil	*3-20*	*Fark yok*	*Çok seyreltik koloidal karışımları ağırlaştırmak için*

Koagülasyonda kompleks reaksiyonlar söz konusu olduğundan optimum pH ve koagülant dozajını tespit etmek için laboratuvar çalışmaları yapılmalıdır. Bu çalışmalar (1) Kavanoz testi, (2) Zeta potansiyeli kontrolü ile gerçekleştirilir.

Koagülasyon Ekipmanı: Endüstriyel atıkların flokülasyon ve koagülasyonu için iki temel ekipman kullanılır. Konvansiyonel sistemde hızlı karıştırma tankı bunu takiben yavaş karıştırmanın yapıldığı pedallı flokülasyon tankı bulunur. Floklaşmış karışım konvansiyonel çöktürme tankında çöktürülür. Çökebilen flokların oluşma süresini ve koagülant dozunu azaltmak için çöken çamur geri döndürülür. Böylece kimyasal madde miktarı azalır, ayrıca çamur yatağı filtre görevi görerek çıkış suyunun berraklaşmasını sağlar.

12.3.2.4. Endüstriyel Atıksularda Kimyasal Çöktürme Uygulamaları

Karton üretimi atıksuları düşük alum dozlarında koagüle edilebilir. Silika veya polielektrolit ilavesi ile hızlı çöken çamur oluşur. Kağıt ve karton üretimi atıksularının kimyasal arıtımı değerleri Tablo 12.7'de verilmiştir.

Tablo 12.7. Kağıt ve karton üretimi atıksularının kimyasal arıtımı değerleri [2]

	Giriş		*Çıkış*					*Kalma*	
Atık	*BOİ mg/L*	*AKM mg/L*	*BOİ mg/L*	*AKM mg/L*	*pH*	*Alum mg/L*	*Silika mg/L*	*süresi saat*	*Çamur %KM*
Karton		*350-450*		*15-60*		*3*	*5*	*1,7*	*2-4*
Karton		*260-600*		*35-85*				*2,0*	*2-5*
Karton	*127*	*593*	*68*	*44*	*6,7*	*10-12*	*10*	*1,3*	*1,76*
Kağıt mendil	*140*	*720*	*36*	*10-15*		*2*	*4*		
Kağıt mendil	*208*		*33*		*6,6*		*4*		

Emülsiye yağ içeren atıksular da koagülasyonla çöktürülebilirler. Emülsiyondaki yağ parçacıkları boyutu (çapı) yaklaşık 10-5 cm'dir ve adsorblanan iyonlarla stabilize olurlar. Sabunlar da emülsiyon oluştururlar. Emülsiyon $CaCl_2$ gibi bir tuz ilavesi ile veya pH'ı

düşürmeyle de kırılabilir. Temizlik sabunu ve deterjan, suda çözünebilir taşlama yağı, kesme yağı ve fosforik asit temizleyici ve çözücülerini içeren bir atıksuyun koagülasyon sonuçları Tablo 12.8a'da verilmiştir. Bu çalışmada 800 mg/L alum, 450 mg/L H_2SO_4 ve 45 mg/L polielektrolit kullanılmıştır.

Tablo 12.8a. Endüstriyel atıksuların koagülasyonu [2]

	Analiz	
	Giriş	***Çıkış***
pH	*10,3*	*7,1*
AKM, mg/L	*544*	*40*
Yağ ve gres, mg/L	*302*	*28*
Fe, mg/L	*17,9*	*1,6*
PO_4, mg/L	*222*	*8,5*

Tablo 12.8b. Endüstriyel atıksuların koagülasyonu [2]

	Analiz	
	Giriş	***Çıkış***
ABS	*63*	*0,1*
BOİ	*243*	*90*
KOİ	*512*	*171*
PO_4	*267*	*150*
$CaCl_2$	*480*	
Katyonik sülfatlar	*88*	
pH	*7,1*	*7,7*

Tablo 12.8c. Endüstriyel atıksuların koagülasyonu [2]

	Analiz	
	Giriş	***Çıkış***
BOİ	*1070*	*90*
KOİ	*4340*	*178*
Toplam katı	*2550*	*446*

Atıksudaki anyonik yüzey maddeleri koagülant dozunu arttırır. Endüstriyel çamaşırhane atıksuları H_2SO_4, kireç ve alum ile muamele edildiğinde KOİ 12.000 mg/L'den 1.800 mg/L'ye, AKM 1.620 mg/L'den 105 mg/L'ye düşer. Kullanılan kimyasal madde dozları: 1.400 mg/L H_2SO_4, 1.500 mg/L kireç ve 300 mg/L alum, çöken çamur hacmi ise %25 dir.

Sentetik deterjan içeren çamaşırhane atıksuları anyonik deterjanı nötralize etmek için katyonik sürfaktanlarla koagüle edilir, bunu takiben de flokülasyon için gerekli kalsiyum fosfat çökeltisi oluşturmak üzere kalsiyum tuzu ilave edilir. Elde edilen tipik sonuçlar Tablo 12.8b'de verilmiştir.

Lateks üretiminden kaynaklanan polimer atıksuları 500 mg/L demir klorür ve 200 mg/L kireç ile pH 9,6'da koagüle edildiğinde %75 KOİ, %94 BOİ giderimi sağlandığı belirtilmiştir (başlangıç KOİ=1000 mg/L, BOİ= 120 mg/L). Arıtılan 1 m^3 atıksu için 12 kg, ağırlıkça %1,2 katı içeren çamur oluşmuştur. Lateks temelli boya üretiminden kaynaklanan atıksular 345 mg/L alum ile pH=3,0-4,0 aralığında koagüle edildiğinde arıtılan 1 m^3 atıksu için 2,5 kg ağırlıkça % 2,95 katı içeren çamur oluştuğu belirtilmiştir. Arıtım sonuçları Tablo 12.8c'de verilmiştir.

Tekstil endüstrisi atıksularının koagülasyon sonuçları Tablo 12.9'da, *Kağıt endüstrisi atıksularında* renk giderimi uygulamaları sonuçları ise Tablo 12.10'da verilmiştir.

Tablo 12.9. Tekstil endüstrisi atıksularının koagülasyonu [2]

Tesis	*Koagülant*	*Doz*	*pH*	*Renk*		*KOİ*	
				Giriş	*Giderim*	*Giriş*	*Çıkış*
1	*$Fe(SO_4)_3$*	*250*	*7,5-11*	*0,25*	*90*	*584*	*33*
	Alum	*300*	*5,9*		*86*		*39*
	Kireç	*1200*			*68*		*30*
2	*$Fe(SO_4)_3$*	*500*	*3-4,6-11*	*0,74*	*89*	*840*	*49*
	Alum	*500*	*8,5-10*		*89*		*40*
	Kireç	*2000*			*65*		*40*
3	*$Fe(SO_4)_3$*	*250*	*9,5-11*	*1,84*	*95*	*825*	*38*
	Alum	*250*	*6-9*		*95*		*31*
	Kireç	*600*			*78*		*50*
4	*$Fe(SO_4)_3$*	*1000*	*9-11*	*4,60*	*87*	*1570*	*31*
	Alum	*750*	*5-6*		*89*		*44*
	Kireç	*2500*			*87*		*44*

Çamaşırhane atıksuları ile pH 6,4-6,6 aralığında, 0,24 kg $Fe_2(SO_4)_3/m^3$ atıksu dozajında %90 BOİ giderimi sağlanmıştır.

Tablo 12.10. Kağıt endüstrisi atıksularında renk giderimi [2]

Tesis	*Koagülant*	*Doz*	*pH*	*Renk*		*KOİ*	
				Giriş	*Giderim*	*Giriş*	*Çıkış*
1	*$Fe(SO_4)_3$*	*500*	*3,5-4,5*	*2250*	*92*	*776*	*60*
	Alum	*400*	*4,0-5,0*		*92*		*53*
	Kireç	*1500*			*92*		*38*
2	*$Fe(SO_4)_3$*	*275*	*3,5-4,5*	*1470*	*91*	*480*	*53*
	Alum	*250*	*4,0-5,5*		*93*		*48*
	Kireç	*1000*			*85*		*45*
3	*$Fe(SO_4)_3$*	*250*	*4,5-5,5*	*940*	*85*	*468*	*53*
	Alum	*250*	*5,0-6,5*		*91*		*44*
	Kireç	*1000*			*85*		*40*

Ağır Metal Giderimi: Atıksulardaki ağır metaller, kireç veya kostik ilavesi ile çözünürlüklerinin en düşük olduğu pH'da metal hidroksitleri şeklinde çöktürülürler. Bu maddelerin çoğu amfoterik olup çözünürlükleri çok düşüktür. Çözünürlüğün minimum olduğu pH Şekil 12.14'te görüldüğü gibi metalden metale farklılık gösterir.

Krom ve çinkonun sırasıyla pH 7,5 ve 10,2'de çözünürlükleri minimumdur. Dolayısı ile bu pH değerinin üstünde çözeltideki miktarları yükselir.

Metal içeren endüstriyel atıksuların arıtımında metallerin çökmesine engel olabilecek maddelerin ön arıtım ile giderilmesi gerekir. Siyanür ve amonyak, bir çok metalle kompleks oluşturarak metal giderimini engeller. Siyanür alkali ortamda klorlama ile veya karbon üzerine katalitik oksidasyon prosesi ile giderilebilir. Nikel ve gümüş metal komplekslerinin reaksiyon hızı düşük olduğundan bu metalleri içeren siyanürlü atıkların alkali ortamda klorlanması çok güçtür. $[Fe(CN)_6^{4-}]$, $[Fe(CN)_6^{3-}]$'e dönüşür, bu form da daha ileri okside olmaz. Atıksudaki amonyak; amonyak sıyırma, kırılma noktası klorlaması veya diğer uygun yöntemlerle giderildikten sonra metal giderimi uygulanır.

Endüstriyel atıksulardaki ağır metaller kireçle çöktürülerek giderilebilirler. Ağır metaller, metal sülfürleri veya karbonatları şeklinde de çöktürülebilirler.

Şekil 12.14. Hidroksit ve sülfür formunda ağır metal giderimi [4]

Düşük deşarj limitlerini karşılamak için çöktürme sonrası deşarj edilecek sıvı fazdaki flokları tutmak üzere filtrasyon gerekebilir. Sadece çöktürme ve durultma ile çıkış suyundaki metal konsantrasyonu 1-2 mg/L'ye düşebilir. Filtrasyon ile metal konsantrasyonu 0,5 mg/L'nin altına düşürebilir.

Krom: Kromlu atıklarda, 6 değerlikli kromun önce Cr^{3+}'e indirgenip sonra kireç ile çöktürülmesi önerilir. Bu reaksiyon pH <3'te gerçekleşir. Kromlu atıkların indirgenmesinde demir (II) sülfat, sodyum meta-bisülfit ve kükürt dioksit kullanılır. Demir (II) sülfat ve sodyum meta-bisülfit kuru veya çözelti halinde kullanılır. Kükürt dioksit ise sisteme gaz halinde tatbik edilir. Kromun indirgenmesi, asit ortamda daha etkili olduğundan asit karakterli indirgeme maddelerinin kullanımı tercih edilir. İndirgeme maddesi olarak $FeSO_4$ kullanıldığında Fe^{2+} Fe^{3+}'e oksitlenir; meta-bisülfit veya sülfür dioksit kullanıldığında ise SO^{2-}, SO_4^{2-}'a dönüşür. Genel reaksiyonlar:

$$Cr^{6+} + Fe^{2+} \text{ veya } Na_2S_2O_3 + H^+ \rightarrow Cr^{3+} + Fe^{3+} \text{ veya } SO_4^{2-} \quad (12.4)$$

$$Cr^{3+} + 3OH^- \rightarrow Cr(OH)_3 \downarrow$$

Cr^{6+}'nın Cr^{3+}'e indirgenmesi için, $FeSO_4$'ün o seyreltideki asidik etkisi yeterli olmadığından pH ayarlaması için asit ilave edilmesi gerekir.

Küçük kaplama tesislerinin genellikle günlük atıksu debileri 115 m^3/gün'ün altındadır. Bu tesislerde en ekonomik sistem, her biri bir günlük atıksu kapasitesinde iki tanklı kesikli sistemdir. Tanklardan biri dolarken diğerinde arıtma yapılır. Biriken çamur ya doğrudan uzaklaştırılır ya da kurutma yataklarında susuzlaştırılır. Kurutma yatağında çamur 48 saatte sıyrılabilecek kıvama gelir. Tipik bir kesikli sistem şematik görünümü Şekil 12.15'te verilmiştir.

Şekil 12.15. Kromlu atıksuların kesikli arıtımı

Günlük atıksu debisi 115-150 m^3/gün'ü geçerse büyük tank ihtiyacından dolayı kesikli arıtım ekonomik olmaz. Sürekli sistem, asitleme-indirgeme tankı, kireç ilavesinin yapıldığı karıştırma tankı ve çöktürme tankı gerektirir. İndirgeme tankındaki hidrolik kalış süresi pH'a bağlı olup, tam indirgenme için gerekli teorik sürenin en az dört katı olmalıdır. Flokülasyon için 20 dakika yeterlidir. Son çöktürme tankı yüzey yükü 20 m^3/m^2/gün'ün üstünde tasarlanmamalıdır.

Yıkama sularında krom miktarı çok değişkense, indirgeme tankı öncesi dengeleme yapılmalıdır, böylece kimyasal madde besleme sistemi daha etkin işletilebilir.

Problem 12.2

49 mg/L Cr^{6+}, 11 mg/L Cu ve 12 mg/L Zn içeren 114 m^3/gün debiye sahip bir tesiste metaller SO_2 kullanılarak (sülfür çöktürmesi ile) arıtılmaktadır. Atıksuyu arıtmak için gerekli kimyasal madde ve günlük oluşan çamur miktarını hesaplayınız. (Atıksuyun 5 mg/L O_2 içerdiği kabul edilebilir.) [2], [4].

Çözüm.

a) SO_2 ihtiyacı:

Cr^{6+} için:

$$1{,}85\left(\frac{mg\ SO_2}{mgCr^{6+}}\right) * 49(mgCr^{6+}/L\ ) * 10^{-3} * 114\,m^3/gün\ = 10{,}3\,kg/gün$$

O_2 için, 1 O_2 için 4 SO_2:

$$4\left(\frac{mg\ SO_2}{mg\ O_2}\right) * 5(mgO_2/L) * 10^{-3} * 114\,m^3/gün = 2{,}3\,kg/gün$$

$$Toplam = 12{,}6\,kg/gün$$

b) Kireç ihtiyacı:

Cr^{3+} için:

$$2{,}38\left(\frac{mg\ kireç}{mg\ Cr^{3+}}\right) * 49(mgCr^{6+}/L\ ) * 10^{-3} * 114\,m^3/gün = 13{,}3\,kg/gün$$

Cu ve Zn için (1 birim Cu ve Zn için 1,3 birim %90 kireç):

$$1{,}3\left(\frac{mg\ kireç}{mg\ Cu\ veya\ Zn}\right) * 23(mg\ Cu\ ve\ Zn/L) * 10^{-3} * 114\,m^3/gün = 3{,}4\,kg/gün$$

$$Toplam = 16{,}7\,kg/gün$$

c) Çamur üretimi:

$$1{,}98\left(\frac{mg\ Cr(OH)_3}{mg\ Cr^{3+}}\right) * 49 * 10^{-3} * 114\,m^3/gün = 11\,kg/gün\ Cr(OH)_3$$

$$1{,}53\left(\frac{mg\ çamur}{mg\ Cu\ veya\ Zn}\right) * 23 * 10^{-3} * 114\,m^3/gün = 4\,kg/gün\ \ Cu(OH_2)\ ve\ Zn(OH_2)$$

$$Toplam = 15\,kg/gün$$

Çamurun katı madde oranı %1,5 kabul edilirse, her gün bertaraf edilmesi gereken çamur miktarı:

$$\frac{15\,kg/gün}{0{,}15\,kg\ katı/kg\ çamur} * 10^{-3} = 0{,}1\,m^3/gün$$

Not: *Kireç eklendikten sonra nihai pH'ın 9,0'ı geçmediği durumlarda, Cu ve Zn'nin bir kısmı çözünebilir.*

Arsenik: Arsenik ve arsenikli maddeler, metalürji endüstrisi, cam ve seramik üretimi, deri işlemleri, boya, pestisit üretimi, bazı organik ve inorganik kimyasal üretimi, petrol rafinerileri ve nadir-toprak metalleri endüstrileri atıksularında bulunur. Atıksulardan arsenik, kimyasal çöktürme ile giderilir. pH 6-7'de sodyum veya hidrojen sülfür ilavesi ile arsenik, sülfürü şeklinde çöktürülür. Çöktürme sonrası arıtılmış su çıkışında arsenik seviyesi 0,05 mg/L olur. Deşarj limitlerini sağlamak için ayrıca filtrasyon gerekir.

Düşük miktarda arsenik, aktif granüler karbon filtrasyonu ile de giderilebilir. Bu yöntemle arseniğin 0,2 mg/L'den 0,06 mg/L'ye düştüğü belirtilmektedir. Arseniğin $Fe(OH)_3$ floklarına bağlanarak da giderimi mümkündür. Bu prosesle 0,005 mg/L'nin altında çıkış suyu arsenik miktarlarına ulaşılmıştır.

Baryum: Baryum boya ve pigment endüstrisi, metalürji endüstrisi, cam, seramik ve boya üretimi ve lastik vulkanizasyonu proseslerinden çıkar. Ayrıca patlayıcı üretimi yapan tesislerin atıklarında da bulunur. Baryum atıksudan, baryum sülfat şeklinde çöktürülerek uzaklaştırılır.

Baryum sülfatın çözünürlüğü çok düşüktür. Maksimum teorik çözünürlüğü 25°C da 1,4 mg/L baryumdur. Sülfat fazlalığında baryumun çözünürlüğü azalır. Baryum tuzlarının, baryum sülfat formunda koagülasyonu ile çıkış suyunda baryum seviyesi 0,5 mg/L'ye düşer. Baryum iyon değişimi ve elektrodiyaliz ile de giderilebilir. Ancak bu yöntemler kimyasal çöktürmeye kıyasla daha pahalıdır.

Kadmiyum: Kadmiyum metal alaşımları, seramik, elektro kaplama, fotoğraf, pigment, tekstil boyama, kimya sanayi ve kurşun madeni dren sularında bulunur. Atıksulardaki kadmiyum, çöktürme veya iyon değiştirme ile uzaklaştırılır. Atıksu konsantre ise elektrolitik ve buharlaştırma geri kazanım yöntemleri de uygulanabilir. Alkali pH'da kadmiyum çözünmez ve stabil metal hidroksiti formuna dönüşür. Çözeltideki kadmiyum pH 8'de 1 mg/L , pH 10-11'de ise 0,05 mg/L'dir. Demir hidroksit ile pH 6'da birlikte çöktürme sonucu kadmiyum 0,008 mg/L'ye düşerken, pH 8,5'ta demir hidroksit ile 0,05'e düşer. Atıksuda siyanür gibi kompleks oluşturucu iyon mevcutsa kadmiyum çökmez. Bu durumda bu kompleks yapıcı iyonun kadmiyumun çöktürülmesi öncesi atıksudan uzaklaştırılması gerekir. Siyanür durumunda, önce siyanürü oksitleyip ardından kadmiyum oksit oluşumunu sağlayan hidrojen peroksitli

oksidasyon-çöktürme yöntemi ile kadmiyumun ekonomik olarak geri kazanımı mümkün olmaktadır.

Bakır: Endüstriyel atıksularda bakır kaynağı metal dekopaj ve kaplama banyolarıdır. Bakır tuzu ve bakır katalizör kullanılan kimya fabrikalarında da atıksular bakır içerebilir. Atıksulardan bakır, çöktürme ve iyon değişimi, buharlaştırma ve elektrodiyaliz gibi geri kazanım prosesleri ile giderilir. Geri kazanılan bakırın ticari değeri geri kazanım yönteminin fizibilitesini belirler. 200 mg/L nin altında bakır içeren atıksularda iyon değişimi ve aktif karbon yöntemleri daha ekonomik olmaktadır. Alkali pH'da bakır, çözünürlüğü düşük metal hidroksit şeklinde çöker. Ortamda yüksek miktarda sülfat bulunması durumunda oluşan çamurda bakırın geri kazanımı ekonomik olmaz. Bu nedenle saf bir çamur elde etmek için daha pahalı NaOH kullanımı önerilmektedir. Bakır oksit pH 9-10,3 aralığında en düşük çözünürlüğe sahiptir (0,01 mg/L). Uygulama göstermiştir ki kimyasal çöktürme ile ekonomik olarak erişilebilen en düşük bakır düzeyi 0,02-0,07 mg/L'dir. pH 8,5'ta sülfürle çöktürme sonucu çıkış suyunda 0,01-0,02 mg/L bakır seviyelerine inilebilmektedir. Atıksuda siyanür ve amonyak gibi kompleks oluşturucu iyonların bulunması durumunda arıtılmış suda düşük bakır seviyeleri sağlamak zorlaşır. Yüksek oranda bakır giderimi için bu iyonların ön arıtım ile giderilmesi gerekir. Bakır siyanür aktif karbonla etkin bir şekilde giderilebilir.

Florür: Endüstriyel atıksularda florür, cam üretimi, elektro kaplama, çelik ve alüminyum, pestisit ve gübre üretimi atıksularında bulunur. Florür, kireç ile kalsiyum florür şeklinde çöktürülerek giderilir. Arıtılmış sularda 10-20 mg/L bakiye florüre ulaşmak mümkündür. Atıksuda magnezyum bulunması durumunda daha ileri florür arıtımı sağlandığı belirtilmektedir. Bunun nedeni, magnezyum hidroksit floklarının florür iyonlarını adsorplamasıdır. Bu durumda çıkış suyunda 1,0 mg/L'nin altında florüre ulaşmak mümkün olmaktadır. Düşük konsantrasyonda florür, iyon değiştirme ile giderilebilir. Endüstriyel atıksularda, aktifleştirilmiş alümina yatakta temas ile kireçle çöktürme sonrası 30 mg/L olan florür konsantrasyonu 2 mg/L'ye indirilebilir.

Demir: Demir maden işleme, cevher öğütme, kimya endüstrisi atıksuları, boya üretimi, metal işleme, tekstil, petrol rafinerileri de dahil bir çok endüstriyel atıksularda bulunur. Atıksularda demir pH ve çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak 2+ veya 3+ değerlikli olabilir. Nötr pH ve oksijenli ortamda çözünür Fe^{2+}, Fe^{3+}'e dönüşür, demirin bu formu kolayca hidrolize olarak çözünmez yapıda $Fe(OH)_3$ oluşturur. Yüksek pH değerlerinde $Fe(OH)_3$ çözünür formdaki $Fe(OH)_4$ kompleksine dönüşür. Demirin Fe^{2+} (Ferro) ve Fe^{3+} (Ferri) formları siyanürlü ortamda çözünür ferrosiyanür ve ferrisiyanür komplekslerini oluşturabilirler. Atıksularda demir giderilmesinde temel yöntem Fe^{2+}'nin Fe^{3+}'e dönüştürülmesi ve $Fe(OH)_2$'nin pH 7 civarında (minimum çözünürlükte) çöktürülmesidir. Fe^{2+}'nin Fe^{3+}'e dönüştürülmesi pH 7,5'ta havalandırma ile çok hızlı bir şekilde gerçekleşir. Ortamda çözünmüş organik madde varsa demirin oksitlenme hızı düşer.

Kurşun: Kurşun akü üretimi atıksularında bulunur. Atıksulardan genellikle çöktürme ile uzaklaştırılır. Kurşun, karbonat ($PbCO_3$) veya hidroksit ($Pb(OH)_2$) formunda çöktürülür. Kurşun pH 9-9,5'te soda ile karbonatı şeklinde çöktürülür. Bu yöntemle arıtılmış sudaki bakiye kurşun 0,01-0,03 mg/L aralığına indirilebilir. pH 11,5'ta kireçle çöktürme sonucu bakiye kurşun miktarı 0,019-0,2 mg/L olur. Bunların dışında sodyum sülfür ile pH 7,5-8,5'ta kurşun sülfür formunda da çöktürülebilir.

Mangan: Mangan ve tuzları çelik alaşımı, kuru pil üretimi, cam ve seramik, boya ve vernik ve mürekkep gibi üretim atıksularında bulunur. Manganın sadece Mn^{2+} tuzları ve permanganat anyonu çözünürdür. Permanganat kuvvetli bir oksitleyici olup normal şartlarda çözünmez formdaki mangan dioksite (MnO_2) indirgenir. Manganın uzaklaştırılması teknolojisi, çözünebilen Mn^{2+} iyonunun çözünmeyen çökeltiye dönüştürülmesidir. Oluşan çözünmez

mangan oksit ve hidroksitler daha sonra ortamdan uzaklaştırılır. Mn^{2+} iyonunun oksijene karşı reaktivitesi düşük olduğundan pH 9'un altında basit bir havalandırma ile yükseltgenmesi mümkün değildir. Hatta yüksek pH'larda dahi ortamdaki organik madde mangan ile birleşerek oksitlenmesini önler. Çöktürme ile yeterli mangan giderimi sağlamak için pH 9,4'ün üstünde çalışılması gerekmektedir. Mn^{2+}'nin çözünmeyen mangan dioksite dönüştürülerek koagülasyon ve filtrasyon ile atıksudan uzaklaştırılması için kimyasal oksitleyiciler kullanılır. Bakır iyonu manganın hava ile oksidasyonunu hızlandırır. Klor dioksit de manganın çabukça çözünmez forma dönüştürülmesini sağlar. Manganın oksitlenmesinde permanganat da kullanılmaktadır. Kireçle birlikte ozon da mangan gideriminde kullanılmaktadır.

Cıva: Cıvanın en önemli kullanım sahası klor-alkali tesisleridir. Elektrik ve elektronik endüstrisinde, patlayıcı üretiminde, fotoğraf endüstrisinde, pestisit ve koruyucu üretiminde de kullanılır. Cıva, kimya ve petrokimya endüstrisinde katalizör olarak kullanılır. Laboratuvar atıksularında da bulunur. Enerji üretiminde de fosil yakıtların yanması sırasında açığa çıkar. Termik santraller kükürt dioksit giderimi için gaz yıkayıcı varsa aşırı geri devir ile cıva birikimi mümkündür. Cıva atıksulardan çöktürme, iyon değişimi ve adsorpsiyon ile uzaklaştırılabilir. Bakır, çinko ve alüminyum gibi metallerle temas ile de cıva iyonları miktarı azaltılabilir. Çoğu durumda cıva geri kazanımı distilasyon ile gerçekleştirilir. Çöktürme için cıva bileşikleri cıva iyonuna dönüştürülür. Tablo 12.11'de çeşitli teknolojilerle elde edilen cıva çıkışları verilmiştir.

Tablo 12.11. Arıtılmış su çıkışlarında cıva miktarları [2]

Teknoloji	***Çıkış suyu, µg/L***
Sülfür çöktürmesi	*10-20*
Alumla birlikte çöktürme	*1-10*
Demirle birlikte çöktürme	*0,5-5*
İyon değişimi	*1-5*
Karbon adsorpsiyonu	
Giriş	
Yüksek	*20*
Orta	*2*
Düşük	*0,25*

Nikel: Atıksularda nikel, metal işleme endüstrisi, çelik dökümhaneleri, motorlu araçlar, uçak endüstrisi, baskı ve kimya endüstrilerinden kaynaklanır. Siyanür gibi kompleks oluşturucu ortamda nikel, çözünmüş kompleks formda olabilir. Nikel, siyanür kompleksi nikel ve siyanür giderimini olumsuz etkiler. Atıksuya kireç ilave edildiğinde pH 10-11'de en düşük çözünürlük değeri 0,12 mg/L'de, çözünmeyen nikel hidroksit oluşur. Nikel geri kazanım sisteminde karbonat veya sülfatı şeklinde de çöktürülebilir. Pratikte pH 11,5'ta kireç ilavesi ile çöktürme ve filtrasyon sonucu bakiye nikel 0,15 mg/L ye indirilebilir. Atıksudaki nikel konsantrasyonu yüksekse, iyon değişimi ve buharlaştırma ile nikel geri kazanımı mümkündür.

Selenyum: Selenyum, çeşitli kağıtlarda, kurum (is) ve metalik sülfür cevherlerinde bulunur. Atıksulardan pH 6,6'da sülfürü şeklinde çöktürülerek uzaklaştırılır. Arıtılmış atıksu çıkışında 0,05 mg/L seviyelerindedir.

Gümüş: Gümüşün suda çözünür formu, gümüş nitrat, porselen, fotoğraf, elektro kaplama ve mürekkep üretim atıksularında bulunur. Gümüş değerli bir metal olduğundan uygulanan arıtma teknolojisi geri kazanıma yöneliktir. Başlıca arıtım yöntemleri çöktürme, iyon değişimi ve elektrolitik geri kazanımdır. Atıksulardan gümüş giderimi, gümüş klorür şeklinde çöktürülerek gerçekleştirilir. Gümüş klorürün çözünürlüğü oldukça düşük olup 25°C'de arıtılmış sudaki bakiye gümüş miktarı 1,4 mg/L'dir. Klorürün ortamda bir miktar fazla olması bu değeri düşürür. Ancak klorürün çok fazla olması durumunda suda çözünür gümüş klorür kompleksleri oluşarak arıtılmış sudaki bakiye gümüş miktarı artar. Metal karışımı içeren atıksulardan gümüş

seçici olarak çöktürülebilir. Arıtma şartları bazik ise diğer metaller hidroksitleri şeklinde çökerken gümüş klorürü şeklinde çöker. Oluşan çamurun asidik şartlarda yıkanması ile diğer metal iyonları ayrılırken gümüş klorür katı olarak kalır. Kaplama banyosu suları gümüş siyanür içerir, bu da gümüşün gümüş klorür formunda çökmesini engeller. Bu durumda gümüşün gümüş klorür olarak çöktürülmesi öncesi siyanürün giderilmesi gerekir. Siyanür iyonlarının klorla oksidasyonu sonucu klor iyonları suya geçer ve gümüş iyonları ile birleşerek gümüş klorür oluşturur. Fotoğraf çözeltilerindeki gümüş, gümüş sülfür formunda çöktürülür. Atıksulardaki çözünür formdaki gümüş, iyon değişimi ile uzaklaştırılır. Düşük gümüş seviyelerinde aktif karbon kullanılır. Aktif karbonla gümüş giderim mekanizması karbon yüzeyinde gümüşün indirgenerek elemanter gümüşe dönüşümüdür. Gümüşün pH 2,1'de ağırlıkça %9'unun, pH 5,4'te ise %12'sinin aktif karbon yüzeyinde tutulduğu bildirilmektedir.

Çinko: Çinko, çelik işleri, rayon ipliği ve elyaf üretimi, öğütülmüş odun hamuru üretimi, katodik işlem yapan sistemlerde soğutma suyunun sirkülasyonu sularında bulunur. Kaplama ve metal işleme endüstrileri atıksularında da çinko bulunur. Çinko, kireç veya kostik kullanılarak hidroksiti şeklinde çöktürülür. Kireçle çöktürmenin bir mahzuru atıksuda sülfat bulunması durumunda kalsiyum sülfatın da birlikte çökmesidir. pH 11'de arıtılmış su çıkışında 0,1 mg/L'nin altında çinko seviyelerine ulaşılabilir.

Atıksulardan farklı tekniklerle metal giderimi sonucu ulaşılabilecek çıkış suyu metal seviyeleri Tablo 12.12'de özetlenmiştir.

Tablo 12.12. Ağır metal gideriminde arıtılmış su çıkışındaki metal düzeyleri (mg/L) [2]

Metal	***Ulaşılabilecek çıkış suyu konsantrasyonu***	***Teknoloji***
Arsenik	*0,05*	*Sülfür çöktürme ve filtrasyon*
	0,06	*Karbon adsorpsiyonu*
	0,005	*$Fe(OH)_3$ ile birlikte çöktürme*
Baryum	*0,5*	*Sülfat çöktürmesi*
Kadmiyum	*0,05*	*pH 10-11'de hidroksit çöktürmesi*
	0,05	*$Fe(OH)_3$ ile birlikte çöktürme*
	0,008	*Sülfür çöktürmesi*
Bakır	*0,02-0,07*	*Hidroksit çöktürmesi*
	0,01-0,02	*Sülfür çöktürmesi*
Cıva	*0,01-0,02*	*Sülfür çöktürmesi*
	0,001-0,01	*Alumla birlikte çöktürme*
	0,0005-0,005	*$Fe(OH)_3$ ile birlikte çöktürme*
	0,001-0,005	*İyon değişimi*
Nikel	*0,12*	*pH 10'da hidroksit çöktürmesi*
Selenyum	*0,05*	*Sülfür çöktürmesi*
Çinko	*0,1*	*pH 11'de hidroksit çöktürmesi*

Endüstriyel atıksu arıtımı hakkında daha kapsamlı bilgi için [1] , [3], [5], [6], [7] kaynaklarına başvurulmalıdır.

12.3.3. Endüstriyel Atıkların Biyolojik Arıtılabilirliği

12.3.3.1. Organik Madde Giderim Mekanizmaları

Organik maddelerin (kirleticiler) biyolojik arıtma tesislerinde giderimi sorpsiyon, sıyırma veya biyobozunma mekanizmalarından beri veya birkaçının etkisiyle gerçekleşir. Bazı organik kirleticiler ve giderimlerinde etkili mekanizmalar Tablo 12.13'te verilmiştir.

Tablo 12.13. Bazı öncelikli kirleticilerin, aktif çamurla arıtımındaki giderim mekanizmalarının karşılaştırılması [2]

Biyobozunma *(1)*	***Biyobozunma ve sıyırma*** *(2)*	***Sıyırma*** *(3)*	***Giderilemeyen (Giderimi zor)*** *(4)*
Nitrobenzen	*Etil asetat*	*1,2-Dikloroetan*	*Bis (2-etileksil) ftalat*
2,4-Diklorobenzen	*Benzen*	*1,1,1-Trikloroetan*	
2,4-Dinitrobenzen	*2,4-Diklorobenzen*	*1,1,2,2-Tetrakloroetan*	
Akrolein	*Metilen klorür*	*1,2-Dikloropropan*	
Pentaklorofenol	*Etilbenzen*		
Fenol	*Kloroform*		
Fenantren	*Karbon tetraklorür*		
Naftalin			
Benzidin			

(1)%95 oranında biyobozunma ile giderim
(2)%5-50 oranında sıyırma ile toplamda %95 oranında giderim
(3)%95 oranında sıyırma ile giderim
(4)%80'den daha az giderim

Sorpsiyon: Biyobozunamayan organiklerin biyokütle üzerindeki sorpsiyonu genelde kısıtlı veya ihmal edilebilir düzeydedir. Buna tek istisna Lindan'dır. Diğer pestisitlerin de biyolojik arıtma tesislerinde benzer (biyokütle üzerinde adsorplanma) mekanizmalarıyla giderimi muhtemeldir.

Toksik organiklerin biyokütle üzerinde adsorpsiyonu önemli bir mekanizma olmamakla birlikte, bu tür kirleticilerin biyokütle dışı AKM'de sorpsiyonu önemli olup, özellikle ön arıtma kademesinden çıkan çamurların çürütülmesi veya araziye uygulanmasında kısıtlayıcı olabilirler. Organik kirleticilerin mikroorganizma biyokütlesi üzerinde sorpsiyonu önemsiz olmakla birlikte toksik ağır metaller için aynı durum geçerli değildir. Metaller mikroorganizma hücre duvarı ile kompleks oluşturarak biyokütlede birikebilirler. Atıksu akımındaki düşük konsantrasyonlu metal iyonları sistemin organik madde giderimini doğrudan etkilememekle birlikte, aktif biyokütledeki birikimle sonraki çamur arıtma ve uzaklaştırma işlemlerini etkileyebilirler.

Sıyırma: Uçucu organikler biyolojik arıtma tesislerinde sıyrılarak atmosfere karışır. Uçucu organiğin özelliğine bağlı olarak sıyırma ve biyobozunma mekanizmalarının birlikte rol oynadığı durumlar da olabilir. Arıtma tesislerinden çevreye uçucu organik emisyonu salımı koku kontrolü mevzuatı ile düzenlenmiş olup özellikle meskun mahaller içinde veya yakınında kurulu atıksu arıtıma tesisleri için giderek kritik hale gelen önemli bir konudur.

Biyobozunma: organik maddelerin mikroorganizmalarca sıvı ortamlardan uzaklaştırılması (biyolojik arıtma) iki temel süreçle gerçekleştirilir. Atıksudaki oksijen mikroorganizmalarca enerji temini ve yeni hücre sentezi için kullanılır. Mikroorganizmalar oksijeni aynı zamanda içsel sonulum (otooksidasyon) için de kullanırlar. Söz konusu biyokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir.

$$\text{Organik madde} + a'O_2 + N + P \xrightarrow[K]{\text{Mikro organizma biyokütlesi}} a' * \text{Yeni biyokütle} + CO_2 + H_2O + \text{Çözünmüş inert ürün kalıntıları} \tag{12.5}$$

$$\text{Mikro organizma biyokütlesi} + b'O_2 \xrightarrow[b]{} xCO_2 + H_2O + N + P + \text{Çözünmüş inert ürün kalıntıları } (SMP) \tag{12.6}$$

Yukarıdaki biyokimyasal reaksiyonlarla biyolojik bozunmanın gerçekleştirildiği endüstriyel atıksu arıtma tesislerinin tasarım ve işletimindeki en önemli iki husus gerekli O_2 ve makro besi maddesi (N, P) ihtiyacı ile oluşacak biyolojik çamur miktarının belirlenmesidir. Denklem (12.5)'teki K (gün^{-1}), atıksudaki organik madde bileşenlerine ve işletme/çevre şartlarına bağlı bir bozunma hızı katsayısıdır. a' oksitlenen organik madde oranıdır. b, biyokütle sentezinde kullanılan organik madde oranıdır. b (gün^{-1}), biyobozunabilir biyokütlenin oksitlenen kısmının içsel bozunma hızı sabiti, b' ise içsel solunum için gerekli O_2 ihtiyacıdır. Denklem (12.5)'de, giderilen organiklerin az bir kısmı çözünmüş inert kalıntı ürünler olarak (çözünmüş mikrobiyal iner KOİ) çıkış suyunda bulunur. Üretilen biyokütlenin bir kısmı da inert biyokütle (partiküler inert KOİ) halinde sistemde kalır. Biyolojik atıksu arıtma tesisleri tasarım ve işletimindeki ana hedef Denklem (12.5) ve (12.6) arasındaki dengenin sağlanmasıdır.

Çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) hariç diğer organik maddeler biyolojik arıtma sürecinde CO_2 ve H_2O'ya oksitlenir veya biyokütleye sentezlenir. Dolayısıyla,

$$a_{KOİ} + a'_{KOİ} \approx 1$$

yazılabilir. Biyokütlenin uçucu katı madde (UKM) olarak ifade edildiği ve 1 g mikroorganizma biyokütlesinin ~1,4 g KOİ'ye eşdeğer olduğu dikkate alınarak yukarıdaki ifade,

$$1{,}4\ a_{UKM} + a'_{KOİ} \approx 1$$

şeklinde de yazılabilir. Kentsel atıksudaki 1 kg KOİ'nin aerobik biyolojik bozunma sürecinde giderimi için tipik kavramsal kütle dengesi Şekil 12.16'daki gibi gösterilebilir.

Şekil 12.16. Aerobik biyolojik arıtmada, oksijen ve UKM için kavramsal kütle dengesi

Bazı organik maddeler için, uçurma, biyobozunma ve sorpsiyon özellikleri arasındaki ilişki Şekil 12.17'deki gibidir.

Şekil 12.17. Bazı organik maddeler için, uçurma, biyobozunma ve sorpsiyon özellikleri arasındaki ilişki [4]

12.3.3.2. Biyokimyasal Oksidasyonla Organik Madde (BOİ) veya Biyobozunur KOİ Giderimi

Endüstriyel atıksu arıtımında göz önünde tutulması gereken en önemli husus, mikroorganizma biyokütlesinin atıksuya alıştırılma mecburiyetidir. Kompleks organik maddelerin alıştırma süreci 6~8 hafta gibi süreler olabilir (Şekil 12.18).

Şekil 12.18. Kompleks organik maddelerin azot içeriği ve çamur yaşı arasındaki ilişki [2]

Atıksulardan mikroorganizma biyokütlesi (biyolojik çamur) ile biyobozunur organik madde (BOİ) giderimi iki kademede gerçekleştirilir. Yüksek hızlı AKM, kolloid ve çözünmüş BÖİ gideriminin olduğu başlangıç dönemi ve müteakiben daha yavaş bir hızla kalan çözünmüş BOİ'nin giderildiği dönem. Başlangıçtaki hızlı BOİ giderimi dönemi, organik maddenin Fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak, bir veya daha fazla mekanizmanın rol aldığı bir süreçtir. Bu mekanizmalar;

- Askıda maddelerin biyolojik floklar tarafından tutulması (floklar içinde hapsedilmesi),
- Kolloidlerin biyolojik floklar üzerinde adsorplanması,
- Çözünmüş organik maddelerin mikroorganizmalarca hücre yüzeyi ve içinde biyosorplanması

olarak sıralanabilir.

Atıksudaki BOİ'nin söz konusu ilk dönemdeki hızlı (anlık) giderimi, biyokütle konsantrasyonu, çamur yaşı ve çözünmüş organik maddenin kimyasal karakteristikleriyle yakından ilgilidir.

$$Flok\ yükü = \frac{mgBOİ_{giderilen}}{g\ UKM} \tag{12.7}$$

Flok yükü ile biyosorpsiyonla organik madde giderimi tipik ilişkisi Şekil 12.19'daki gibi ifade edilebilir.

Şekil 12.19. Flok yükü ile biyosorpsiyonla organik madde giderimi tipik ilişkisi [2]

AAT'inde oluşan çamurun tipi, sorpsiyon özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Genelde, kesikli veya piston akımlı reaktörlerde üretilen biyolojik çamurların sorpsiyon kapasitesi tam karışımlı reaktörlere göre daha iyidir. Bu yüzden Biyolojik S elektör Reaktörleri 2~4 adet seri bağlı tam karışımlı reaktör tarzında tasarlanır, ardışık kesikli reaktör (AKR) çamurları da yüksek sorpsiyon kapasitesine sahiptir.

Yukarıda belirtilen 3 reaksiyon, atıksu biyokütle ile temas eder etmez gerçekleşir. Kolloidler ve AKM'lerin mikroorganizmalarca kullanılabilir hale getirilebilmeleri için, ardışık süreçlerle daha küçük moleküllere parçalanmaları gerekmektedir.

Yüksek düzeyde BOİ içeren kompleks bir atıksu karışımında, uygun çevresel ve işletme şartlarında, biyokütle sentez hızı atıksu BOİ konsantrasyonundan bağımsızdır ve çoğalma hızı maksimumdur. Havalandırmanın devam ettirilmesiyle hızlı (kolay) ayrışabilir organik madde bileşenlerinin miktarı (konsantrasyonu) azalır ve mikroorganizma çoğalma hızı da ortamda kalan BOİ konsantrasyonundaki azalmaya bağlı olarak azalır.

Bu durum, mikroorganizma biyokütlesinde ve karbon içeriğinde azalmaya yol açar, aynı zamanda mikroorganizma hücrelerindeki azotta da düşme gözlenir.

Şekil 12.20. Biyooksidasyon sırasında gerçekleşen reaksiyonlar [2]

Şekil 12.20'de azalan hızlı arıtmanın (BOİ giderimi) başladığı yer C noktasıdır. Biyokütlede biriktirilen (depolanan) karbonhidratlar BC süresince tüketilir ve bunun bir sonucu olarak hücresel N düzeyi yükselir. Depolanan karbonhidratın tüketildiği C noktasında hücresel N pik değere ulaşır. CD zaman aralığında (mikroorganizma) biyokütlesi artar (azalan hızlı sentez ve BOİ giderimi). C noktasında çözeltide kalan BOİ ve organik madde giderim hızına bağlı olarak, biyokütle miktarı sabit kalır veya artış da gösterebilir. D noktasının sağında, otooksidasyon (içsel sonunum) biyokütle ağırlığı ve hücre N içeriğinde azalmaya yol açar. Logaritmik çoğalma döneminde, özgül O_2 kullanım (tüketim) hızı maksimum değerinde sabit kalır.

- **<u>Biyokütle (Çamur) Oluşumu ve Oksijen Tüketimi:</u>**

Biyolojik arıtma kinetiği ve AAT üzerinde yazılan kütle dengesi yardımıyla, biyobozunur biyokütle miktarı, X_d, çamur yaşı (θ_c) ve içsel solunum hızı katsayısı (b)'na bağlı olarak,

$$X_d = \frac{X'_d}{1 + b\, X'_n\, \theta_c} \tag{12.8}$$

eşitliğinden bulunabilir. Burada;

X'_d : Sistemde üretilen biyokütlenin (UKM) biyobozunur kısmının oranını (ortalama bir değer olarak genelde ~0,8 alınır.)
X'_n : Üretilen biyokütlenin inert (biyobozunur olmayan) kısmının oranını (genelde ortalama bir değer olarak ~0,2 alınır, $X'_d + X'_n = 1{,}0$)
b : İçsel solunum hızı katsayısını (gün^{-1})
θ_c : Çamur yaşını (gün)

göstermektedir. Tam karışımlı bir aktif çamur sisteminde çamur yükü (F/M), biyokütleye dönüşüm katsayısı (a) ve θ_c arasında aşağıdaki ilişkiler geçerlidir:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{X_d\,\theta} = \frac{S_0}{f_b\,X_V\,\theta} \tag{12.9}$$

$$\frac{1}{\theta_c} = a\frac{F}{M} - b\,X_d \tag{12.10}$$

Çözünmüş organik maddelerin biyolojik oksidasyonu sonucu oluşacak fazla (atılacak) biyokütle miktarı, P_x, aşağıdaki ifadeden bulunabilmektedir [2].

$$P_x = a\,S_r - b\,X_d\,X_V\,\theta \tag{12.11}$$

Burada;

P_x : Oluşan fazla biyokütle konsantrasyonu (mg/L)
S_r : Giderilen organik madde miktarı (mg/L)
X_d : Biyokütlenin biyobozunur kısmının oranıdır.
a : Giderilen birim substrat başına biyokütle oluşumu g UKM/ g $BOİ_5$

Genelde, üretilen biyokütlenin ~%80'inin biyobozunur yapıda olduğu kabul edilebilir. Sistemde çamur yaşı arttıkça, biyokütlenin biyobozunur kısmı içsel solunumla ayrıştırılacak ve geriye kalan biyobozunur biyokütle (X_d) miktarı azalacaktır. Söz konusu durum aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$X_d = \frac{0{,}8}{1 + 0{,}2\,b\,\theta_c} \tag{12.12}$$

Denklem (12.10), (12.11) ve (12.12) birleştirilirse,

$$X_d = \frac{a\,S_r\,b\,X_V - [(a\,S_r + b\,X_V)^2 - (4\,b\,X_V) * (0{,}8\,a\,S_r)]^{0{,}5}}{2\,b\,X_V} \tag{12.13}$$

elde edilir.

Ham atıksuyun önemli miktarda UKM içermesi durumunda (12.11) ifadesinin aşağıdaki şekilde düzenlenmesi gerekir:

$$W_x = a\,[S_r + f_d\,f_x\,X_i] - b\,X_d\,f_b\,X_v\,\theta + (1 - f_d)\,f_x\,X_i + (1 - f_x)\,X_i \tag{12.14}$$

Burada;

X_i : Girişteki (ham atıksu) UKM miktarını, mg/L
f_x : X_i'nin biyobozunur kısmının oranını
f_b : reaktör karışık sıvısındaki UKM'de biyokütle oranını
a : Giderilen birim substrat başına biyokütle oluşumu g UKM/ g $BOİ_5$

göstermektedir. Girişteki biyobozunur X_i'nin büyük kısmı genelde $\theta_c = 10$ günlük çamur yaşlarında ayrıştırılır. Çamur yaşı arttıkça biyokütle (aktif çamur karışık sıvısı) içindeki inert X_i oranı da artar. Şayet çözünürleşmiş 1 mg UKM/L başına 1 mg KOİ/L'lik X_i orijinli çözünmüş substrat oluştuğu esas alınırsa, karışık sıvıdaki f_b değeri için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir:

$$f_b = \frac{a\,[S_r + f_d\,f_x\,X_i] - b\,X_d\,f_b\,X_v\,\theta}{a\,[S_r + f_d\,f_x\,X_i] - b\,X_d\,f_b\,X_v\,\theta + (1 - f_d)\,f_x\,X_i + (1 - f_x)\,X_i} \tag{12.15}$$

Kağıt/karton sanayi atıksuları içindeki elyaf esaslı UKM genelde biyobozunur yapıda değildir ve $f_d = 0$ alınabilir. Gıda sanayi atıksularında ise genelde $1 - f_d = 0{,}20$ alınabilir. Ham endüstri atıksularda yüksek oranda UKM olması durumunda $(1 - f_d)$ deneysel olarak tespit edilmelidir. Ham atıksuyun önemli miktarda UKM içermesi halinde (12.13) eşitliğinin aşağıdaki şekilde düzeltilmesi gerekir:

$$X_d = \frac{J - [J^2 - (4\, b\, f_b\, X_V) * (0{,}8\, a\, S_r)]^{0,5}}{2\, b\, f_b\, X_V} \tag{12.16}$$

$$J = a\, S_r + b\, f_b\, X_V - f_d\, f_x\, X_i$$

Atıksu arıtıma tesisinde biriken (oluşan) inert AKM miktarı, ΔIUKM

$$\Delta IUKM = a^*\, S_r\, f_{ibnd} + f_{0i}\, X_{0i} \tag{12.17}$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada;

X_{0i} : Girişteki inert AKM, mg/L
f_{ibn} : İnert biyokütle oranı
f_{0i} : Biyolojik olarak ayrıştırılamayan veya çözünürleştirilemeyen girişteki inert katıların oranı
a^* : Giderilen birim substrat başına üretilen biyokütle miktarı mg AKM/mg $KOİ_{giderilen}$ veya $BOİ_{5giderilen}$

Yukarıdaki eşitliklerdeki a ve b katsayıları, laboratuvar veya pilot ölçekli arıtılabilirlik çalışması verilerinin Denklem (12.11) ile grafiksel analizi sonucu belirlenebilir (Şekil 12.21).

Şekil 12.21. a ve b katsayılarının Denklem (12.11) kullanılarak belirlenmesi [4]

Problem 12.3

Aşağıdaki işletme koşullarında çalışan bir aktif çamur sistemi için F/M, X_v ve f_b parametrelerini hesaplayınız [2], [4].

a = 0,45
b = 0,1 (20°C)
θ_c = 10 gün
X_i = 200 mg/L
f_x = 0
S_0 = 1000 mg/L
S_e = 20 mg/L
θ = 0,9 gün

Çözüm.

F/M hesabı:

$$\frac{1}{\theta_c} = a(F/M) - b\,X_d$$

$$X_d = \frac{0{,}8}{1 + 0{,}2\,b\,\theta_c}$$

$$X_d = \frac{0{,}8}{1 + 0{,}2\,(0{,}1 * 10)} = 0{,}67$$

$$\frac{1}{10} = 0{,}45(F/M) - (0{,}1 * 0{,}67)$$

$$(F/M) = 0{,}37\ gün^{-1}$$

Xv, biyokatıdaki ve giriş akımındaki biyobozunur olmayan UKM'nin toplamıdır:

$$F/M = S_0/(f_b\,X_v\,\theta)$$

$$f_b\,X_v = 1000/(0{,}37 * 0{,}9) = 3000\ mg/L$$

$$X_v = [(a\,S_r - b\,X_d\,f_b\,X_v\,\theta) + (1 - f_x)X_i]\frac{\theta_c}{\theta}$$

$$= [0{,}45(1000 - 20) - (0{,}1 * 0{,}67 * 0{,}9 * 3000) + (1{,}0 - 0)200]\frac{10}{0{,}9} = 5112\ mg/L$$

X_v nin biyokütle fraksiyonu, f_b:

$$f_b = \frac{3000}{5112} = 0{,}59$$

Havalandırma tankından her bir geçiş (θ) için üretilen atık çamur, ΔX_v:

$$\Delta X_v(P_x) = a\,S_r - b\,X_d\,f_b\,X_v\,t + \Delta X_i$$

$$= (0{,}45 * 980) - (0{,}1 * 0{,}67 * 3000 * 0{,}9) + (1{,}0 - 0)200$$

$$= 441 - 181 + 200 = 460\ mg/L$$

θ_c= 10 gün için kontrol:

$$\theta_c = \frac{5112 * 0{,}9}{460} = 10\ gün$$

- **<u>Oksijen İhtiyacı:</u>**

Aktif çamur sistemiyle biyolojik arıtmada gerekli oksijen ihtiyacı,

$$O_2 = a'S_r + (1{,}4\,b)\,X_d\,f_b\,X_v\,\theta \qquad (12.18)$$

ifadesinden bulunur. Burada;

O_2 : oksijen ihtiyacı, mg/L
f_b, X_v : havalandırılan biyokütle konsantrasyonu, mg UKM/L
X_d : biyokütlenin (UKM) ayrıştırılabilir kısmı
a' : özgül oksijen tüketimi, kg O_2/ kg BO $İ_{giderilen}$
b : içsel solunum hızı katsayısı, $gün^{-1}$

Tamamı (%100'ü) çözünmüş organik maddelerden oluşan atıksuların oksijen ihtiyacı:

$$r_r = \frac{a' S_r}{\theta} + b' X_d \, f_b \, X_v \tag{12.19}$$

ifadesinden bulunur. Burada;

r_r : mikroorganizmaların oksijen tüketim hızı (OTH), mg O_2/L gün

b' : 1,4∗b

Mikroorganizmaların logaritmik çoğalma döneminde özgül oksijen tüketim hızı (OTH), $K_r = r_r/Xv_v$, sabittir ve bu yüzden yeni hücre sentezi artışına paralel olarak artar. Reaktördeki kullanılabilir substrat tükendiğinde oksijen tüketim hızı da azalarak içsel solunum hızına, $\sim b\, X_d\, f_b\, X_v$, yaklaşır. Oksijen tüketim hızı respirometre ile tayin edilebilir. Çeşitli atıksuların oksijen tüketim hızı sabitleri (a' ve b') Tablo 12.14'te verilmiştir.

Problem 12.4

Organik kimyasalların üretildiği bir fabrikaya ait atıksuları arıtan, 2 kademeli, saf oksijenli aktif çamur tesisine ait veriler analiz edilmiştir. Arıtma prosesinin ilk kademesi, geri devreden aktif çamur için tekrar havalandırma görevi görmektedir ve Özgül Oksijen Tüketim Hızı (ÖOTH) içsel solunumda oksijen tüketim hızı (b') olarak kabul edilmiştir. Organik madde giderimi, arıtma prosesinin 2. kademesinde gerçekleşir ve sentez için oksijen ihtiyacı (a') olarak ortaya çıkmaktadır [2], [4].

1. kademe işletme karakterizasyonu:

OTH = 27 mg/L sa

UKM = 9000 mg/L

$ÖOTH_e$ = 3 mg O_2/g UKM sa

2. kademe işletme karakterizasyonu:

OTH = 104 mg/L sa

UKM = 6000 mg/L

$ÖOTH_r$ = 17,3 mg O_2/g UKM sa

Giderilen organik madde, S_r = 5443 kg/gün

V = 984 m^3

Çözüm.

a', a ve b' katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a' = \frac{V(ÖOTH_r - ÖOTH_e)X_V * 24 * 10^{-6}}{S_r}$$

$$a' = \frac{984 * (17{,}3 - 3) * 6000 * 24 * 10^{-6}}{5443}$$

$$a' = 0{,}37 \;\; mg\; O_2/g\; giderilen\; organik\; madde$$

$1{,}4\, a_{UKM} + a'_{KOİ} \approx 1$ *olduğundan, çamur dönüşüm oranı, a:*

$$a = \frac{1{,}0 - 0{,}37}{1{,}4} = 0{,}45 \;\; mg\; UKM/mg\; Giderilen\; organik\; madde$$

İçsel solunum hızı katsayısı:

$$b = \frac{(3 * 24/1000)}{1{,}4} = 0{,}05 \;\; mg\; UKM\; g/mg\; indirgenen\; UKM\; gün$$

olarak bulunur.

Tablo 12.14. Çeşitli atıksuların oksijen tüketim hızı sabitleri (a' ve b')

Atık türü	*Özgül Oksijen Tüketim Hızı Katsayısı a' (g O_2/g BOD_r)*	*İçsel Solunumda Oksijen Tüketim Hızı Katsayısı b' (g O_2/g UAKM gün)*	*Açıklama*
Kentsel	*0,66*	*0,10*	*BOİ bazında*
İlaç (fermantasyon)	*1,30*	*0,18*	*Laboratuvar ölçekli verileri BOİ bazında*
	1,0	*0,01*	*Pilot tesis verileri BOİ bazında*
Kentsel/endüstriyel (organik kimyasallar)	*1,0*	*0,05*	*BOİ bazında*
Özel organik kimyasallar	*1,22*	*0,04*	*BOİ bazında*
Pestisit üretimi	*1,18*	*0,08*	*BOİ bazında*
	1,43	*0,08*	*TOK bazında*
Kentsel/endüstriyel	*0,60*	*0,15*	*BOİ bazında*
Kentsel	*0,90*	*0,15*	*BOİ bazında*
Kentsel	*0,73*	*0,07*	*BOİ bazında*
Kentsel/endüstriyel (organik kimyasallar)	*1,00*	*0,06*	*BOİ bazında*
Bitkisel tabakhane	*2,27*	*0,015*	*BOİ bazında*
	0,54	*0,015*	*KOİ bazında*
Plastik üretimi	*1,02*	*0,095*	*Nitrifikasyon için düzeltilmemiş, BOİ bazında*
	0,95	*0,05*	*Nitrifikasyon için düzeltilmiş, BOİ bazında*
	1,12	*0,06*	*Tasarım için seçilen, BOİ bazında*
Plastik üretimi (üretim üniteleri atıklarının değişik kombinasyonları)	*1,25*	*0,05*	*BOİ bazında*
	0,95	*0,05*	*BOİ bazında*
	0,71	*0,05*	*BOİ bazında*
	1,28	*0,03*	*BOİ bazında*
	1,20	*0,03*	*BOİ bazında*
	0,41	*0,03*	*BOİ bazında*
İlaç	*1,60*	*0,03*	*BOİ bazında*
Organik kimyasallar	*1,00*	*0,14*	*Deneysel olarak saptanmamış, BOİ bazında*
Rafineri	*0,81*	*0,09*	*BOİ bazında*
	0,60	*0,04*	*KOİ bazında*
Kömür sıvılaştırma	*0,52*	*0,04*	*BOİ bazında*
	0,37	*0,04*	*KOİ bazında*
	0,60	*0,04*	*Tasarım için seçilmiş, BOİ bazında*
Kraft (dayanıklı ambalaj kağıdı) üretimi	*1,28*	*0,04*	*BOİ bazında*
	0,60	*0,04*	*KOİ bazında*
Sentetik elyaf üretimi	*1,03*	*0,08*	*BOİ bazında, Zaman periyodu I*
	0,73	*0,04*	*BOİ bazında, Zaman periyodu II*
	0,52	*0,08*	*KOİ bazında, Zaman periyodu I*
	0,47	*0,025*	*KOİ bazında, Zaman periyodu II*
	1,03	*0,07*	*Tasarım için seçilmiş, BOİ bazında*
Peynir altı suyu işleme	*0,70*	*0,08*	*Deneysel olarak saptanmamış, BOİ bazında*

Problem 12.5

Bir aktif çamur sistemi için ortalama işletme ve performans koşulları aşağıdaki şekil üzerinde verilmiştir. Bu tesis için θ_c, f_b, a ve a' parametrelerini bulunuz [2], [4].

Çözüm.

Çamur yaşı ve UKM'nin biyobozunabilir kısmı (X_d):

$$\theta_c = \frac{2295 * 3785 * 10^{-3}}{(34 * 19646 * 10^{-3}) + (303 * 6080 * 10^{-3})} = 3{,}5\ gün$$

$$\theta_c = \frac{8687\ (kg)}{2510\ (kg/gün)} = 3{,}5\ gün$$

$$X_d = \frac{0{,}8}{1 + (0{,}18 * 0{,}2 * 3{,}5)} = 0{,}71$$

UAKM'nin biyobozunamayan kısmı (X_V):

$$(1 - f_b)\ X_v = \frac{(1 - f_x)\ X_i\ \theta_c}{t} = \frac{(1 - 0)(51 * 3{,}5)}{0{,}19} = 939\ \ mg/L$$

$$f_b = \frac{2295 - 939}{2295} = 0{,}59$$

Biyokütle verim (dönüşüm) katsayısı, a:

$$\Delta f_b\ X_v = a\ S_r - b\ X_d\ f_b\ X_b$$

$$0{,}59 * 5528 = [a\ (1018 - 248) * 5{,}19 * 8{,}34] - [0{,}18 * 0{,}71 * 0{,}59 * 2295 * 8{,}34]$$

$$a = 0{,}14\ \ mg\ UKM/mg\ \Delta KO\text{İ}$$

Oksijen tüketimi ve a':

$$O_2/gün = 146 * 1 * 8{,}34 * 24 = 29223\ lb/gün$$

$$29223 = a'(33329) + (1{,}4 * 0{,}18 * 0{,}71 * 0{,}59 * 2295 * 8{,}34)$$

$$a' = 0{,}81\ \ mg\ O_2/mg\ \Delta KO\text{İ}$$

a ve a' için oksijen denkliğinin kontrolü:

$$(1{,}4 * 0{,}14) + 0{,}81 = 1{,}0$$

- **<u>Besi Maddesi (N , P) İhtiyacı:</u>**

Arıtmada ihtiyaç duyulacak makro besi elementleri (N , P) miktarları, tesisten atılan fazla biyolojik çamurun N, P içeriğine bağlı olarak aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir:

$$N \cong 0{,}123\frac{X_d}{0{,}8}P_x + 0{,}07\frac{0{,}8 - X_d}{0{,}8}P_x$$

$$P \cong 0{,}026\frac{X_d}{0{,}8}P_x + 0{,}01\frac{0{,}8 - X_d}{0{,}8}P_x$$

Bu ifadede X_d, UKM'nin biyobozunabilir %'si olup; N ve P için aşağıdaki kabuller esas alınmıştır:

- UKM ~%12,3 oranında N içerir, %2,6 oranında P içerir.
- İnert KM ~%7 oranında N , %1 oranında P içerir.

Problem 12.6

BOİ konsantrasyonu 2300 mg/L ve azot içeriği 1,5 mg/L olan, $1{,}14 * 10^4$ *m³/gün debili bir endüstriyel atıksu ile BOİ konsantrasyonu 190 mg/L ve azot içeriği 35 mg/L olan,* $1{,}89 * 10^4$ *m³/gün kapasiteli bir evsel atıksu birlikte aktif çamur prosesiyle arıtılacaktır. a ve b katsayıları sırasıyla 0,52 ve 0,1/gün olarak kabul edilmiştir. Çamur yaşı 10 gün ve BOİ giderimi %92 olduğuna göre, azot ihtiyacını hesaplayınız. UAKM 2500 mg/L ve havalandırma tankı hacmi* $3{,}42 * 10^4$ *m³'tür [2], [4].*

Çözüm.

$$BO\dot{I}_{giriş} = 2300\frac{mg}{L} * 10^{-3} * 1{,}14 * 10^4\frac{m^3}{gün} + 190\frac{mg}{L} * 10^{-3} * 1{,}89 * 10^4\frac{m^3}{gün} = 29811\frac{kg}{gün}$$

$$29811\frac{kg}{gün} * 0{,}92 = 27426\frac{kg}{gün}$$

Aktif çamurun biyobozunabilir kısmı (X_d):

$$\Delta X_v = 0{,}52 * 27426\frac{kg}{g} - 0{,}1 * 0{,}66 * 3{,}42 * 10^4 m^3 * 2500\frac{mg}{L} * 10^{-3} = 8562\frac{kg}{gün}$$

Atıksudaki mevcut azot:

$$1{,}14 * 10^4\frac{m^3}{gün} * 1{,}5\frac{mg}{L} * 10^{-3} + 1{,}89 * 10^4 * 35\frac{mg}{L} * 10^{-3} = 672\frac{kg}{gün}$$

Atık aktif çamurla birlikte kaybedilen azot:

$$N = 0{,}123 * \frac{0{,}66}{0{,}8} * 8562 + 0{,}07 * \frac{0{,}8 - 0{,}66}{0{,}8} * 8562 = 977\frac{kg}{gün}$$

İlave azot ihtiyacı:

$$N = 977 - 679 = 299\frac{kg}{gün}$$

Aktif Çamur Prosesinde Biyoinhibisyon:

Çoğu organik madde, aktif çamur sistemindeki heterotrofik ve/veya ototrofik mikroorganizmalar üzerinde inhibisyonuna yol açacak bir eşik konsantrasyona sahiptir.

Biyoinhibisyon etkisi, Monod kinetiğini esas alan Haldane denklemi veya diğer farklı düzenlemeleri şeklinde ifade edilen eşitlikler ile tanımlanır:

$$\mu = \frac{\mu_m S}{S + K_s + S^2/K_I} - b \tag{12.20}$$

Burada K_I, Haldane inhibisyon katsayısıdır. Bir aktif çamur sisteminde, plastik katkı maddelerinin yol açtığı inhibisyonun etkisi Şekil 12.22'de verilmiştir. Burada inhibisyon derecesi, belli bir inhibitör madde konsantrasyonundaki OTH, K_r değerinin inhibitör madde olmadığı durumdaki OTH'na, K_0, oranına bağlı olarak gösterilmiştir.

Her bir atıksuyun biyoinhibisyon etkisi ayrı olarak belirlenmelidir. Bu maksatla geliştirilmiş çeşitli deneysel ölçüm protokolleri mevcuttur: kesikli beslemeli reaktör testi, OECD metodu ve glikoz inhibisyon testi. Atıksuyun tipine göre bir veya birden fazla yöntemle inhibisyon testi yapılabilir.

Şekil 12.22. Aktif çamur sisteminde, plastik katkı maddelerinin yol açtığı inhibisyonun etkisi [4]

- **<u>Organik Madde Gideriminin Matematiksel İfadesi:</u>**

Çeşitli tipte organik atık bileşenleri içeren kompleks bir atıksu için, çok bileşenli biyokimyasal oksidasyon prosesi (Şekil 12.23) aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [5].

$$\frac{dS}{dt} = -K_n X_a \left(\frac{S}{S_0}\right)^n \tag{12.21}$$

Burada;

S : t anındaki substrat konsantrasyonu (mg/L)
S_0 : başlangıçtaki substrat konsantrasyonu (mg/L)
X_a : Reaktördeki aktif biyokütle konsantrasyonu (mg/L)
t : zaman (gün)
K_n : ampirik bir sabit (gün^{-1})
n : fonksiyonun mertebesi

Şekil 12.23. Kompleks bir atıksu için, çok bileşenli biyokimyasal oksidasyon prosesi [4]

Aktif mikroorganizma biyokütlesi, X_a;

$$X_a = X_v \frac{X_d}{0{,}8} f_b \tag{12.22}$$

ifadesinden bulunabilir. Burada;

X_v : reaktördeki AKM konsantrasyonu, (mg UKM/L)
f_b : AKM'deki biyokütle oranıdır.

Reaktöre beslenen atıksuda UKM=0 ise f_b=1,0 olur. Giriş atıksuyundaki UKM biyobozunur değilse;

$$f_b = 1 - \frac{X_i\, \theta_c}{X_v\, \theta_h} \tag{12.23}$$

ifadesinden hesaplanır. Girişteki UKM biyobozunur yapıda ise f_b, daha önce verilen Denklem (12.15)'ten bulunur.

Atıksudaki çoklu substrat bileşenlerinin her birine özgü gerçek biyobozunma hızlarına bağlı olmaksızın Denklem (12.21)'in integrali alınırsa; kesikli veya sürekli beslenen (akımlı) piston akışlı reaktörler için biyolojik arıtma performansı elde edilir. Denklem (12.21)'in n =1 ve 2 için analitik çözümleri aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$n = 1, \qquad S_e = S_0\, e^{-K_1\, f_b\, X_v\, (\theta / S_0)}$$

$$n = 2, \qquad S_e = {S_0}^2 / (S_0 + K_2\, f_b\, X_v\, \theta)$$

Burada;

S_e : sürekli beslenen piston akışlı (PAR) veya kesikli beslenen reaktör çıkışındaki KOİ veya $BOİ_5$ konsantrasyonu, mg/L

θ : sürekli beslenen PAR'ın hidrolik bekletme süresini veya kesikli beslenen test reaktöründeki reaksiyon süresi (gün)

K_1 : 1. Mertebe reaksiyon sabiti, $gün^{-1}$

K_2 : 2. Mertebe reaksiyon sabiti, $gün^{-1}$

Tam karışımlı bir reaktördeki biyokimyasal oksidasyon ifadesi de,

$$\frac{S_0 - S_e}{X_v\, \theta} = K\, \frac{S_e}{S_0} \tag{12.24}$$

eşitliği ile verilir. Çeşitli organik bileşiklerin rölatif biyobozunabilirlikleri Tablo 12.15, bazı endüstriyel atıksular için önerilen substrat giderim hızı sabitleri (K) ise Tablo 12.16'da verilmiştir.

Tablo 12.15. Çeşitli organik bileşiklerin rölatif biyobozunabilirlikleri [2]

Biyobozunabilir organik bileşikler(1)	***Biyobozunamayan bileşikler***
Akrilik asit	*Etherler*
Alifatik asitler	*Etilen klorohidrin*
Alifatik alkoller (normal, izo, ikincil)	*İzopren*
Alifatik aldehitler	*Metil vinil keton*
Alifatik esterler	*Morfolin*
Alkil benzen sülfonat, propilen bazlı benzaldehit hariç	*Yağ*
Aromatik aminler	*Polimerik bileşikler*
Diklorofenoller	*Polipropilen benzen sülfonat*
Etanolaminler	*Bazı hidrokarbonlar*
Glikoller	*Alifatikler*
Ketonlar	*Aromatikler*
Metakrilik asit	*Alkil-aril grupları*
Metil metakrilat	*Üçüncül alifatik alkoller*
Monoklorofenoller	*Üçüncül alifatik sülfonatlar*
Nitriller	*Triklorofenoller*
Fenoller	
Birincil alifatik aminler	
Stiren	
Vinil asetat	

(1)Bazı bileşikler, sadece uzun alıştırma süreleri sonrasında biyobozunur özelliktedir.

Tablo 12.16. Bazı endüstriyel atıksular için önerilen substrat giderim hızı sabitleri [2]

Atıksu	*K, gün^{-1}*	*Sıcaklık, °C*
Patates işleme	*36,0*	*20*
Pepton	*4,03*	*22*
Sülfit kağıt üretimi	*5,0*	*18*
Vinil asetat monomeri	*5,3*	*20*
Polyester elyaf	*14,0*	*21*
Formaldehit, propanol, metanol	*19,0*	*20*
Selüloz asetat	*2,6*	*20*
AZO boyaları, epoksi, optik ağartıcılar	*2,2*	*18*
Petrol rafinerileri	*9,1*	*20*
Bitkisel tabakhane	*1,2*	*20*
Organik fosfatlar	*5,0*	*21*
Yüksek azot organikleri	*22,2*	*22*
Organik ara ürünler	*20,6*	*26*
	5,8	*8*
Viskoz rayon (iplik) ve naylon	*8,2*	*19*
	6,7	*11*
Evsel atıksuyun çözünebilir kısmı	*8,0*	*20*

12.3.4. Türkiye'de Endüstriyel Atıksu Yönetimi

12.3.4.1. Genel İdari ve Yasal Çerçeve

Türkiye'de endüstriyel atıksu arıtma tesisi (EAAT) deşarjlarının izleme, denetim ve kontrollerinde merkezi ve mahalli yönetim birimleri arasında görev (Sorumluluk) paylaşımını esas alan parçalı bir yapı söz konusudur.

Büyükşehir Belediyelerinin (BB) bulunduğu illerde, il idari sınırları içinde yer alan EAAT çıkış sularının belediyelere ait atıksu kanalizasyon sistemlerine deşarjı Büyükşehir Belediyesi Su Kanalizasyon İdareleri (SKİ) tarafından izlenmektedir.

Ülke genelindeki bütün evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesisleri çıkış sularının alıcı ortamlara verilmesi dolayısıyla deşarjların izleme, denetim ve kontrolü, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) İl Çevre ve Şehircilik Müdürlükleri (İl ÇŞM)'nce yapılmaktadır. Büyükşehir SKİ'nde, yeterli kapasitenin mevcut olduğu illerde EAAT çıkışlarının izlenmesi BB SKİ'ne de bırakılabilmektedir. Ancak bütün belediyelerin ve organize sanayi bölgelerinin (OSB) merkezi AAT çıkışlarının izleme, denetim ve kontrolü, ÇŞB Su Kirliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) Sektör Tablolarında belirtilen deşarj standartları esas alınarak, ÇŞB İl ÇŞM'nce gerçekleştirilmektedir.

Endüstriyel atıksuların, belediye atıksu kanal şebekelerine deşarjında, SKKY Tablo 25'te belirtilen çerçeve kriterler gözetilerek uygulama yapılmaktadır. BB SKİ'leri ve OSB Müdürlükleri Tablo 25'teki deşarj limitlerini sıkılaştırıcı yönde kararlar ihdas edebilmektedirler.

Atıksu, göl, kıyı ve geçiş sularına yapılan deşarjların, alıcı ortamda karışım bölgelerindeki etkilerinin izlenmesi ve kontrolü, Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB) Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) yetkisindedir. Ancak nitrat kirlenmesine hassas alanlarda bu yetki Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı (GTHB) İl Müdürlükleri'ne aittir. OSİB SYGM, kıta içi yüzey ve yeraltı sularının izlenmesini, D Sİ Genel Müdürlüğü, kıyı ve geçiş sularının izlenmesini ise ÇŞB desteği ile yürütmektedir.

Endüstriyel atıksuların belediye atıksu kanal sistemleri ile alıcı su ortamlarına deşarjını düzenleyen mevzuat Tablo 12.17'de özetlenmiştir.

Tablo 12.17. Endüstriyel atıksuların belediye atıksu kanal sistemleri ile alıcı su ortamlarına deşarjını düzenleyen mevzuat özeti

Mevzuat	***Uygulayıcı Kurum***
Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)	*İl ÇŞM*
Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği	*BB SKİ*
BB SKİ Atıksu Kanalizasyon Şebekelerine Deşarj Yönetmelikleri	*BB SKİ*
OSB Müdürlükleri Atıksu Kanalizasyon Şebekelerine Deşarj Yönetmelikleri	*OSB Müdürlükleri*
İçmesuyu Havzaları Yönetmeliği	*BB SKİ*
Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği	*OSİB SYGM*
Yüzme Suyu Kalitesi Yönetmeliği	*Sağlık Bakanlığı İl Sağlık Müdürlükleri*
Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği	*GTHB İl Müdürlükleri*
Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik	*OSİB DSİ Genel Müdürlüğü/*
Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği	*ÇŞB ÇYGM*

Türkiye'nin AB uyum süreci kapsamında, su kaynaklarının havza esaslı bütünleşik yönetimi esas alınarak, akarsu havzasındaki bütün noktasal ve yayılı kaynakların Havza Koruma Eylem Planları'nda öngörüldüğü şekilde kontrol altına alınarak bütün su kütlelerinde "İyi Durum" şartlarının sağlanması hedeflenmiştir. ÇŞB Su Yönetimi Genel Müdürlüğü koordinatörlüğü altında yürütülen ilgili planlama ve izleme çalışmaları yoğun biçimde devam etmektedir. Nehir Havzası Yönetim Planları'nda "İyi Su" durumunu sağlamak üzere havzalara özel ve çevresel kalite standartlarına bağlı olarak geliştirilen daha kısıtlayıcı deşarj standartları da getirilebilecektir.

12.3.4.2. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Stratejileri

Türkiye'de Endüstriyel Kirlenme Kontrolü ile ilgili olarak ülke genelinde uygulanmakta olan stratejide esas alınan temel hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Endüstrilerden kaynaklanan tehlikeli maddeler ve öncelikli kirleticilerin, genel deşarja katılmadan önce, kaynağında kontrolü (önlenmesi),
- AB'nin endüstriyel sektörlere özel mevcut iyi teknoloji (MET, BAT) ve daha temiz üretim Rehber (BREF) dokümanları dikkate alınarak; tesis içi önlemler, daha az su, enerji ve kimyasal kullanımını sağlayacak teknolojilerin teşvik edilmesi,
- Sanayi tesislerinin azami ölçüde OSB'lerde kurdurulması ve OSB'ler dışında tekil sanayi tesisleri kurulumunun, çok özel gerekçeler dışında, önlenmesi. Mevcut OSB'lerdeki doluluk oranı %70'i aşmadıkça yeni OSB kurulumunun da sınırlandırılması,
- SKKY sektör tablolarında öngörülen atıksu deşarj limitlerinin, endüstriyel tesislerin yer aldığı su havzaları ve su kütlelerine özgü çevresel kalite hedefleri gözetilerek, tedricen sıkılaştırılması,
- Endüstriyel atıksularda su, ısı, elektrik, biyogaz, kostik, değerli metaller vb. gerikazanımının teşviki.

Problem 12.7

Gıda (Fermantasyon) Endüstrisi için AAT Tasarımı ve Performans Analizi

İncelenen gıda (fermantasyon) endüstrisi atıksuları başlıca üç ana gruba ayrılabilmektedir:

- *Evaporasyon kondensat suyu : Q_{EVAP} = 900~1000 m^3/gün (KOİ = 2000~3000 mg/L)*

- *Döner Filtre (Filtrasyon) Suları: Q_{DF} = 450 – 500 m^3/gün (KOİ = 15.000~20.000 mg/L)*
- *Diğer Seyreltik (Yıkama) Sular: Q_{YS} = 400 - 5000 m^3/gün (KOİ = 1000~1500 mg/L)*

Yukarıdaki 3 farklı atıksu akımı, anaerobik arıtma öncesi bir dengeleme havuzuna alınarak debi ve konsantrasyon homojenizasyonu sağlanmaktadır. Söz konusu dengeleme havuzu çıkışının beklenen tipik KOİ değerleri aşağıdaki gibidir:

$$KO\dot{I}_{DEN} = \frac{1000x3000\ (2000)^* + 500x20.000(15.000)^* + 500x1500(1000)^*}{2000\ m^3/gün\ (1750)^*} = 6785\ (5714)^* mg/L$$

Tesisin güncel işletme şartlarında dengeleme çıkışındaki KOİ değerlerinin 4500-5000 mg/L (maks. 6000 mg/L) aralığında kaldığı bilinmektedir.

İncelenen endüstriyel atıksu arıtma tesisi (AAT) P &I diyagramı aşağıdaki Şekil A'da, basitleştirilmiş akım şeması ise Şekil B'de verilmiştir. AAT'nde bulunan başlıca birimler ve kapasiteleri aşağıda özetlenmiştir.

<u>Dengeleme Havuzu (V101)</u> : $V_{sıvı}$ = 1000 m^3, $N_{karıştırıcı}$ =3 KW

<u>Anaerobik Arıtma Kademesi:</u>

- *Şartlandırma Tankı (T201)* : $V_{sıvı}$ = 14 m^3, Q_h = 120 m^3/sa
- *Anaerobik Reaktör (T202)* : $V_{sıvı}$ = 1000 m^3, Q_h = 120 m^3/sa
  D = 9,5 m, T = 35-37.℃
  H = 16,5 m
- *Kimyasal Gaz (H_2S) Absorplayıcı (T_{206})*: $V_{sıvı}$ = 3,3 m^3, $Qgaz_h$ = 300 m^3
  D = 0,8 m
  H = 7,0 m
- *Gaz Balonu (T207)* : V = 1000 m^3
- *Gaz Yakıcı (flare)(F201)* : Q_{gaz} = 300 m^3/sa

<u>Gazdan Enerji Üretim Sistemi</u> : Q_{gaz} = 250 m^3/saat, 83 % CH_4, 17 %CO_2, 8000-10000 ppm H_2S

<u>Anaerobik Arıtma Kademesi</u>

- *Havalandırma havuzları (V302 A /B)* : V_A = 5000 m^3, Q_h = 120 m^3/sa
  H_{su} = 4 m
- *Havalandırıcı kapasitesi (CB 301)* : Q_h = 3000 m^3/sa, P = 400 mbar
- *Geri devir pompaları* : $Q_{r,A}$ = 60 m^3/sa
- *Son çökeltim havuzları (V303 A /B)* : D_A= 18 m, H_{kenar} = 3,5 m

<u>Çamur yoğunlaştırıcı (V 401)</u> : $Q_{yoğun\text{-}çamur}$ = 40 m^3/gün, θ_h = 5 sa
D = 11 m, H_{kenar} = 3,5 m
% KM = 1-1,5

- *Yoğunlaşmış çamur pompaları* : Q = 10 m^3/sa

<u>Çamur Susuzlaştırıcı (Dekantör) (F 401)</u> : Kapasite: 10 m^3/sa
Kek KM oranı = % 20-25
PE kullanımı = 2,5 kg PE/ton KM

V-101. Dengeleme Havuzu, **E-201.** Ön Isıtma, **T-201.** Şartlandırma Kolunu, **T-202.** Anaerobik Reaktör, **T-203.** Kostik, **T-204.** Asit, **T-205.** Demirüç Klorür, **T-208.** Antisklant, **T-206.** Kimyasal Scrubber, **T-207.** Gaz Balonu, **F-201.** Flare, **V-302 A/B.** Havalandırma Havuzu, **CB-301.** Blower, **V-303 A/B.** Çöktürme Havuzu, **V-401.** Çamur Yoğunlaştırma. **T-401.** Polimer, **F-401.** Dekantör

Şekil a. *İncelenen atıksu arıtma tesisi (AAT) P &ID*

Şekil b. *İncelenen atıksu arıtma tesisi (AAT) basitleştirilmiş akım şeması*

İncelenen atıksu arıtma sistemi, iki kademeli (Anaerobik+Aerobik) biyolojik arıtma prosesi olarak tasarlanmış olup, arıtılmış atıksuların SKKY sektör tablosunda öngörülen alıcı ortama deşarj limitlerinin (24 saatlik ortalamalar için KOİ≤1000 mg/L , AKM≤100 mg/L, Yağ-Gres≤30 mg/L) sağlanması hedeflenmiştir. AAT'nin tasarımına esas debi ve kirlilik yükleri Tablo a'da verilmiştir.

Tablo a. *AAT tasarımına esas debi ve kirlilik parametreleri*

Atıksu	*Debi (m^3/gün)*	*KOİ (mg/L)*	*AKM-30 dk (mg/L)*	*Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)*	*Sülfat (mg/L)*	*İletkenlik (µs/cm)*	*pH*	*Sıcaklık (Yaz/Kış)*
Evaporasyon Kondensat Suyu	*1.000*	*3.000*	*0*	*200*	*200*	*1.300*	*4,5-8,5*	
Filtrasyon Suları	*500*	*20.000*	*1.200*	*1.140*	*2.950*	*45.000*	*5-6*	
Diğer Seyreltik Sular	*1.380*	*3.140*	*170*	*295*	*635*	*2.50*	*5-8*	
Toplam debi ve ort. değerler	*2.880*	*6.018*	*290*	*409*	*886*	*9.462*	*5-8*	*21/35*

Mevcut AAT ile kısmi nitrifikasyon yapılabilmekle birlikte denitrifikasyon imkanı bulunmamaktadır. Ancak havalandırma havuzlarında uygun havalandırma/karıştırma düzenlemesi ile anoksik zonlar oluşturulup, sisteme içsel geri devir (nitratlı su geri devri) eklenerek yüksek oranda nitrifikasyon+denitrifikasyon da gerçekleştirilebilecektir.

AAT PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ

AA Firması tarafından inşa edilerek devreye alınan AAT'nin işletme performansını değerlendirmek üzere, tesiste bir seri kalite izlemesi gerçekleştirilmiştir. Bu izleme çalışması sonunda elde edilen ölçüm sonuçları ortalamaları da aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir (Tablo b).

a. Mevcut İşletme Şartları İçin Değerlendirme

AAT'nin tasarım yükünün ~%55'i civarında bir hacimsel organik yükle işletildiği bu dönemde, AAT'nin ortalama KOİ ve TN giderimleri aşağıdaki gibidir:

Anaerobik Reaktör

$$E_{KOİ} = \frac{4995 - 1369}{4995} \cong 0{,}73$$

Aerobik Kademe

$$E_{KOİ} = \frac{1369 - 782}{1369} \cong 0{,}43$$

$$E_{TN} = \frac{318 - (117 + 39)}{318} \cong 0{,}51$$

Anaerobik arıtma kademesinde giderilen KOİ'nin biyometan eşdeğeri;

$$Q_{CH_4} \cong 1600\ m^3/gün * (5{,}092 - 1{,}369) * 0{,}35 = 2085\, m^3/gün\ (0°C, 1\ atm)'dir.$$

Yukarıdaki KOİ giderimleri, KOİ ağırlıklı olarak anaerobik kademede giderildiğini anaerobik arıtma çıkışının arıtıldığı aerobik kademede ise zor ayrışan yapıdaki kalan KOİ'nin ancak sınırlı oranda (≤ %50) giderilebildiğini göstermektedir. Mevcut AAT çıkışında, ilgili sektör tablosunda öngörülen deşarj limitleri (KOİort ≤ 1000 mg/L , AKM ≤ 100 mg/L) sağlanmaktadır. Ancak, beklendiği üzere, elektriksel iletkenlik veya TÇM ile Renk parametrelerinde anlamlı bir giderim gerçekleştirilememektedir.

Tablo b. *İncelenen AAT performans izleme sonuçları özeti*

Numune alma yeri	KO İtop	KOİçöz	BOİ5	AKM	TÇM	TP	TKN	NH4-N	NO3-N	SO4=	Renk
Dengeleme çıkışı (1)	4995	3973	1950	398	6180	10	318	138	-	404	296
Anaerobik R. Girişi (2)	2624	-	-	317	-	-	-	-	-	-	-
Anaerobik R. Çıkışı (3)	1369	1019	-	273	-	12	-	-	-	-	-
Son çökeltim çıkışı (deşarj)(4)	782	671	75	~100	5121	16	117	72	39	-	290

İncelenen AAT'nin izleme (deneme işletmesi) dönemindeki ortalama işletme parametreleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Tablo c).

Anaerobik reaktör (kademe):

- *Debi: 1500-1700 (1600) m^3/gün*
- *Hacimsel org. yükleme:* $L_V = \frac{S_0}{\theta_h} = 8\ kgKOİ/m^3 * gün$
- *Biyometan üretimi:* $Q_{CH_4} = 2085\, m^3/gün$
- *Beklenen fazla çamur miktarı:* $P_{X,AN} \cong 0{,}02 * (0{,}70 * 5{,}092 * 1600) \cong 114\ kg\ KM/gün$

Aerobik kademe:

- $V_{Aerobik} = 5000\, m^3$

- $MLSS\ (X) \cong 3700\ mg/L$
- $\theta_c \cong 34\ gün$
- $Q_r = 60m^3/sa\ * 24 = 1440\ m^3/gün, (r = Q_r/Q \cong 0{,}72)$
- *Fazla çamur,* $P_x \cong \frac{3{,}7*5000}{34} = 544\ \ kg\ KM/gün, (2720\ kg\ Kek/gün, \%20\ KM)$
- *Net (biyokütleye) dönüşüm oranı,*

$$Y_{net} \cong \frac{544\ kg\frac{AKM}{gün}}{(1{,}369-0{,}774)*1600\ kg\frac{KOİ}{gün}} = 0{,}57\ kg\ \frac{KM}{kg} KOİ\ giderilen(Fazla\ anaerobik\ biyokütle\ dahil)$$

$$Y_{net} \cong \frac{(544-114)\ kg\ \frac{AKM}{gün}}{(1{,}369-0{,}774)*1600\ kg\ \frac{KOİ}{gün}} = 0{,}45\ kg\ \frac{KM}{kg} KOİ\ giderilen(Anaerobik\ biyokütle\ hariç)$$

Tablo c. *İncelenen AAT deneme işletmesi dönemi havalandırma havuzları performans izleme sonuçları*

Parametre	1. Havalandırma Havuzu			Ortalama	2. Havalandırma Havuzu			Ortalama
	13.01	15.01	18.01		13.01	15.01	18.01	
SVI (mg/L)	162	167	179	169	182	182	194	186
İMHOFF (mL/L)	600	550	550	567	750	800	700	750
AKM (mg/L)	3704	3300	3060	3355	4121	4380	3600	4034

Tesis çıkışındaki KOİ'nin inert ve biyobozunur bileşenlerinin analizi;

İncelenen maya/fermantasyon endüstrisi atıksularının inert ve biyobozunur bileşenlerinin deneysel olarak belirlenmesine yönelik olarak daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında, fermantasyon endüstrisi atıksularıyla ile ilgili olarak farklı atıksu akımları için beklenen tipik özelliklerin aşağıda Tablo d'de özetlenebileceği öngörülmektedir:

Tablo d. *İncelenen fermantasyon endüstrisi proses atıksularının inert KOİ oranları ve seviyeleri*

	Q (m^3/gün)	S_0 = KO $İ_{top}$ (mg/L)	$S_{IO}^{(*)}/S_0$	S_{IO} (mg/L)
EVAP kondensatı	900-1000	2000-3000	~0	~0
Döner filtre suları	450-500	15.000-20.000	0,10-0,15	~2000
Diğer yıkama suları	400-500	1000-1500	0,02-0,03	~30

$S_{IO}^{(*)}$: *Başlangıçtaki iner KOİ (mg/L)*

Tablo d'deki değerler dikkate alındığında, dengeleme çıkışı veya anaerobik reaktör girişindeki inert KOİ,

$$S_{IO,AN} = \frac{1000x0 + 500x2000 + 500x30}{2000} = 510\ mg/L$$

olarak öngörülmektedir. Aerobik arıtma çıkışındaki ort. KOİ değerleri aşağıdaki gibidir:

$KOİ_T$ = 782 mg/L

$KOİ_{çöz}$ = 671 mg/L

$BOİ_5$ = 75 mg/L ($BOİ_U \cong$ 75/0,68 = 110 mg/L)

AKM = 100 mg/L (→ S)

Bu durumda AAT'den deşarj edilen atıksudaki biyobozunur KOİ miktarı,

$$KOİ_{BB} = 782 - 510 = 272\ mg/L$$

dir. Söz konusu 272 mg/L'lik KOİ'nin ~110 mg/L'si $BOİ_U$, *takriben 55 mg/L'lik kısmı (*$\sim 0{,}50 * 100\ mgAKM/L * 1{,}1\ mg\ KOİ/mg\ AKM$*) ise biyobozunur AKM olacağı dikkate alınırsa, deşarj edilen atıksudaki kolay biyobozunur KOİ miktarı ~ 110 + 55 = 165 mg/L civarındadır.*

İncelenen AAT'nde işletme şartlarının neredeyse ideal duruma getirilmesi durumunda, deşarj (çıkış) suyundaki teorik olarak ulaşılabilir en düşük KOİ'nin, % 90'lık biyobozunur KOİ giderimi kabulü ile;

$KOİ_{çıkış} \cong 510 + (1-0,90) \times 165 + 45$ mg $KOİ$ $(AKM_{İNERT})/L = 572 \approx 575$ mg/L

olması beklenir. Ancak pratikte biyolojik arıtma sürecinde oluşan çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) de dikkate alındığında, AAT çıkışındaki en düşük KOİ'nin ~600 mg/L civarında olması daha gerçekçi bir durumdur.

Tesiste, kısmi nitrifikasyon (+denitrifikasyon), NH_3-N formunda atmosfere salım ve biyokütle sentezinde kullanım dolayısıyla ~% 50 oranında TN giderimi de gerçekleşmektedir.

b. Tasarımda Esas Alının İşletme Şartları İçin Değerlendirme

AAT'nin, anaerobik kademenin tasarımına özel esas hacimsel organik yükü olan ~17,25 kg KOİ/m^3/gün değerinin ~%85'ine eşdeğer bir yük altında işletilmesi durumunda, beklenen performans değerlerinin normal işletme şartlarında Tablo e 'deki gibi alınabileceği düşünülmektedir.

Tablo e. *AAT'nin %50 ve %85 hacimsel organik yük (HOY) altında işletilmesi halleri için beklenen tipik performans değerleri*

	Biyolojik Arıtma Tesisi Performans Değerlendirme Tablosu					
	1 (Dengelemeden Çıkış)		3 (An. Reaktörden Çıkış)		4 (Deşarj)	
Parametre	%50 HOY'e göre Ort.	%85 HOY'e göre Ort.	%50 HOY'e göre Ort.	%85 HOY'e göre Ort.	%50 HOY'e göre Ort.	%85 HOY'e göre Ort.
İletkenlik (µS/cm)	8,38	9,89	9,22	9,40	8,82	
Sıcaklık(C^0)	25,05	21,70	35,55	33,37	25,70	
pH	6,21	6,44	7,27	7,16	8,09	8,26
$KOİ_{TOPLAM}$ (mg/L)	4.994	5.651	1.369	1.980	774	~1000
$KOİ_{ÇÖZÜNMÜŞ}$ (mg/L)	3.973		1.019	1.485	655	~800
$BOİ_{ÇÖZÜNMÜŞ}$ (mg/L)	1.948		195	~200	78	100
AKM (mg/L)	398	513	272	300	102	160
UAKM (mg/L)	0		0		0	
TKN (mg/L)	318		290	~300	117	
NH4-N (mg/L)	138		219		72	
SÜLFAT (mg/L)	404		116	120	-	
Toplam Fosfor (mg/L)	10		12	12	16	
TDS (mg/L)	6.219		4.901		5.075	
RENK(Pt-Co)	2.677		2.678		2.907	
NO3-N (mg/L)					23,57	

Bu duruma karşı gelen tipik ortalama performans değerleri aşağıdaki gibi alınabilir:

<u>Anaerobik kademe:</u>

$$Q = 0,85 * 2880 \cong 2500\ m^3/gün$$

$$\theta_h = 1000/2500 = 0,4\ gün$$

$$L_v = \frac{5,651}{0,4} = 14,1 kg\ KOİ/m^3 gün$$

$$E_{KOİ} \cong \%65$$

Anaerobik çıkışındaki KOİ;

$$KOİ = (1 - 0,65) * 5651 \cong 1980\ mg/L$$

<u>Aerobik kademe:</u>

Girişteki $KOİ \cong 1980\ mg/L$

$$\theta_h = 5000/2500 = 2,0\ gün$$

$$X = 4000 * 0,75 = 3000\ mg\ UAKM/L$$

$$F/M = \frac{1980}{2*3,0} = 0,33\ kg\ KOİ\ /\ kg\ UAKM\ gün$$

Aerobik kademe çıkışı (deşarj): $\sim \leq 1000\ mg\ KO\dot{I}/L$
$\leq 100\ mgAKM/L$

$$E_{Aerobik} \cong \frac{1980-1000}{1980} \cong 0{,}50$$

AAT'nin tasarıma esas hacimsel organik yüklemeye akın yükte işletimi durumunda inert KOİ değerlerinin Tablo f'teki gibi olması beklenmektedir.

Tablo f. *AAT'ye gelen atıksu akımlarında iner KOİ dağılımı (tasarım değerlerine yakın şartlarda işletim hali)*

	$Q\ (m^3/gün)$	$S_0 = KO\dot{I}_{top}\ (mg/L)$	S_{I0}^*/S_0	$S_{I0}\ (mg/L)$
EVAP kondensatı	*1.000*	*3.000*	*~0*	*~0*
Döner filtre suları	*500*	*20.000*	*0,10-0,15*	*~2.000*
Diğer yıkama suları	*1.000*	*3.000*	*0,02-0,03*	*~60*

S_{I0}^**: Başlangıçtaki inert KOİ*

Tablo f'teki verilere göre, anaerobik reaktör giriş (besleme) akımındaki inert KOİ,

$$KO\dot{I}_{IO,AN} = \frac{1000 * 0 + 500 * 2000 + 1000 * 60}{2500} = 424\ mg/L$$

olarak öngörülmektedir. Aerobik arıtma kademesi çıkışındaki deşarjdan beklenen kirlilik parametreleri (Tablo f) aşağıdaki gibidir:

$$KO\dot{I}_T = 1000\ mg/L$$

$$KO\dot{I}_Ç = 800\ mg/L$$

$$BO\dot{I}_Ç = 100\ mg/L\ (BO\dot{I}_U \cong 150\ mg/L)$$

$$AKM = 100\ mg/L$$

Bu durumda deşarj edilen atıksudaki biyobozunur KOİ,

$$KO\dot{I}_{BB} = 1000 - 424 = 576\ mg/L$$

dir. Söz konusu 576 mg/L KOİ'nin ~15 mg/L'si $BO\dot{I}_U$ *ve ~55 mg/L'lik kısmı biyobozunur AKM olacağı dikkate alınarak, deşarj akımındaki kolay biyobozunur (ayrışabilir) KOİ miktarı ~150+555=205 mg/L düzeyinde olacaktır.*

İncelenen AAT çıkışında tasarım yüklerine yakın işletme şartlarında ulaşılabilir en düşük KOİ'nin, %90 biyobozunur KOİ giderimi kabulü ile;

$$KO\dot{I}_{ÇIKIŞ} = 424 + (1 - 0{,}90) * 205 + 45\ mg\ KO\dot{I}\ (inert\ AKM) = 489{,}5\ \approx 490\ mg/L$$

olması beklenir. Ancak pratikte özellikle aerobik arıtma sürecinde oluşan çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) de dikkate alındığında, AAT çıkışındaki en düşük KOİ'nin ~600 mg/L düzeyinde olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Tunay, O., Kabdaslı, I., Hung, Y.T. (2004). Treatment of Metal Finishing Wastes in Hazardous Industrial Waste Treatment. Editors: L.K. Wang, Y.T. Hung, H.H Lo, C. Yapijakis. Taylor and Francis Group.

[2] Eckenfelder, W.W. Jr. (1989). Industrial Water Pollution Control. Second Edition, McGraw-Hill International Editions.

[3] Timur, H. ve Altınbaş, U. (1997). Treatability studies and determination of kinetic parameters for a high-strength opium production wastewater. Environmental Technology, Vol: 18, 339-344.

[4] Eckenfelder,W.W., D.L. Ford, A.J. Englande Jr. (2009). Industrial Water Quality, Fourth Edition. McGraw-Hill International Editions.

[5] Marshall, K.R., Harper, W.J. (1984). Surveys in industrial wastewater treatment. Vol. I. Food and allied industries. Editors: D. Barnes, C.F. Forster, S.E. Hrudey. Pitman Publishing Limited.

[6] Orhon, D., Germirli Babuna, F., Karahan, O. (2009). Industrial Wastewater Treatment by Activated Sludge. IWA Publishing.

[7] Patterson, J.W. (1985). Industrial Wastewater Treatment Technology. Butterworth-Heinemann; 2. Edition.

[8] Grau, P. (1975). Kinetics of multicomponent substrate removal by activated sludges. Water Research, vol 9, p. 637.

[9] Altınbaş, U., Dökmeci, S. ve Barıştıran, A. (1995). Treatability study of wastewater from textile industry. Environmental Technology, Vol: 16, 389-394.

[10] Degremont (2007). Water Treatment Handbook, 7th edition.

13. MÜHENDİSLİK EKONOMİSİNE GİRİŞ VE PROJE SEÇENEKLERİNİN ANALİZİ

[1]*Prof. Dr. İzzet Öztürk, Dr. Hale Özgün ve Çev. Müh. Hazal Gülhan*

13.1. Temel Kavramlar

Mühendislik ekonomisi genel terimleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Anapara (P): Yatırım yapılan veya borç verilen miktardır.

Paranın Zaman Değeri: Verilen bir dönem sonunda paranın miktarının değişmesi olarak tanımlanabilir (gerçek veya varsayıma dayalı olabilir).

Faiz: Paranın fiyatıdır. Faiz bir yüzde oranı olarak ifade edilir ve faiz oranı ile zaman (vade) arttıkça anaparaya bağlı olarak ödenecek toplam faiz tutarı da büyür. Bu durumda faiz; belirli bir meblağın bir vade ile kredi verilmesi halinde borçludan alınan fazlalık, yani borç verilen anaparanın getirisidir.

Faiz kredi veren için gelir, borç alan için ise maliyet oluşturarak alınır.

Faiz hesapları, paranın zaman değerinin varlığını ve ölçülmesini yansıtır.

Faiz Oranı (%i): Paranın maliyetini gösterir ve yüzde ile ifade edilir. Bazı durumlarda %i oranı iskonto oranını, büyümeyi, küçülmeyi, sermaye maliyetini ve getiri (verim) oranını da göstermektedir. %i hesaplarda reel faiz oranını ifade eder.

$$Faiz\ oranı\ (i) = \frac{Birim\ zamanda\ tahakkuk\ eden\ faiz\ miktarı}{Asıl\ miktar\ (Ana\ para)} * 100 \qquad (13.1)$$

Faiz Periyodu (n): Faiz oranında kullanılan zaman periyodudur.

Paranın Gelecekteki Değeri (F): P miktarındaki bir paranın %i faiz oranı ile n yıl sonunda ulaşacağı meblağı ifade eder.

Üniform Ödeme Değeri (A): n yıl içerisinde hep aynı miktarda gerçekleşen nakit akımlarını ifade eder.

Nakit Akışı: Belirli zamanlardaki gelir (nakit girişi) ve giderler (nakit çıkışı) arasındaki farktan yararlanılarak nakit akışı belirlenir ve genellikle Nakit Akış Diyagramları'yla ifade edilir.

Eşdeğerlilik: Şimdiki toplam para miktarını, gelecekteki veya gelecek zaman serilerindeki toplam para miktarına eşitlemek için kullanılan bir matematiksel ifadedir.

Basit Faiz: Sadece anaparanın faizi hesaplanarak ifade edilen faiz tipidir. Basit faizde, faizin faizi hesaplanmaz. Basit faizle alınan borcun dönem sonu miktarı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$F = P(1 + i\,n) \qquad (13.2)$$

Bileşik Faiz: Her dönem, bir önceki dönemdeki anapara ile faizin toplamı üzerinden hesaplanan faizdir. Bileşik faiz, bir dönemin sonundaki toplam anapara ile birlikte o döneme kadar hesaplanan faizlerin eklenik toplamını gösterir.

$$F = P(1 + i)^n \qquad (13.3)$$

Reel Faiz: Bir yıl içerisinde gerçekten elde edilen faiz oranına reel faiz oranı denir.

[1] İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İTÜ.

Nominal Faiz: Efektif faiz oranına temel teşkil eden ve görünürde yer alan faiz oranına ise nominal faiz oranı (%r) denir. Örneğin; altı aylık faiz oranı %10 olan devlet tahvillerinin nominal faiz oranı $10 * 2 = 20$ iken, reel faiz oranı bundan büyüktür. Reel faiz oranının büyük olmasının nedeni ilk altı aylık faiz miktarına da ikinci altı aylık dönemde faiz uygulanmasıdır. Yani reel faiz oranı $i = (1 + 0{,}2/2)^2 - 1 = 0{,}21$'dır. Reel ve nominal faiz ilişkisi aşağıdaki ifade ile verilebilir.

$$i = \left(1 + \frac{r}{M}\right)^M - 1 \tag{13.4}$$

$$i = (F/P\,, r/M\,, M) - 1 \tag{13.5}$$

M : Bir yıldaki Faiz Periyotlarının Sayısı

Bundan anlaşılacağı üzere M >1 ise i>r'dir.

13.2. Nakit Akış Diyagramları

Nakit akış diyagramları üzerinde, zamanın belirli noktalarında nakit girişlerinden nakit çıkışları çıkarılmak suretiyle nakit akışları belirlenir.

1) Gelir ve faydalar, pozitif tarafta ve yukarı yönlü oklarla temsil edilir.
2) Giderler, negatif tarafta ve aşağı yönlü oklarla temsil edilir.
3) Tüm nakit akışlarının, faiz dönemleri sonunda meydana geldiği varsayılır.

Problem 13.1

Bir A firması 10.000 $'lık bir yatırım yapmaktadır. Yatırımın işletilmesi ve bakımı için her yıl 3.000 $ harcanmakta olup, yıllık kazanç 5.310 $'dır. Faydalı ömrü 5 yıl ve hurda değeri 2.000 $ olan bu yatırımın nakit akış diyagramını çiziniz.

Çözüm.

Problem 13.2

Araba almak isteyen bir kişinin yapmış olduğu araştırmalar, yeni model araçların yılbaşı fiyatlarının, yıl sonu fiyatlarına göre %23 daha pahalı olduğunu göstermiştir. 3 yaşından sonra ise araçların değer kaybının yaklaşık %10 civarında olduğu tespit edilmiştir. Yeni bir arabanın değeri ise 35.000 TL'dir. Araç alacak kişi yıllık araç giderini minimum yapmak istemektedir. Bu durumda kişi yeni bir araç mı almalı yoksa kullanılmış bir aracı mı tercih etmelidir? Kullanılmış bir araç alacak ise kaç yaşında bir aracı tercih etmeli ve ne kadar süre sonra elden çıkarmalıdır?

Çözüm.

Problemin çözümü maliyet tablosu ile yapılırsa;

Araç Yaşı	*Aracın Değeri*	*Her Yıl Azalan Değeri*	*Yıllık Bakım Gideri*	*Azalan Değer ile Bakım Gideri Toplamı*
0	*35.000*	-	-	-
1	*26.950*	*8.050*	*150*	*8.200*
2	*20.752*	*6.198,5*	*200*	*6.398,5*
3	*15.979*	*4.772,8*	*250*	*5.022,8*
4	*14.381*	*1.597,9*	*350*	*1.947,9*
5	*12.943*	*1.438,1*	*450*	*1.888,1*
6	*11.648*	*1.294,3*	*650*	*1.944,3*
7	*10.484*	*1.164,8*	*850*	*2.014,8*
8	*9.435*	*1.048,4*	*1.000*	*2.048,4*

Tablodaki verilere göre araç toplam giderlerinin minimuma indiği yıl 3. yıldır. Bu seviyede yaklaşık 3 yıl kalmakta ve daha sonra toplam giderler tekrar artmaktadır. Bu verilere göre alıcı 3 yaşında olan bir aracı alarak 3 yıl sonra elinden çıkarır ise toplam giderini minimumda tutmuş olur.

Problem 13.3

Bir şirketin ofislerinin yenilenmesi ile ilgili yapılacak tamir ve onarım işleri için iki seçenek bulunmaktadır. Bu sistemler ofislerin ısıtma, soğutma ve havalandırma ünitelerinin yenilenmesini içermektedir. Aşağıdaki verilere göre hangi seçeneğin uygulanması daha ekonomiktir?

Seçenek A : Mevcut ısıtma, havalandırma, soğutma sistemlerinin bakımının yapılarak kullanılmaya devam edilmesi,

- *Ekipman, iş gücü ve malzeme yenilenmesi* *18.000 $*
- *Yıllık elektrik maliyetinin katılımı* *32.000 $*
- *Yıllık bakım giderleri* *2.200 $*

Seçenek B : Mevcut tesisat galerilerini kullanarak, ısıtma, havalandırma, soğutma sistemlerinin yeniden yapılması,

- *Ekipman, iş gücü ve malzeme montajı* *60.000 $*
- *Yıllık elektrik maliyetinin katılımı* *9.000 $*
- *Yıllık bakım giderleri* *16.000 $*
- *Yenisi ile yer değiştiren temel bileşenlerin 4 yıl için değeri* *9.400 $*

Sekiz yıl sonra Seçenek A'nın hurda değeri 2.000 $ iken, Seçenek B'nin hurda değeri 8.000 $'dır. Her iki seçeneğin de 8 yıl boyunca aynı konforu sağlayacağı ve 8. yıl sonunda Seçenek B'de eskilerinin yerini alan temel bileşenlerin piyasa değerinin olmadığı kabul edilecektir. (1) Her iki seçenek için de nakit akış tablolarını oluşturunuz. (2) Seçenekler arasında net yıllık akış farkını belirleyiniz (B-A). (3) 8 yıllık eklenik farkı belirleyiniz.

Çözüm.

A veya B seçeneklerinden biri seçilecektir.

Tabloda negatif ve pozitif nakit akışları yer alacaktır.

Her iki seçeneğin net akış diyagramına bakılarak seçim yapılacaktır.

Yıl	*Seçenek A Net Nakit akışı*	*Seçenek B Net Nakit akışı*	*Fark (B- A)*	*Eklenik Fark*
0 (Şimdiki Zaman)	*-18.000 $*	*-60.000 $*	*-42.000 $*	*-42.000 $*
1	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*-32.600 $*
2	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*-23.200 $*
3	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*-13.800 $*
4	*-34.400 $*	*-25.000 $-9.400 $*	*0 $*	*-13.800 $*
5	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*-4.400 $*
6	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*5.000 $*
7	*-34.400 $*	*-25.000 $*	*9.400 $*	*14.400 $*
8	*-34.400 $+2.000 $*	*-25.000 $+8.000 $*	*15.400 $*	*29.800 $*
Toplam	*-291.200 $*	*-261.400 $*		

Tablo her iki seçenek için de nakit akışını vermektedir. Tablodan görüleceği gibi ilk yıllarda ilk yatırım maliyetinin yüksek olması dolayısıyla, B seçeneği negatif değerler vermekte, yani kazanç sergilememektedir. Ancak 4. yılın sonunda sıfırlanan farkın 6. yıldan itibaren kazanç sağladığı görülmektedir. Firma bu verileri dikkate alarak her iki seçenek arasında seçim yapacaktır. ***Ekonomik analiz sonuçlarına göre B seçeneğinin net faydasının daha yüksek olduğu görülmektedir.***

13.3. Tekil Ödeme Faktörleri ve Eşdeğerlilik

13.3.1. Bugünkü Değer Üzerinden Gelecek Değerin (BDGD) Belirlenmesi

P verildiği zaman F 'nin bulunması:

Faktör:

$$F = P(1+i)^n \tag{13.6}$$

Mühendislik ekonomisi sembollerinde aşağıdaki notasyon kullanılır;

$$(F/P\,,\%i,n) = (1+i)^n \tag{13.7}$$

F /P BDGD faktörüdür.

Problem 13.4

100$ 10 yıllık birikim hesabına yatırılıyor (i=%6). 10 yıl sonundaki değeri nedir?

Çözüm.

$F = 100(1+0{,}06)^{10}$
$F = 179{,}08\ \$$

veya

$F = 100(F/P\,,\%6,10)$
$F = 100(1{,}791)$
$F = 179{,}10\ \$$

13.3.2. Gelecek Değer Üzerinden Bugünkü Değerin (Tekil Ödemeli Bugünkü Değer (TÖBD)) Belirlenmesi

F verildiği zaman P 'nin bulunması:

Bu faktör BDGD'in tersidir:

$$P = F\left[\frac{1}{1+i}\right]^n \tag{13.8}$$

Mühendislik ekonomisi sembolü olarak ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\left[\frac{1}{1+i}\right]^n = (P/F\,,\%i,n) \tag{13.9}$$

Fonksiyonel notasyonu ise aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$P = F(P/F\,,\%i,n) \tag{13.10}$$

$$\frac{1}{(F/P\,,\%i,n)} = (P/F\,,\%i,n) \tag{13.11}$$

Problem 13.5

Faiz oranı %6 olan birikim hesabında 10 yıl sonunda 1000 $ birikim olabilmesi için bugün yatırılması gereken para miktarı ne kadardır?

Çözüm.

$$P = 1000\ \$\left[\frac{1}{1+0{,}06}\right]^{10} = 558{,}39\ \$$$

veya

$$P = F(P/F\,,\%6,10) = 1000\ \$ * 0{,}5584 = 558{,}40\ \$$$

13.4. Üniform Serilerin Formülleri

13.4.1. Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Gelecek Değerin Belirlenmesi (ÜYÖGD)

A verildiği zaman F 'nin bulunması:

Bu faktör aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right] \tag{13.12}$$

Mühendislik ekonomisinde bu faktörün fonksiyonel sembolü aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$(F/A\,,\%i,n) \tag{13.13}$$

Nakit akış diyagramı aşağıdaki gibidir:

Önemli:

1. İlk ‘A’ ilk periyodun **sonunda** ifade edilir.
2. ‘F ’ ise en son ‘A’ nın oluştuğu zaman biriminde **anlık olarak** ‘A’ ile aynı anda oluşur.

13.4.2. Gelecek Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemelerin Belirlenmesi (GDÜYÖ), (Batık Fon Faktörü (BFF))

F verildiği zaman A’nın bulunması:

ÜYÖGD faktörünü “A ” için çözümlediğimizde BFF elde edilir.

$$A = F\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{13.14}$$

Standart notasyonu aşağıda verilmiştir.

$$A = F(A/F\,, \%i, n) \tag{13.15}$$

Bilinmeyen “A ”, bilinen “F ”dir.

13.4.3. Bugünkü Değer Kullanılarak Üniform Yıllık Eşdeğer Ödemelerin Belirlenmesi (BDÜYÖ), (Üniform Serilerde Sermaye Geri Ödeme (Kurtarma) Faktörü)

P verildiği zaman A’nın bulunması:

Batık fon faktöründeki F , tekil ödeme bileşeni $[P(1+i)^n]$ ile değiştirildiğinde, BDÜYÖ elde edilir.

$$A = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{13.16}$$

Standart notasyonu aşağıda verilmiştir.

$$A = P(A/P\,, \%i, n) \tag{13.17}$$

Nakit Akış diyagramı ise aşağıda verilmektedir.

Burada “A ” bilinmeyendir.

NOT: “P ” “A ”dan bir periyot önce başlamalıdır.

13.4.4. Üniform Yıllık (Eşdeğer) Ödemelerden Bugünkü Değerin (ÜYÖBD) Belirlenmesi:

A verildiği zaman P 'nin bulunması:

BDÜYÖ P için çözümlendiğinde ÜYÖBD elde edilir.

$$P = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right] \tag{13.18}$$

Mühendislik ekonomisi notasyonu aşağıda verilmiştir.

$$P = A(P/A\,,\%i, n) \tag{13.19}$$

Burada bilinmeyen "P "dir.

Aşağıdaki tabloda, tüm analizlerin değerlendirmesini içeren özet bilgi verilmektedir.

Tablo 13.1. Tüm analizlerin değerlendirilmesinin özeti

İstenen	***Verilen***	***Çarpım Faktörü***	***Faktörün Tanımı***	***Faktörün Fonksiyonel Gösterimi***
Tekil Ödemeler				
F	*P*	$(1+i)^n$	*Tekil Ödemelerde Gelecek Zaman Faktörü*	*(F/ P, %i, n)*
P	*F*	$(1+i)^{-n}$	*Tekil Ödemelerde Bugünkü Zaman Faktörü*	*(P/ F, %i, n)*
Yıllık Üniform Ödemeler				
F	*A*	$\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right]$	*Yıllık Üniform (eşdeğer) Ödemelerde Gelecek Zaman Faktörü*	*(F/ A, %i, n)*
P	*A*	$\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right]$	*Yıllık Üniform (eşdeğer) Ödemelerde Bugünkü Zaman Faktörü*	*(P/ A, %i, n)*
A	*F*	$\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right]$	*Batak Fon Faktörü*	*(A/ F, %i, n)*
A	*P*	$\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right]$	*Sermaye Ödeme (sermaye geri kazanımı) Faktörü*	*(A/ P, %i, n)*

Tekil ödeme formüllerinde 4 parametreden 3 tanesi bilinmelidir. Genellikle çözüme giden en iyi yol, nakit akış diyagramı oluşturularak doğru "n" değerini bulmaktır. Bazı durumlarda ise hesaplamalarda kullanılması gereken "i" açık olarak verilmeyebilir.

Üniform akış diyagramlarıyla ilgili çok önemli hususlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Her nakit akışı, ait olduğu dönemin sonunda gerçekleşir.
2. Her dönem sonu nakit akışı boyut olarak aynıdır.
3. "A " sembolü, İngilizcedeki yıllık anlamındaki 'Annual' kelimesinden gelmektedir. Fakat faiz periyodu aylık ya da çeyrek yıl için olabilmektedir.

Tablo 13.1'de özetlenen fonksiyonel faktörler, i = %4 ~ 6, 8, 10, 12 için Ek 2'de tablolar halinde verilmiştir.

Problem 13.6

5 yıl önce 1.000 $'a alınan bilgisayar malzemesi bugün 3.000 $ değerindedir. Geri dönüş oranı nedir? (Geri dönüş oranı = Faiz oranı)

Çözüm.

F /P veya P/F kullanılabilir:

$3000\$ = 1000\$\ (F/P\ ,\%i, 5)$

$(F/P\ ,\%i, 5) = (1+i)^5 = \dfrac{3000\$}{1000\$} = 3$

$(1+i) = 3^{1/5}$

$i = 1{,}2457 - 1 = 0{,}2457$

$i = \%\ 24{,}54\ Geri\ dönüş\ oranı$

Problem 13.7

Ahmet her ay sonunda maaşını almaktadır. Ahmet %2'lik faiz oranına sahip birikim hesabına her ay 100 $ koymaktadır. Bir yılın sonundaki bakiye kaç $'dır? İki yılın sonundaki bakiye nasıl olur?

Çözüm.

Faktör denklemi:

$F = A(F/A\ ,?,?)$

Faiz oranı %2 ise;

$i = \dfrac{\%2}{12} = \%0{,}1667$

1 yıllık dönem için periyot sayısı 12, 2 yıllık dönem için periyot sayısı 24'tür.

$F_{1y} = A(F/A\ ,\%0{,}1667, 12) = 100\ (12{,}111) = 1211{,}10\ \$$

$F_{2y} = A(F/A\ ,\%0{,}1667, 24) = 100\ (24{,}466) = 2446{,}60\ \$$

Not: $F_{2y} \neq 2(F_{1y})$

Problem 13.8

Yeni bir otomobil 28.000 $ değerindedir. Satıcı, 1.000 $ peşinat ile birlikte, 3 veya 4 yıl için %6 faizli ödeme seçeneği sunmaktadır. Bu teklifler için aylık ödemeler ne kadardır? Her iki durum için faiz miktarını hesaplayınız.

Çözüm.

Örnek için nakit akış diyagramı aşağıda verilmektedir.

Faktör denklemi:

$A = P(A/P\ ,?,?)$

3 yıl için, n=36 ve

Faiz oranı %6 olduğuna göre;

$i = \dfrac{\%6}{12} = \%0{,}5$

4 yıl için, n=48 ve

$A = 27.000\ \$\ (A/P\ , \%0{,}5, 36)$
$A = 27.000\ \$\ (0{,}030) = 810{,}00\ \$$

Ödenen faiz:
$I = 36(810{,}00\ \$) - 27.000\ \$ = 2160{,}00\ \$$

$A = 27.000\ \$\ (A/P\ , \%0{,}5, 48)$
$A = 27.000\ \$\ (0{,}023) = 621{,}00\ \$$

Ödenen faiz:
$I = 48(621{,}00\ \$) - 27.000\ \$ = 2808{,}00\ \$$

İki ödeme planı arasındaki faiz farkı: $\boldsymbol{\Delta I = 2808{,}00\ \$ - 2160{,}00\ \$ = 648\ \$}$

13.5. Proje Seçeneklerinin Karşılaştırılması

13.5.1. Bugünkü Değer Analizi ile Karşılaştırma

Bugünkü Değer (BD) analizi, projenin nakit akış değerlerini belirli bir faiz oranı ile başlangıç zamanına taşımaktır. Net Bugünkü Değer (NBD) analizi, eşit fayda sağlayacak projelerin, değişen ilk yatırım, işletme ve hurda değerlerine bağlı olarak bugünkü değerleri üzerinden değerlendirilerek karşılaştırılmasında kullanılan bir yöntemdir.

En iyi seçeneğin belirlenmesinde aşağıdaki yöntemler uygulanır.

1. Faydalar aynı ise, maliyet BD'i az olan seçilir.
2. Maliyetler aynı ise, fayda BD'i fazla olan seçilir.
3. Fayda ve maliyetler farklı ise, NBD'i fazla olan seçilir.

Problem 13.9

Bir petrol şirketinin, yeni kurulan rafineri tesisine ham petrol taşımak için yol üzerindeki nehirden boru hattı geçirmesi gerekiyor. Nehirden boruyu geçirmenin iki yolu vardır: Birincisi nehir üstünden, ikincisi ise nehir altından geçirmek. Her iki seçeneğin de maliyetleri aşağıda verilmiştir. Petrol şirketinin Minimum Geri Dönüş (Karlılık) Oranı (MGDO) (Minimum Attractive Rate of Return (MARR)) %10'dur. Petrol şirketi hangi seçeneği uygulamalıdır?

	Seçenek 1 ***Nehir üstünden***	***Seçenek 2*** ***Nehir altından***
Faydalı ömür	*20 yıl*	*20 yıl*
İlk yatırım maliyeti	*600.000 $*	*800.000 $*
Bakım ve onarım maliyeti	*25.000 $/y*	*0 $/y*
Hurda maliyeti	*0 $*	*0 $*

Çözüm.

Seçeneklerin maliyetleri aynı mı? – HAYIR

Seçeneklerin faydaları aynı mı? – EVET

1. Seçenek için:

$$BD_{maliyet} = 600.000\ \$ + 25.000\ \$\ (P/A\ , \%10, 20)$$

$$BD_{maliyet} = 600.000\ \$ + 25.000\ \$\ (8{,}514) = 812.850\ \$$$

2. Seçenek için:

$$BD_{maliyet} = 800.000\ \$$$

2. Seçeneğin maliyetinin BD'i daha az olduğundan 2. seçenek seçilmelidir.

Problem 13.10

Bir önceki örneği MGDO=%15 için tekrar çözün.

Çözüm.

1. seçenek için:

$$BD_{maliyet} = 600.000\ \$ + 25.000\ \$\ (P/A\ , \%15, 20)$$

$$BD_{maliyet} = 600.000\ \$ + 25.000\ \$\ (6{,}259) = 756.475\ \$$$

2. seçenek için:

$$BD_{maliyet} = 800.000\ \$$$

1. seçenek daha uygundur.

Problem 13.11

Aşağıda verilen nakit akış diyagramlarından hangisi daha iyi bir seçenektir? Faiz oranı (i) %15'tir.

Çözüm.

<u>*Yanlış Analiz:*</u>

$$BD_x = 5.000\ \$ + 500\ \$\ (P/A\ ,\%15, 5) = 5.000 + 500(3{,}352) = 6.676\ \$$$

$$BD_y = 5.000\ \$ + 500\ \$\ (P/A\ ,\%15, 10) = 7.510\ \$$$

Seçim: X

<u>*Doğru Analiz:*</u>

X'in 5 yıl sonra yenisiyle değiştirildiğini varsayalım. Böylelikle analiz periyotları değişmemiş olacaktır. Nakit akış diyagramı tekrar çizilir.

Yeni BD hesabı:

$$BD_x = 5.000\ \$ + 500\ \$\ (P/A\ ,\%15, 10) + 5.000\ (P/A\ ,\%15, 5)$$

$$BD_x = 5.000\ \$ + 500\ \$\ (5{,}019) + 5.000\ (0{,}4972) = 9.996\ \$$$

Seçim: Y

13.5.2. Kapitalize Maliyet (Değer) Metodu ile Karşılaştırma

Kapitalize Değer, bir projenin sonsuza kadar süreceği kabul edilip hesaplanan net bugünkü değeridir. Hesaplama yöntemi aşağıdaki gibidir.

1. Nakit akış diyagramı çizilir. Tüm tekrar etmeyen (tek seferlik) harcamalar ve en az 2 sefer tekrar eden harcamalar gösterilir.
2. Bütün tekrar etmeyen harcamaların bugünkü değeri hesaplanır.
3. Tüm tekrar eden harcamaların üniform yıllık ödemesi (A) tek bir periyot için hesaplanır.
4. Tüm tekrar eden harcamaların bugünkü değerini bulmak için hesaplanan üniform yıllık ödemesi (A), faiz oranına bölünür (tekrar sayısı sonsuz olduğu için bu formül kullanılır).
5. P =A /i
6. Bütün bugünkü değerler toplanır ve Kapitalize Değer elde edilir.

Kapitalize değer yönteminde, karşılaştırılan projeler için hesaplamada kullanılan periyotlar aynı olduğundan, kapitalize değeri az olan proje en ekonomik olandır.

Problem 13.12

Bir yerleşim yerinin su ihtiyacını karşılamak üzere üzerinde çalışılan 2 proje vardır. 1. Proje nehrin üzerine baraj kurmak, 2. Proje ise yeni kuyular açmak ve iletim hattı kurmaktır. Seçeneklerle ilgili masraflar tabloda verilmiştir. Faiz oranı %5 olduğuna göre, en ekonomik seçenek hangisidir?

	Seçenek 1 **Baraj**	***Seçenek 2*** ***10 kuyu ve iletim hattı***
Faydalı ömür	*Sonsuz*	*5 y*
İlk yatırım maliyeti	*10.000.000 $*	*100.000 $/kuyu*
Bakım ve onarım maliyeti	*25.000 $/y*	*10.000 $/y kuyu*

Çözüm.

Nakit akış diyagramları aşağıda verilmektedir.

1. seçenek (baraj) *2. seçenek (10 kuyu + iletim hattı)*

1. seçenek için kapitalize değer hesabı:

$$BD = 10.000.000\ \$ + \frac{25.000}{0,05} = 10.500.000\ \$$$

2. seçenek için kapitalize değer hesabı:

Kuyuların üniform yıllık ödemesi:

$$ÜYÖ = 100.000\ \$(10)(A/P\,,\%5,5) + 10.000\ \$(10) = 231.000\ \$ + 100.000\ \$$$

$$ÜYÖ = 331.000\ \$$$

Kapitalize değer:

$$BD = \frac{331.000\ \$}{0,05} = 6.620.000\ \$$$

2. seçeneğin kapitalize değeri daha az olduğu için 2. seçenek daha ekonomiktir.

13.5.3. Yıllık Eşdeğer Maliyetleri (YEM) Kullanarak Karşılaştırma

Temel Kavramlar aşağıda sıralanmaktadır.

Varlık : Alışveriş değeri olan her şey

Hurda Değeri: Varlığın faydalı ömründen sonraki değeridir. Mühendislik ekonomisinde 'S' (salvage value) olarak gösterilir.

YEF: Yıllık eşdeğer fayda

YEM: Yıllık eşdeğer maliyet

YND: Yıllık net değer

YND=YEF-YEM

En iyi seçeneğin belirlenmesinde aşağıdaki yöntemler uygulanır:

1. Faydalar aynı ise, YEM'i az olan seçilir.

2. Maliyetler aynı ise, YEF'sı fazla olan seçilir.
3. Fayda ve maliyetler farklı ise, YND'i fazla olan seçilir

Bu yöntem kullanılarak karşılaştırma yapıldığında, yıllık eşdeğer maliyet (YEM) varlığın sadece tek yaşam döngüsü için hesaplanmalıdır. Çünkü adından da anlaşılacağı üzere, YEM varlığın yaşam döngüsünün yıllık eşdeğeridir. Eğer proje birden fazla yaşam döngüsü için planlanıyorsa, bir sonraki yaşam döngüsündeki YEM ilk yaşam döngüsündekiyle tamamen aynı olmalıdır. Her döngüdeki nakit akışlarının aynı olduğu ve döngü sonunda seçeneklerin yenisiyle değiştirildiği kabul edilir.

Problem 13.13

Verilen nakit akış diyagramlarından hangisinin daha iyi bir seçenek olduğuna YEM yaklaşımını kullanarak karar veriniz. Faiz oranı (i) %15'tir.

Çözüm.

X seçeneği için 10 yıl bazında hesap:

$YEM = [P_1 + P_2(P/F\,,\%15,5)](A/P\,,\%15,10) + 500\$$

$YEM = [5000 + 5000(0{,}4972)](0{,}1993) + 500\$$

$YEM = 1491{,}96 + 500\$$

$YEM = 1992\ \$$

Y seçeneği için 10 yıl bazında hesap:

$YEM = P(A/P\,,\%15,10) + 500\$$

$YEM = 5000(0{,}1993) + 500\$$

$YEM = 1497\ \$$

Bu durumda Y seçeneği seçilir.

YEM yaklaşımıyla analiz yapıldığında, seçenekler için aynı analiz periyotları seçilmeyecektir. Y için yaşam döngüsü 10 yıl olduğundan hesap tekrar yapılmayacak, X için yaşam döngüsü 5 yıl olduğundan hesap yapılacaktır.

$$YEM = P(A/P\,,\%15,5) + 500\$$$

$$YEM = 5000(0{,}2983) + 500\$$$

$$YEM = 1992\ \$$$

YEM yöntemiyle yapılan analiz sonucunda da Y seçeneği uygun gözükmektedir.

YEM analizinde, hurda değerinin idare edilme yöntemlerine göre değişen üç ayrı metot kullanılır.

<u>1. Hurda Değerin Batık Maliyet Olarak Dikkate Alındığı Yöntem:</u>

HBF hesaplanırken önce ilk maliyetinin yıllık eşdeğeri A /P faktörü kullanılarak hesaplanır. Ardından diğer yıllık maliyetler eklenir. Hurda değer (S), yıllık eşdeğeri hesaplandıktan sonra ilk maliyetten çıkarılır. Formül aşağıdaki gibidir ('diğer' maliyetler hariç).

$$YEM = P(A/P\,,\%i,n) - S(A/F\,,\%i,n)$$

Problem 13.14

1982 yılında bir mikrobilgisayar, 5.500 $'a alınmıştır. Mikrobilgisayarın 5 yıl sonraki hurda değeri 500 $ olacaktır. Yıllık işletme maliyeti 100 $ olarak tahmin edilmektedir. Faiz oranı %7 olduğuna göre, YEM nedir?

Çözüm.

Nakit akış diyagramı aşağıda verilmektedir.

Diyagram parçalara ayrıldığında;

Yıllık işletme maliyeti,

Artı yıllık hesaplanmış ilk maliyet,

Eksi yıllık hesaplanmış hurda değeri,

$$YEM = A + P(A/P\,,\%7,5) - S(A/F\,,\%7,5)$$

$$YEM = 100 + 5500(0{,}2439) - 500(0{,}139)$$

$$YEM = 1354{,}50$$

2. Hurda Değerin Bugünkü Değeri Hesaplanarak Uygulanan Yöntem:

Bu metotta hurda değerinin bugünkü değeri ilk maliyetten çıkartılır. Aradaki fark varlığın yaşam döngüsü yılı için yıllık eşdeğere dönüştürülür. Formül aşağıdaki gibidir.

$$YEM = [P - S(P/F\,,\%i,n)](A/P\,,\%i,n) = (P - S)(A/F\,,\%i,n) + P(i)$$

Problem 13.15

Bir önceki örneği, Hurda Değerin Bugünkü Değerini hesaplayarak çözünüz.

Çözüm.

Hurda değerini geri getirin,

Bu değeri ilk maliyetten çıkarın ve yıllık eşdeğerini bulun,

Yıllık işletme maliyetlerini ekleyin,

Hesap aşağıdaki şekilde yapılır.

$$YEM = [P - S(P/F\,,\%7,5)](A/P\,,\%7,5) + A$$

$$YEM = [5500 - 500(0{,}7130)](A/P\,,\%7,5) + A$$

$$YEM = [5500 - 500(0{,}7130)](0{,}2439) + 100$$

$$YEM = 1254{,}50 + 100 = 1354{,}50\ \$$$

3. Faiz Formülleri ile Sermaye Geri Kazanımının Birlikte Dikkate Alındığı Yöntem:

Bu yöntem diğer iki yöntemden biraz daha değişiktir. Hurda değer ilk maliyetten paranın zaman değeri hesaba katılmaksızın çıkartılır. Elde edilen farkın yıllık eşdeğeri bulunur. Hurda değeri faydalı ömrün sonuna kadar geri alınamayacağı için, hurda değerine yıllık faiz tahakkuk edeceğinden hesaplanan farka eklenir. Formül aşağıdaki gibidir.

$$YEM = (P - S)(A/P\,,\%i,n) + S(i)$$

Problem 13.16

Aynı örneği Sermaye Kazanımı Artı Faiz yöntemi ile çözünüz.

Çözüm.

$$YEM = (P - S)(A/P\,,\%7,5) + S(0{,}07) + A$$

$$YEM = (5500 - 500)(0{,}2439) + 500(0{,}07) + 100$$

$$YEM = 1219{,}50 + 35 + 100 = 1354{,}50\ \$$$

Alıştırmalardan görüldüğü üzere, bu üç metot aynı sonucu vermektedir. Uygulamada, batık fon ve sermaye kurtarma yöntemi daha sık kullanılan metotlardır.

Bazı genel notlar aşağıda verilmiştir:

- Düzensiz ödemelerin olduğu durumlarda, bugünkü değer metodunun YEM analizinde kullanılması daha mantıklıdır.
- Varlıkların yaşam döngüsünün değiştiği durumlarda, bugünkü değer metodunun kullanılması kolaylık sağlar.
- Hurda değeri maliyet azaltıcı bir faktördür, fayda arttırıcı değildir.

Sürekli projelerin yıllık eşdeğer maliyetleri, basit olarak, ilk maliyetin yıllık faizi, periyodik maliyetlerin yıllık eşdeğerleri ve yıllık maliyetlerin toplamı olacak şekilde hesaplanır. Sonsuz sayıda periyot (n) için P /A faktörü aşağıdaki gibi olur.

$$A = P(i)$$

Problem 13.17

Bir şehrin yolları asfaltsız durumdadır ve düzenlemek için 2 seçenek vardır. 1. seçenek 65.000 $ maliyetle bir greyder alıp yolları düzeltmektir. Greyderin faydalı ömrü 10 yıl, hurda değeri 7.000 $, yıllık işletme maliyeti ise 22.000 $'dır. 2. seçenek ise yol döşemektir. Yol döşemenin ilk maliyeti 650.000 $, yıllık bakım maliyeti 1.000 $, her 5 yılda bir yapılması gereken kapsamlı onarımlar da 10.000 $ olarak öngörülmektedir. Faiz oranı %5 olduğuna göre bu iki seçeneğin ekonomik değerlendirmesini yapınız.

Çözüm.

1. Seçenek için:

YEM hesabı:

$YEM_{greyder} = 65K(A/P\,,\%5,10) - 7K(A/F\,,\%5,10) = 7.861\ \$$

$YEM_{İ\&B} = 22.000\ \$$

$YEM_{Toplam} = 7.861\ \$ + 22.000\ \$ = 29.861\ \ \$/y$

2. Seçenek için:

YEM hesabı:

$YEM_{Döşeme} = 650K(i) = 32.500\ \$$

$YEM_{B} = 1.000\ \$$

$YEM_{Kapsamlı\ O.} = 10.000(A/F\,,\%5,5) = 1.810\ \ \$/y$

$YEM_{Toplam} = 32.500\ \$ + 1.000\ \$ + 1.810\ \$ = 35.310\ \ \$/y$

Göz önünde bulundurulması gereken etkenler aşağıda sıralanmaktadır.

- *Kar temizleme*
- *Toz*
- *Trafik hızı*

13.5.4. Başabaş Noktası Analizleri (BBN)

Bir yatırım sonucunda, kara geçilen noktayı bulmak son derece önemlidir. Yatırımcı, ne zaman kara geçeceğini, hangi birim maliyet ve satış miktarının onu kara geçireceğini bilmeli, planlamayı ona göre yapmalıdır.

Başabaş analizlerini bulabilmek için kar denklemi yazılmalıdır.

$$K = PQ - (S + DQ) \tag{13.20}$$

K : kar
P : satış fiyatı
S : sabit giderler (maliyet)
D : değişken giderler (maliyet)

Sabit giderler (maliyetler), iş çeşitli operasyonlarla sürekli kesintiye uğratılmadığı müddetçe geniş bir faaliyet aralığında sabit kalan, üretime bağlı olmaksızın oluşan ve üretim olmasa da değişmeyen giderlerin toplamıdır. Örnek olarak; arsa alımı, inşaat masrafları, sigorta ve vergiler verilebilir.

Değişken giderler (maliyetler) üretim miktarı ile değişen, üretim olmadığı zaman olmayan maliyetlerdir. Örnek olarak; hammadde, enerji ve işçilik verilebilir.

Başabaş noktasında kar sıfır olur.

$K = PQ - (S + DQ) = 0$

Hangi üretim miktarında kar elde edileceğini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$BBN_Q = Q = S/(P - D)$

Hangi satış hasılatında kar elde edileceğini bulmak için ise aşağıdaki denklem kullanılır.

$BBN_H = N_H = S_i/(1 - P/D)$

$S + DQ$ eşitliği kullanılarak toplam maliyet, PQ eşitliği kullanılarak satış hasılatı elde edilir. Böylece n miktarındaki ürünün toplam maliyeti, toplam hasılatı, toplam karı bulunabileceği gibi, bunlar o noktadaki ürün sayısına bölünerek birim maliyet, birim hasılat ve birim kar miktarları da hesaplanabilir.

Piyasa rekabeti çoğunlukla Başabaş noktasını düşürmek için işletme üzerinde baskı oluşturur. Başabaş noktası ne kadar düşükse, piyasa dalgalanmaları sırasında zarar oluşması o kadar düşük bir ihtimaldir. Ayrıca satış fiyatı sabit kalırsa, Başabaş noktasının üzerinde herhangi bir seviyede daha büyük bir kar elde edilir.

Şekil 13.1. Fiyat (P) sabit kalmak üzere tipik Başabaş noktası grafiği

Problem 13.18

Bir kesici alet şirketi, 1.000 birim/yıl üretim kapasitesine sahiptir ve 2009 yılı için 590 birimlik testere üretimi planlamaktadır. Bir testere 650 liraya satılsın. Bu üretim programıyla ilgili olarak sabit ve değişken giderler aşağıdaki gibidir.

Sabit giderler:

Yönetim giderleri (sabit kısmı)	*30.000 TL*
Pazarlama giderleri (sabit kısmı)	*16.000 TL*
Genel imalat giderleri (sabit kısmı)	*25.000 TL*

Toplam	***71.000 TL***

Değişken giderler:

Direk hammadde	*250 TL/birim*
Direk işçilik	*112 TL/birim*
Enerji	*43 TL/birim*
Genel imalat giderleri (değişken kısmı)	*25 TL/birim*
Yönetim giderleri (değişken kısmı)	*15 TL/birim*
Pazarlama (değişken kısmı)	*25 TL/birim*
Toplam	***470 TL/birim***

- *Bu şirketin Başabaş noktası ne olacaktır?*
- *700 birim satarsa toplam karı nedir?*
- *Şirket 80.000 TL brüt kar sağlamak isterse kaç birim üretip satmalıdır?*
- *Maliyet-hacim tablosunu hazırlayınız. Grafiği çiziniz.*

Çözüm.

$$BBN_Q = Q = S/(P - D)$$

$$BBN_Q = Q = 71.000/(650 - 470) = 395\ birim$$

395 birim testere üretilip satılırsa kar sıfırdır.

590 birim testere üretilip satılırsa elde edilecek kar;

$$K = 650 * 590 - (71.000 + 470 * 590) = 35.200\ TL'dir.$$

700 birim testere üretilip satılırsa elde edilecek kar;

$$K = 650 * 700 - (71.000 + 470 * 700) = 55.000\ TL'dir.$$

Şirket 80.000 TL kar elde etmek isterse üretim ve satış miktarı;

$$80.000 = 650 * Q - (71.000 + 470 * Q)$$

$$Q = 839\ birim\ olmalıdır.$$

Bir firmada Başabaş noktasındaki kapasite kullanım oranı (KKO) aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$KKO = BBN_Q/Q_n$$

KKO : Kapasite kullanım oranı
BBN_Q : Başabaş noktası üretim miktarı
Q_n : Tesis kapasitesi

$$KKO = 839/1.000 = \%83{,}9\ olarak\ hesaplanır.$$

Maliyet-Hacim-Kar tablosu aşağıdaki gibidir.

Üretim miktarı	*Sabit maliyetler*	*Değişken maliyetler*	*Toplam maliyetler*	*Satış hasılatı*	*Kar (milyar TL)*
0	*71.000*	*0*	*71.000*	*0*	*0*
100	*71.000*	*47.000*	*118.000*	*65.000*	*-53.000*
200	*71.000*	*94.000*	*165.000*	*130.000*	*-35.000*
300	*71.000*	*141.000*	*212.000*	*195.000*	*-17.000*
394,44	*71.000*	*185.387*	*256.387*	*256.387*	*0*
400	*71.000*	*188.000*	*259.000*	*260.000*	*1.000*
500	*71.000*	*235.000*	*306.000*	*325.000*	*19.000*
600	*71.000*	*282.000*	*353.000*	*390.000*	*37.000*
700	*71.000*	*329.000*	*400.000*	*455.000*	*55.000*
800	*71.000*	*376.000*	*447.000*	*520.000*	*73.000*
900	*71.000*	*423.000*	*497.000*	*585.000*	*88.000*
1.000	*71.000*	*470.000*	*541.000*	*650.000*	*109.000*

Tablodan üretim arttıkça değişken maliyetlerin, satış hasılatının arttığını ve 394,44 birimden sonra kara geçildiğini görmekteyiz. Üretim miktarı arttıkça birim başına maliyetler de azalır. Örneğin, 500 birim üretildiğinde birim başına maliyet 612 lirayken, üretim 800 birim olduğunda birim başına maliyet 558,75 liraya düşmektedir.

Şekil. *Kesici alet şirketinin başabaş grafiği*

Problem 13.19

Faydalı ömürleri 20 yıl ve hurda değerine sahip olmayan 3 ayrı yatırım söz konusudur. Sermaye maliyetleri %6 kabul edilmektedir. Uygun seçeneği bulunuz.

	A seçeneği (TL)	B seçeneği (TL)	C seçeneği (TL)
İlk Yatırım Maliyeti	200.000	400.000	500.000
Yıllık Gelir	41.000	63.900	70.000

Çözüm.

A seçeneği:

$$Net\ Bugünkü\ Değer\ (NBD) = BD\ kazanç - BD\ ilk\ yatırım$$

$$NBD = 41.000(P/A, \%6, 20) - 200.000$$

$$NBD = 41.000(11{,}47) - 200.000$$

$$NBD = 270.300\ TL$$

B seçeneği:

$$Net\ Bugünkü\ Değer\ (NBD) = BD\ kazanç - BD\ ilk\ yatırım$$

$$NBD = 63.900(P/A, \%6, 20) - 400.000$$

$$NBD = 63.900(11{,}47) - 400.000$$

$$NBD = 332.900\ TL$$

C seçeneği:

$$Net\ Bugünkü\ Değer\ (NBD) = BD\ kazanç - BD\ ilk\ yatırım$$

$$NBD = 70.000(P/A, \%6, 20) - 500.000$$

$$NBD = 70.000\ (11{,}47) - 500.000$$

$$NBD = 302.900\ TL$$

Bu durumda en çok kârı getiren B seçeneği tercih edilir. Ama tercih hangi noktaya kadar sürmelidir? Bu durumda bir sonraki tercih olan C seçeneğinin getirisi 302.900 TL'dir. B seçeneği tercih edilebilirliğini C kazancına kadar korur. Bu noktadan sonra diğer seçenekler değerlendirilir. O halde B seçeneği nakit akışını, C seçeneğinin NBD'ine eşitlersek;

$NBD = 63.900(P/A, \%6, 20) - X = 302.900\, TL$

$NBD = 63.900(11{,}47) - X = 302.900\, TL$

Bu eşitlikten B seçeneğinin ilk yatırım maliyeti 430.000 TL'ye ulaşana kadar tercih sebebi olacağı sonucuna varılabilir.

Problem 13.20

Proje tasarım nüfusu 100.000 kişi olan bir şehre A^2O prosesini esas alan ve toplam yatırım maliyeti $M = 650\, N^{0{,}8313}$(M : $, N nüfus, kişi) fonksiyonu ile verilen bir AAT inşa edilecektir. İlk yatırım maliyetinin ~%45'i ekipman ve donanım, %55'i ise havuz ve bina yapım/kurulum giderlerinden oluşacaktır. Tesisin yıllık işletme ve bakım maliyetinin, ilk yatırım maliyetinin ~%10'u olacağı öngörülmektedir. Tesiste ekipman ve donanım ile betonarme birimlerinin faydalı ömürlerini sırası ile 15 ve 30 yıl alarak atıksu yönetimi için gerekli tarifeyi ($/m^3, $/EN) hesaplayınız. (Sızma dahil atıksu debisi q=200 L/N.gün, genel yönetim giderleri ~%25 ∗yıllık işletme ve bakım maliyeti, faiz + amortisman oranı %8 alınacaktır.)

Çözüm.

$i = 0{,}08$

$n_1 = 30\, yıl$

$SÖF\ (i = 8, n = 30) = 0{,}08883$

$n_2 = 15\, yıl$

$SÖF\ (i = 8, n = 15) = 0{,}11683$

(a) *İlk yatırım maliyeti (İYM):*

$İYM = 650 * 100000 * 0{,}8313 \cong 9.320.000\$$

(a1) *Yıllık yatırım maliyeti (YYM):*

$YYM = 9.320.000(0{,}55 * 0{,}08883 + 0{,}45 * 0{,}11683) = 945.328\ \$/yıl$

(b) *İşletme ve bakım maliyeti (İBM):*

$İBM \cong 0{,}1 * 9.320.000 = 932.000\ \$/yıl$

(c) *Yıllık toplam maliyet (YTM):*

$YTM = 945.328 + 932.000 = 1.877.328\, \$/yıl$

(d) *Önerilecek tarife*

i. $1.877.328 * 1{,}25/(100.000 * 0{,}200 * 3665) = 0{,}321\ \$/m^3$

ii. $1.877.328 * 1{,}25/100.000 = 23{,}47\ \$/N.yıl$

KAYNAKLAR

[1] Baş, E. (2012). Mühendislik Ekonomisi: Temel Kavramlar ve Örnek Problemler, Beta Basım A.Ş., İstanbul.

[2] Degarmo, E.P., Sullivan, W.G., Bontadelli, J.A., and Wicks, E.M. (1997). Engineering Economy, 10th edition. Prentice-Hall Inc, New York.

[3] Karpuzcu, M. (1987). Çevre Ekonomisi. İTÜ İnşaat Fakültesi.

[4] Öztürk, İ., Kınacı, C., Ateş Genceli, E., Özgün, H., Cüceloğlu, G., Sabuncugil, A. (2015). Çevre Ekonomisi ve Tam Maliyet Esaslı Tarife Hesabı, El Kitabı. Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara.

EK.1. AAT HİDROLİK TASARIMI PROJE ÖRNEĞİ

AAT Proses Birimleri

DNRx şehri atıksu kanalizasyon şebekesi ana toplayıcıları, 2527, K1-K7 muayene bacalarından sonra BM Nehrine ulaşmaktadır. 15 ve 30 yıl sonraki eşdeğer nüfusu sırası ile 63000 ve 110000 kişi olan şehrin atıksu arıtma tesisinin (AAT) yerleştirileceği alan 252~K3 bacaları arasına isabet etmektedir. Bu yüzden hidrolik hesaplar 2527 bacası ile K3 arasında yapılacaktır.

AAT'nin 2020 yılı başında devreye gireceği ve 2050 yılına kadar hizmet vereceği öngörülmektedir.

Giriş bacasından sonra atıksular sırası ile kaba ızgara, burgulu pompa ve ince ızgara, dikdörtgen planlı kum tutucu, Parshall kanalı, ön çökeltim havuzu, havalandırma havuzu, son çökeltim havuzu, klorlama havuzu birimlerinden geçerek alıcı ortama (BM Nehri) verilmektedir. Klasik aktif çamur prosesi olarak tasarlanan tesiste oluşan çamurlar, yoğunlaştırılıp aerobik olarak çürütüldükten sonra yatay bant filtrelerde suyu alınarak uzaklaştırılmaktadır (Şekil Ek 1. 1).

Hidrolik hesaplarda duruma göre (hangisi kritikse) 15 yıl sonraki (1. Kademe, 2025-2035) 2035 veya 30 yıl sonraki (2. Kademe, 2035-2050) 2050 yılı maksimum debileri ve 2035 minimum debileri esas alınmıştır. Bu debiler aşağıdaki gibidir:

1. Kademe debileri	
2035 yılı maksimum debisi	: $Q_{maks} = 224\ L/s$
2035 yılı hesap debisi	: $Q_h = 191\ L/s$
2035 yılı minimum debisi	: $Q_{min} = 77\ L/s$
2. Kademe debileri	
2050 yılı maksimum debisi	: $Q_{maks} = 436\ L/s$
2050 yılı hesap debisi	: $Q_h = 324\ L/s$
2050 yılı minimum debisi	: $Q_{min} = 141\ L/s$

AAT arıtma birimlerinin boyut ve özellikleri Tablo Ek.1. 1'de özetlenmiştir.

Şekil Ek 1. 1. Seçilen aktif çamur sisteminin genel yerleşim planı

Tablo Ek.1. 1. AAT arıtma birimlerinin boyut ve özellikleri

Birim/Ünite	***Havuz/Tank ve Ekipman Özellikleri***
Kaba ızgara	*Kanal genişliği,* $B = 1{,}4\ m$ *Çubuk aralığı,* $e = 60\ mm$ $\alpha = 45°$, *elle temizlemeli,* $n = 1\ adet$
Giriş (burgulu) terfi merkezi	*Montaj açısı 38°, 1200 mm dış çap ve n=45 d/d ile dönen,* N_1 *=30 kW güçte 2+1 adet burgu/helezon ihtiva eden bir terfi merkezi*
İnce ızgara	*Kanal genişliği,* $B = 1{,}2\ m$ *Çubuk aralığı,* $e = 25\ mm$ $\alpha = 75°$, *mekanik temizlemeli,* $n = 1 + 1\ adet$
Kum tutucu ve debi ölçme yapısı	*Parabolik (trapez) enkesitli, maksimum debideki su yüzeyi genişliği,* $w_{maks} = 1{,}18\ m$ *ve* $h_{maks} = 0{,}92\ m$, *uzunluğu* $L = 20\ m$ *olan; sonrasında boğaz genişliği* $b = 30{,}5\ cm$ *Parshall savağı yer alan,* $n = 2$ *gözlü yatay akışlı kum tutucu*
Ön çökeltim havuzları	$D = 26\ m$, $H_{kenar} = 2{,}4\ m$, *Stengel tipi giriş yapısı, gezer köprülü sıyırıcısı olan, çıkışında* $2\alpha = 90°$ *tepe açılı* $a = 15$ *cm diş aralıklı üçgen savağı olan,* $n = 1 + 1$ *(2. Kademe) adet betonarme havuz*
Havalandırma havuzları	*Her bir modülü* $B\ L\ H = 15 * 30 * 3{,}5\ m$, *2 adet düşük devirli yüzeysel havalandırıcı (*N_1 *=22 kW) bulunan;*$[F/M = 0{,}3\ kg\ BO\dot{I}_5/kg\ AKM\ gün, \theta_c = 5\ gün, r = 0{,}82]$;$n = 2 + 2$ *(2. Kademe) adet betonarme havuz*
Son çökeltim havuzları	$D = 26\ m$, $H_{kenar} = 2{,}4\ m$, *Stengel tipi giriş yapısı, gezer köprülü sıyırıcısı olan, çıkışında* $2\alpha = 90°$ *tepe açılı* $a = 15$ *cm diş aralıklı üçgen savağı olan,* $n = 2 + 2$ *(2. Kademe) adet betonarme havuz*
Klorlama havuzu	$B = 8\ m$, $L = 15\ m$ *ebatlı, bir gözde 4 adet 2m genişlikli yatay perdeli kanalları olan, H =2,6 m derinlik ve* θ *=20 dk temas süreli,* $n = 1 + 1$ *adet betonarme havuz*
Çamur yoğunlaştırıcı	$D = 12\ m$, $H_{kenar} = 3{,}6\ m$; *merkezden tahrikli köprülü sıyırıcı ile karıştırılan,* $n = 1 + 1$ *adet betonarme havuz*
Aerobik çamur çürütücü	$B\ L\ H = 15 * 30 * 3{,}6\ m$ *ebatlı, her bir modülünde 2∗37 kW yüzeysel havalandırıcı bulunan* $n = 2 + 2$ *modülden oluşan betonarme havuzlar*
Yatay bant filtre	$B = 2\ m$ *bant genişlikli, 4200 kg KM/gün kapasiteyle, 2 vardiya çalıştırılan, PE ile şartlandırma donanımına sahip,* $n = 1 + 1$ *adet filtre*

a) <u>2527 Muayene Bacası ile Kaba Izgara Yaklaşım Kanalı Arası:</u>

Bağlantı Kanalı (Izgara Öncesi):

Ø1000 mm çaplı ana toplayıcı hattında 2527 no'lu muayene bacasından alınan atıksu boru ile arıtma tesisine verilecektir. Bu bacadaki akar kot 848,08 m'dir. Hidrolik hesaplarda $n = 0{,}013$ için Manning-Strickler denklemi $\left(v = (1/n)\ R^{2/3}\ J^{1/2}\right)$ kullanılmaktadır.

$Q_{maks} = 436\ L/s \quad J = 0{,}003 \quad D = 1{,}0\ m$

$v_d = (1/0{,}013) * (D/4)^{2/3}\ J^{1/2} = (1/0{,}013) * (1{,}0/4)^{2/3}\ 0{,}003^{1/2} = 1{,}66\ m/s$

$Q_d = v_d\ A = 1{,}66 * (\pi\ 1{,}0^2)/4 = 1{,}30\ m^3/s$

$Q/Q_d = 0{,}436/1{,}3 = 0{,}33 \qquad h/D = 0{,}42$

$h = 0{,}42\ m$ $\quad v/v_d = 0{,}92$ $\quad v = 1{,}53\ m/s$

$Q_{min} = 77\ L/s;$ $\quad Q_{min}/Q_d = 0{,}077/1{,}3 = 0{,}059$ $\quad h/D = 0{,}17$

$h = 0{,}17\ m$ $\quad v/v_d = 0{,}54$ $\quad v = 0{,}88\ m/s$

olduğundan bağlantı kanalı boyutları yeterlidir.

Netice olarak 2527 no'lu giriş bacası ile Burgulu Terfi Merkezi arasındaki bağlantı kanalı, D =1000 mm beton boru inşa edilecektir.

B 2527'de akar kotu 848,08'dir. J =0,003 eğimle döşendiğinden kaba ızgara yaklaşım kanalı başına L =74 m için akar kot $848{,}08 - 74 * 0{,}003 = 847{,}86$ m bulunur.

Kanalların akar kotları "Z", maksimum debideki su seviyesi "E" ve minimum debideki su seviyesi "e" ile gösterilecektir.

2527 bacasında akar kot Z =848,08'dir.

Maksimum ve minimum debilerdeki bağlantı kanalı su derinlikleri sırası ile 0,42 m ve 0,17 m'dir.

Bağlantı kanalı başında su seviyesi Q_{maks} için

$E = 848{,}08 + 0{,}42 = 848{,}50$ m

Kanal başındaki su seviyesi Q_{min} için

$e = 848{,}08 + 0{,}17 = 848{,}25$ m

Bağlantı kanalı sonundaki akar kot $Z = 847{,}86$ m

Bağlantı kanalı sonundaki su seviyesi Q_{maks} için $E = 847{,}86 + 0{,}42 = 848{,}28$ m

Bağlantı kanalı sonundaki su seviyesi Q_{min} için $e = 847{,}86 + 0{,}17 = 848{,}03$ m olarak bulunur.

b) <u>Kaba Izgara ile Burgulu Pompa Arası:</u>

Kanallarda su seviyelerinin hesabında, daha önce de belirtildiği üzere n =0,013 için Manning-Strickler denklemi kullanılmaktadır.

$v = (1/n)\ R^{2/3}\ J^{1/2}$

$Q = R^{2/3}\ J^{1/2}\ A/n$

Bağlantı kanalında kabarma olmaması için giriş kanalındaki maksimum su derinliğinin 0,42 m'yi aşmaması gerekmektedir. Kaba ızgara yapısı önündeki yaklaşım kanalı genişliği 1,40 m seçilmiştir.

B =1,40 m genişlikli kaba ızgara yaklaşım kanalında $Q_{maks} = 436\ L/s$ debisinde su derinliğinin H_{maks} =0,42 m'yi geçmemesi için, ızgara kanalı taban eğiminin, Manning formülü yardımıyla,

$Q = 0{,}436 = (1/0{,}013)((1{,}4 * 0{,}42)/(1{,}4 + 2 * 0{,}42))^{2/3}(1{,}4 * 0{,}42)J^{1/2}$ ve $J > 0{,}00056$ olması gerekir. Bu debideki maksimum su hızı,

$v_{maks} = 0{,}436/(1{,}4 * 0{,}42) = 0{,}74\ m/s$ olacaktır. Izgara yaklaşım kanalında Q_h =324 L/s ve Q_{min} =77 L/s debilerindeki su derinliği ve akış hızları için de Manning formülü yardımıyla aşağıdaki değerler bulunmuştur.

$Q_h = 324\ L/s$ $\quad B = 1{,}4\ m$ $\quad J = 0{,}00055$ $\quad n = 0{,}013$ için $H = 0{,}34\ m$

$v = 0{,}324/(1{,}4 * 0{,}34) = 0{,}68\ m/s$

$Q_{min} = 77\ L/s \qquad B = 1{,}4\,m \qquad J = 0{,}00055 \quad n = 0{,}013$ için $H = 0{,}13\,m$

$v_{min} = 0{,}077/(1{,}4 * 0{,}13) = 0{,}42\ m/s$

$Q_h = 324\ L/s$ için $H = 0{,}34\,m$ derinliğinin ızgara çubukları arasında da aynı olduğu kabul edilerek çubuklar arasındaki geçiş hızı,

$v_1 = 0{,}324/\big((1{,}4 - 19 * 0{,}01)0{,}34\big) = 0{,}79\,m/s < 1{,}2\ m/s$

$Q_{maks} = 436\ L/s$ ve $H = 0{,}42\,m$ için geçiş hızı da,

$v_{maks} = 0{,}436/\big((1{,}4 - 19 * 0{,}01)0{,}42\big) = 0{,}86\,m/s < 1{,}2\ m/s$ bulunur.

Şekil Ek 1. 2. Mekanik ızgara

c) <u>Kaba Izgara ve Burgulu Pompa İstasyonu:</u>

Izgaralardaki yersel yük kayıpları Kirschmer formülü ile hesaplanıp, ızgara yük kaybı sabiti: β =2,42

$h_1 = 2{,}42 * (0{,}01/0{,}06)^{4/3} * (0{,}86^2/2g) * \sin 45 = 0{,}006\,m \sim 0{,}01\,m$ bulunur.

Kaba ızgara yaklaşım kanalının boyu L =6 m'dir. Izgara kanalı eğimi 0,00055 alınarak kaba ızgara önünde kanal taban (akar) kotu,

$Z = 847{,}86 - 0{,}00055 * 6 = 847{,}86\,m$ olur.

Kaba ızgaranın rahat yerleştirilebilmesi için ızgaranın zemine oturduğu kısım eğimli olacak ve 5 cm'lik bir düşüm yapılacaktır. Böylece kaba ızgaradan sonraki akar kot,

$Z = 847{,}86 - 0{,}05 = 847{,}81\,m$ olacaktır.

Kaba ızgara önündeki su seviyesi Q_{maks} için

$E = 847{,}86 + 0{,}42 = 848{,}28\ m$

Kaba ızgara önündeki su seviyesi Q_{min} için

$e = 847{,}86 + 0{,}13 = 847{,}99\ m$'dir.

Kaba ızgara kanalından hemen sonraki su seviyesi Q_{maks} için

$E = 848{,}28 - 0{,}05 = 848{,}23\ m$

Kaba ızgara kanalından hemen sonraki su seviyesi Q_{min} için

$e = 847{,}99 - 0{,}05 = 847{,}94\ m$ olarak bulunur.

Atıksular, kaba ızgaradan geçtikten sonra atıksu Burgulu Pompa istasyonu emme çukuruna girmektedir. Mesafe kısa olduğundan buradaki su seviyesi kaba ızgara çıkışı ile aynı alınmıştır.

Burgulu pompanın önünde kanal taban seviyesi 0,57 m indirilmiş ve taban kotu:

$847{,}80 - 0{,}57 = 847{,}23\ m$ olarak tayin edilmiştir.

Burgulu Pompa İstasyonu emme çukurundan itibaren ön çökeltim havuzuna terfi yapılması dolayısıyla, buradan klorlama havuzu çıkışına kadar cazibeli akış olacağından, hidrolik hesaplar K3 no'lu deşarj muayene bacasından Giriş Terfi Merkezine (sondan başa) doğru yapılacaktır.

d) <u>Klorlama Havuzu Çıkış Bacası ile K3 Muayene (Deşarj) Bacası Arası:</u>

K3 bacasında kanal akar kotu Z =847,96 m'dir. Klorlama havuzu çıkış bacasını bu kanala bağlayan boru hattının çapı 1000 mm alınarak J =0,003 eğimli bu boruda,

$Q_{maks} = 436\ L/s$ için $h = 0{,}42\ m\ \ v = 1{,}53\ m/s$ bulunur.

Böylece K3'te su seviyesi maksimum debide,

$E = 847{,}96 + 0{,}42 = 848{,}38\ m$

Klorlama çıkış bacası ile K3 arası L =60 m

Klorlama bacası çıkış akar kotu:

$Z = 847{,}96 + 0{,}003 * 60 = 848{,}14\ m$ bulunur. Burada maksimum su seviyesi:

$E = 848{,}14 + 0{,}42 = 848{,}56\ m$ elde edilir.

18-21 kanalının ve önündeki yapıların aşırı derine düşmesini önlemek üzere Klorlama çıkışında 1,4 m'lik düşüm yapılarak klorlama havuzu savak kotu,

$Z = 849{,}56 + 1{,}4 = 849{,}96\ m$ seçilmiştir.

Klorlama havuzu savak genişlikleri b =1 m alınırsa $Q = 1{,}8\ b\ h^{1{,}5}$ savak debisi ifadesinden:

$Q_{maks} = 436\ L/s$ için $Q_1 = 218\ L/s \qquad h = 0{,}24\ m$

$Q_{min} = 141\ L/s$ için $Q_1 = 70{,}5\ L/s \qquad h = 0{,}12\ m$

bulunur. Böylece klorlama havuzundaki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 849{,}96 + 0{,}24 = 850{,}20\ m$

$e = 849{,}96 + 0{,}12 = 850{,}08\ m$ olarak bulunur.

Klorlama havuzu içindeki yük kaybı ihmal edilebilir.

e) <u>Klor Temas Havuzundaki Hidrolik Karıştırıcıdaki:</u>

Klor temas havuzunda hidrolik karışım dalgıç perde ve batmış savak ile yapılmaktadır.

Batmış savak ve dalgıç perde geçiş açıklığı 0,25 m seçilirse hızlar,

$V = 0{,}436/(0{,}25 * 1{,}25 * 2) = 0{,}7\ m/s$

olacaktır (B =1,25 m, n =2 göz). Yük kaybı;

$h = (k_1 + k_2)\, v^2/2g = (2)\, 0{,}7^2/2g \cong 0{,}05\, m$ bulunur.

O halde dalgıç perdeden önceki su seviyesi;

$E = 850{,}20 + 0{,}05 = 850{,}25\, m$'dir.

Klorlama havuzuna giriş bir açık kanalla olmaktadır. Böylece giriş kanalı maksimum su seviyesi $E = 850{,}25\, m$ olacaktır. Kanal 1,0 m genişliğinde %0,3 eğimle inşa edilecektir.

Bu kanalda,

$Q_{maks} = 436\ L/s$ için su yüksekliği 0,31 m'dir.

Buna göre giriş kanalının taban kotu,

$Z = 850{,}25 - 0{,}31 = 849{,}94\, m$ olacaktır.

$Q_{min} = 141\ L/s$ için su derinliği $h = 0{,}10\, m$ ve

$e = 849{,}94 + 0{,}1 = 850{,}04\, m$ olur.

Şekil Ek 1. 3. Klorlama havuzu şematik plan ve kesit

f) <u>Son Çökeltim Havuzu Giriş Kulesi ile Klorlama Arası:</u>

20-21 kanalındaki yük kaybı

$Q_{maks} = 436\ L/s,\ B = 1{,}0\ m,\ n = 0{,}013,\ J = 0{,}003$ için $h = 0{,}31\ m$ bulunmuştur. L =20 m olduğuna göre 20 noktasındaki kanal taban kotu,

$Z = 849{,}94 + 0{,}003 * 20 = 850{,}00\ m;$

Menba tarafında kabarmayı önlemek için 8 cm'lik düşü yapılırsa, menba kesiti taban kotu,

$Z = 850{,}00 + 0{,}08 = 850{,}08\ m$ olur.

Şekil Ek 1. 4. Son çökeltim havuzları ve klorlama havuzu

Mansap tarafındaki su kotu, $E = 850{,}00 + 0{,}31 = 850{,}31\ m$'dir.

$Q_{min} = 141\ L/s,\ B = 1{,}0\ m,\ n = 0{,}013,\ J = 0{,}003,\ h = 0{,}14\ m,\ v = 0{,}98\ m/s$ olduğundan

$e = 850{,}00 + 0{,}14 = 8550{,}14\ m$ olur. 20 noktasının menba kesitinde

$Q_{maks} = 218\ L/s,\ B = 0{,}8\ m,\ n = 0{,}013,\ J = 0{,}003$ için $h = 0{,}23\ m$

$Q_{min} = 141/2 = 71\ L/s,\ B = 0{,}8\ m,\ n = 0{,}013,\ J = 0{,}003$ için $h = 0{,}11\ m$

$E = 850{,}08 + 0{,}23 = 850{,}31\ m$

$e = 850{,}08 + 0{,}11 = 850{,}19\ m$

19 noktasındaki taban kotu,

$Z = 850{,}08 + 0{,}003 * 7 = 850{,}10\ m$

Kabarmayı önlemek iççin 5 cm düşü yapılarak menba kesiti taban kotu,

$Z = 850{,}10 + 0{,}05 = 850{,}15\ m$ bulunur.

Bu durumda 19 noktası mansabındaki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 850{,}10 + 0{,}23 = 850{,}33\ m$

$e = 850{,}10 + 0{,}11 = 850{,}21\ m$ olur.

Menba tarafında da,

$Q_{maks} = 436/4 = 109\ L/s$, $B = 0{,}6\ m$, $n = 0{,}013$, $J = 0{,}003$ için $h = 0{,}18\ m$

$Q_{min} = 1416/4 = 35{,}25\ L/s$, $B = 0{,}6\ m$, $n = 0{,}013$, $J = 0{,}003$ için $h = 0{,}08\ m$ olduğuna göre ilgili su kotları,

$E = 850{,}15 + 0{,}18 = 850{,}33\ m$

$e = 850{,}15 + 0{,}08 = 850{,}23\ m$ bulunur.

18 noktasındaki taban ve su kotları,

$Z = 850{,}15 + 0{,}003 * 36 = 850{,}26\ m$

$E = 850{,}26 + 0{,}18 = 850{,}44\ m$

$e = 850{,}26 + 0{,}08 = 850{,}34\ m$ olur.

Çökeltim Havuzu Çevre Kanalı Hesabı:

Çökeltim havuzu çevre kanalı çıkış kotu, 5 cm hava payı ile,

$Z = 850{,}44 + 0{,}05 = 850{,}49\ m$ olur.

Çökeltim havuzu çevre kanalını 18-19 kanalına bağlayan kritik kesitteki su seviyesi (B =0,6 m),

$H_{kr} = ((0{,}436/4)^2/0{,}6^2/g)^{1/3} = 0{,}15\ m$ ve su kotu,

$E = 850{,}49 + 0{,}15 = 850{,}64\ m$'dir.

Çevre kanalı sonundaki su derinliği,

$H_{kr} = ((0{,}436/8)^2/0{,}6^2/g)^{1/3} = 0{,}10\ m$'dir. Çukurlaştırılmış kısmın hemen menba tarafındaki akar kot, 5 cm düşü esas alınarak,

$Z = 850{,}49 + 0{,}05 = 850{,}54\ m$ bulunur. Su kotu da,

$E = 850{,}54 + 0{,}1 = 850{,}64\ m$ olur. Çevre kanalı başındaki su kotu,

$h_0 = 3{,}1 * 0{,}1/2 = 0{,}16\ m$ olduğuna göre,

$E = 850{,}54 + 0{,}16 = 850{,}70\ m$ bulunur.

Son Çökeltim Havuzunda Su Kotu Hesabı:

Savak kreti çevre kanalındaki su seviyesinin 5 cm üzerinde alınmıştır (serbest düşü=5 cm). Bu durumda savak kret kotu,

$Z = 850{,}70 + 0{,}05 = 850{,}75\ m$'dir.

Savak Yükü Hesabı:

90° tepe açılı dişli (üçgen) savak (V savak) seçilmiştir.

İki diş arası mesafe $a = 0{,}15\ m$, savak uzunluğu $L = \pi\ D = \pi(26 - 2 * 0{,}6) = 77{,}9\ m$ için, diş başına düşen debi ($q = (Q/4)\ a/L$),

$q = (Q/4)\ a/L_s = (0{,}436/4) * 0{,}15/77{,}9 = 0{,}21 * 10^{-3}\ \ m^3/s\ \ diş = 0{,}21\ \ L/s\ diş$ olur.

$\alpha = 45°$ için yukarıdaki ifadeden (veya diyagramdan ()) $h = 3\ cm$ bulunur.

Son çökeltim havuzu maksimum su kotu da,

$E = 850{,}75 + 0{,}03 = 850{,}78\ m$ olarak bulunur.

Minimum debi için,

$q = (0{,}141/4) * 0{,}15/77{,}9 = 0{,}07 * 10^{-3}\ \ m^3/s\ \ diş = 0{,}07\ \ L/s\ diş$ olur.

$\alpha = 45°$ için yukarıdaki ifadeden (veya diyagramdan (Şekil Ek 1. 6)) $h = 2\ cm$ bulunur.

Buradan son çökeltim havuzu minimum su kotu,

$e = 850{,}75 + 0{,}02 = 850{,}77\ m$ olur.

Son Çökeltim Havuzu Giriş Yapısındaki Su Kotu:

Son çökeltim havuzundaki kritik debi 1. Kademede 2 adet havuz halidir.

$Q = (Q + Q_r)/2$, $Q_r = 0{,}82\ Q$ olduğu için

$Q_1 = 1{,}82\ \ Q/2 = 1{,}82 * 0{,}191/2 = 0{,}174\ \ m^3/s$ bulunur.

Son çökeltim havuzunda Stengel tipi giriş tertibatı düşünülmüştür.

$Q_1 = 0{,}174\ \ m^3/s$ ve $D = 0{,}2\ m$ laınırsa,

Toplam 16 delik için suyun deliklerden çıkış hızı,

$v = 0{,}174/(16\ (0{,}2\ \pi)^2/4) = 0{,}34\ \ m/s$ bulunur.

Son çökeltim havuzu giriş yapısındaki toplam yük kaybı:

$h = ani\ büzülme + ani\ genişleme$

$h = h_b + h_g$

$k_b = 0{,}5$ keskin kenarlı girişte yersel yük kaybı katsayısı

$k_g = 1{,}0$ ani genişlemede yersel yük kaybı katsayısı

$h_b = k_b(V^2/2g) = 0{,}5 * (0{,}34^2/19{,}62) = 0{,}003\ m$

$$h_g = k_g(V^2/2g) = 1{,}0 * (0{,}34^2/19{,}62) = 0{,}006\ m$$

$h = 0{,}009 \sim 0{,}01\ m$ elde edilir. Benzer şekilde minimum debi için de $h = 0{,}005 \sim 0{,}01\ m$ bulunur.

O halde son çökeltim havuzları giriş kulesindeki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 850{,}78 + 0{,}01 = 850{,}79\ m$

$e = 850{,}77 + 0{,}01 = 850{,}78\ m$ olacaktır.

Şekil Ek 1. 5. Son çökeltim havuzu şematik plan ve kesiti

1:ATipi Diş

2:BTipi Diş

h:Su yükü

Q_1: Birim boy debisi (m_3/sa.m)

Şekil Ek 1. 1. Üçgen savaklar için debi-savak yükü ($\boldsymbol{Q-h}$) grafiği

g) <u>Son Çökeltim Havuzu Dağıtma Bacası (T6) ile Giriş Kulesi Arasında:</u>

2035 yılı:

Debi $Q + Q_r = Q + 0{,}82\,Q = 1{,}82\,Q = 1{,}82 * 0{,}191 = 0{,}348\ m^3/s$

$Q_1 = 0{,}348/2 = 0{,}174\ m^3/s$

2050 yılı:

Debi $Q + Q_r = Q + 0{,}82 * Q = 1{,}82 * Q = 1{,}82 * 0{,}324 = 0{,}590\ m^3/s$

$Q_1 = 0{,}590/4 = 0{,}147\ m^3/s$'dir. 2035 yılı debisi kritik olduğundan giriş borusu çapı buna göre hesaplanacaktır. Yani $Q_1 = 0{,}174\,m^3/s$'dir.

Giriş borusu çapı 500 mm

$V \cong 0{,}90\,m/s$, $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}0022$ olur.

Dağıtma bacası ile giriş kulesi arasındaki kayıplar büzülme, vana, 90°'lik dirsek, genişleme şeklindeki yersel yük kayıpları ile sürekli yük kayıplarının toplamıdır.

$Toplam\ kayıp = h_b + h_d + h_v + h_g + h_s$

$h = (0{,}5 + 3 * 0{,}25 + 0{,}25 + 1{,}0)\ 0{,}9^2/19{,}62 + 0{,}0022 * 30 = 0{,}17\,m$

bulunur.

Minimum debi için,

$Q = 1{,}82 * 77 = 140\ L/s$

$Q_1 = 140/2 = 70\ L/s$ $\quad v = 0{,}36\ m/s$ $\quad h = 2{,}5(0{,}36^2/19{,}62) = 0{,}02\ m$

Maksimum ve minimum debilerde dağıtma bacası su kotları,

$E = 850{,}79 + 0{,}17 = 850{,}96\ m$

$e = 850{,}78 + 0{,}03 = 850{,}81\ m$ olacaktır.

Dağıtma bacasındaki kayıp:

Savak yükü $Q = 1{,}8 * b * h^{1,5}$ ifadesinden,

2035 yılı için $Q = 0{,}348\ m^3/s$, 2 bölme olduğu dikkate alınarak,

$Q_1 = 0{,}348/2 = 0{,}174\ m^3/s$ $\quad b = \pi\ D/4 = \pi * 3{,}5/4 = 2{,}75\ m$ $\quad h = 0{,}11\ m$

bulunur. 2050 yılı için $Q = 0{,}590\ m^3/s$ ve $Q_1 = 0{,}590/4 = 0{,}147\ m^3/s$ olduğundan 2035 yılı debisi kritiktir. Hesaplar buna göre yapılacaktır.

Savak sonrası 4 cm düşüm alınırsa dağıtma bacası savak (kret) kotu,

$Z = 850{,}96 + 0{,}04 = 851{,}00\ m$

ve merkezde maksimum su seviyesi,

$E = 851{,}00 + 0{,}11 = 851{,}11\ m$ bulunur.

Minimum debi için,

$Q = 140\ L/s$ $\quad Q_1 = 140/2 = 70\ L/s$ $\quad L_{savak} = 2{,}75\ m$ $\quad h = 0{,}06\ m$ ve

$e = 851{,}00 + 0{,}06 = 851{,}06\ m$ bulunur.

h) <u>Havalandırma Havuzu ile T6 Dağıtma Bacası Arası:</u>

Havalandırma ile son çökeltim havuzları dağıtma bacası arası basınçlı boru ile bağlanacaktır.

2035 yılı için $Q_h = 1{,}82 * Q = 1{,}82 * 0{,}191 = 0{,}348\ m^3/s$

2050 yılı için $Q_h = 1{,}82 * Q = 1{,}82 * 0{,}324 = 0{,}590\ m^3/s$

$Q_1 = 0{,}590/2 = 0{,}295\ m^3/s$'dir.

Kritik debi $Q_h = 0{,}348\ m^3/s$ olduğundan bu debide 700 mm çaplı spiral kaynaklı çelik boru için,

$v = 0{,}9\ m/s, n = 0{,}013, J = 0{,}00143$ olur.

$L = 48\ m, J * L = 48 * 0{,}00143 = 0{,}07\ m$ bulunur.

Benzer şekilde minimum debi için,

$Q_{min} = 1{,}82 * 77 = 140\ L/s$ için $v = 0{,}4\ m/s, n = 0{,}013, J = 0{,}003\ \ J\ L = 0{,}01\ m$ bulunur.

T6 dağıtma yapısı içindeki yük kayıpları:

$D = 1000$ mm çaplı giriş borusundaki maksimum ve minimum hızlar,

$v_{maks} = 0{,}590 * 4/(\pi * 1^2) = 0{,}75\, m/s$

$v_{min} = 0{,}348 * 4/(\pi * 1^2) = 0{,}44\, m/s$'dir.

Yersel yük kaybı,

$maks.h_y = \left(h_g + h_ç + h_d\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1 + 0{,}13)\, 0{,}75^2/2g = 0{,}05\, m$

$min.h_y = \left(h_g + h_ç + h_d\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1 + 0{,}13)\, 0{,}44^2/2g = 0{,}02\, m$ bulunur.

T6 giriş bölmesindeki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 851{,}11 + 0{,}05 = 851{,}16\, m$

$e = 851{,}06 + 0{,}02 = 851{,}08\, m$ olur.

i) <u>T6 ile Havalandırma Havuzu Dağıtım Yapısı (T4) Arası:</u>

$maks.h_y = \left(h_g + h_ç\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1)\, 0{,}9^2/2g = 0{,}06\, m$

$min.h_y = \left(h_g + h_ç\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1)\, 0{,}4^2/2g = 0{,}01\, m$ bulunur.

Sürekli yük kayıpları,

$maks.h_s = 0{,}07\, m$

$min.h_s = 0{,}01\, m$ olduğuna göre (kabul), havalandırma havuzu çıkış bacasındaki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 851{,}16 + 0{,}07 + 0{,}06 = 851{,}29\, m$

$e = 851{,}08 + 0{,}01 + 0{,}01 = 851{,}10\, m$ olur.

Havalandırma Havuzu Çıkış Kanalı:

$B = 1{,}0\, m, n = 0{,}013, J = 0{,}003, Q = 0{,}348\ m^3/s, h = 0{,}26\, m$

Kanalın çıkış bacasına döküldüğü kesitindeki taban kotu,

$Z = 851{,}29 - 0{,}26 = 851{,}03\, m$

alınırsa, başlangıç noktasındaki taban kotu,

$Z = 851{,}03 + 0{,}003 * 15{,}30 = 851{,}08\, m$ olur.

Havalandırma havuzu çıkış savakları ayarlanabilir tipte olacaktır. Ayarlama toleransı (aralığı) 5 cm alınırsa, aynı zamanda 5 cm'lik düşü de sağlanmış olacağından,

$çıkış\ kanalı\ başındaki\ su\ kotu = 851{,}08 + 0{,}26 = 851{,}34\, m$

$savak\ kotu = 851{,}34 + 0{,}05 = 851{,}39\, m$ olacaktır.

Havalandırma havuzu çıkışında dikdörtgen savak kullanılacaktır. Kritik hesap debisi,

$(Q + Q_r) = 1{,}82 * Q$

1. kademe için $Q_1 = 0{,}348/2 = 0{,}174\ m^3/s, B = 2{,}5\, m$ seçilirse,

$Q = 1{,}8\, B * h^{1{,}5}$ $\qquad h = 0{,}11\, m$ elde edilir.

Havalandırma havuzunun su kotu,

$E = 851{,}39 + 0{,}11 = 851{,}50\ m$ olur.

Minimum debi için $Q_1 = 70\ \ L/s$ ve $h = 0{,}06\ m$ ise su kotu,

$e = 851{,}39 + 0{,}06 = 851{,}45\ m$ olur.

Havalandırma havuzu içindeki yatay hızlar çok düşük olduğundan yük kayıpları ihmal edilmiştir. Havalandırma havuzuna giriş savağının kret kotu ile havalandırma havuzu su seviyesi arasında 5 cm'lik emniyet payı bırakılmıştır. Böylece giriş savağı kret kotu,

$Z = 851{,}50 + 0{,}05 = 851{,}55\ m$ bulunur.

Giriş savağındaki maksimum ve minimum savak yükleri çıkış savağında hesaplandığı üzere,

$h_{maks} = 0{,}11\ m$, $h_{min} = 0{,}06\ m$ alınırsa, savaktaki maksimum ve minimum su kotları,

$E = 851{,}55 + 0{,}11 = 851{,}66\ m$

$e = 851{,}55 + 0{,}06 = 851{,}61\ m$ olur.

12-13 hattında boru çapı 0,6 m seçilmiştir.

$Q = 0{,}348\ \ m^3/s,\ \ v = 1{,}2\ \ m/s,\ \ n = 0{,}013,\ \ J = 0{,}00333$ ve $L = 30\ m$ için $H_s = 0{,}10\ m$ bulunur.

Yersel yük kayıpları da,

$h_y = \left(h_g + h_ç + h_v + h_d\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1 + 0{,}25 + 0{,}25)\ 1{,}2^2/2g = 0{,}15\ m$ olduğuna göre,

T4 dağıtma yapısı çıkışındaki maksimum su kotu,

$E = 851{,}66 + 0{,}10 + 0{,}15 = 851{,}91\ m$ bulunur.

$Q_{min} = 140\ \ L/s$, $D = 0{,}6\ m$, $v = 0{,}5\ m/s$, $n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}0005$ için,

$h_s = 0{,}0005 * 30 = 0{,}02\ m$

$h_y = 2 * 0{,}52/19{,}62 = 0{,}03\ m$

Minimum su kotu,

$e = 851{,}61 + 0{,}02 + 0{,}03 = 851{,}66\ m$ bulunur.

j) <u>Havalandırma Havuzları Dağıtma Yapısındaki (T4) Yük Kaybı:</u>

Bu dağıtma yapısına ön çökeltim çıkış suları ile geri devir debisi gelmektedir. Atıksu, dair planlı bir savak yapısından 1. ve 2. Kademe havalandırma havuzlarına dağıtılmaktadır. Dağıtma yapısından çıkışta su seviyesi $E = 851{,}91\ m$ bulunmuştu. Burada 5 cm'lik düşü dikkate alınarak savak sırt (kret) kotu $851{,}91 + 0{,}05 = 851{,}96\ m$ bulunur.

Savak Boyu $b = \pi * D = \pi * 3 = 9{,}4\ m$'dir.

$Q = 1{,}8 * b * h^{1{,}5}$ ifadesinden $Q = 0{,}590\ m^3/s$, $h = 0{,}11\ m$ ve

minimum debi için $L_{savak} = 9{,}6/2 = 4{,}3\ m$, $h = 0{,}07\ m$ elde edilir.

Dağıtma yapısı merkezindeki su kotları,

$E = 851{,}96 + 0{,}11 = 852{,}07\ m$

$e = 851{,}96 + 0{,}07 = 852{,}03\ m$ bulunur.

T4 dağıtma yapısı içindeki yük kayıpları:

$Q_{maks} = 0{,}590\, m^3/s$, $D = 700\, mm$, $v = 0{,}590 * 4/(\pi * 0{,}7^2) = 1{,}52\, \mathrm{m}/s$

$h_y = \left(k_g + k_ç + k_d\right) v^2/2g = (0{,}5 + 1 + 0{,}25)\, 1{,}52^2/2g = 0{,}20\, m$

$h_s \cong 0{,}01\, m$

Dağıtma yapısı dış bölmesindeki maksimum su kotu,

$E = 852{,}07 + 0{,}20 + 0{,}01 = 852{,}28\, m$ bulunur.

Minimum su kotu da, $v_{min} = 0{,}141 * 4/(\pi * 0{,}7^2) = 0{,}36\, \mathrm{m}/s$ için,

$h_y = (0{,}36/1{,}52)^2 * 0{,}20 = 0{,}04\, m$

$h_s \cong 0{,}01\, m$ olduğuna göre,

$e = 852{,}03 + 0{,}04 + 0{,}01 = 852{,}08\, m$ olur.

11-12 Boru Hattı:

$L = 10\, m$

Ön çökeltim çıkışında,

$Q = 224\, L/s$, 500 mm çaplı boru için $v = 1{,}14\ m/s$, $n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}008$ bulunur.

$L = 10\, m$ için sürekli yük kaybı,

$h_s = 0{,}005 * 10 = 0{,}01\, m$

Yersel kayıplar,

$h_y = 1{,}5 * 1{,}14^2/19{,}62 = 0{,}10\, m$ bulunur. Böylece ön çökeltim havuzu çıkış bacası maksimum su kotu,

$E = 852{,}28 + 0{,}01 + 0{,}10 = 852{,}39\, m$ elde edilir. Minimum su kotu da,

$v_{min} = 0{,}077 * 4/(\pi * 0{,}5^2) = 0{,}4\ m/s$, $n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}0004$

$h_s = 0{,}004\, m$ ve

$h_y = 0{,}01\, m$ bulunur.

$e = 852{,}08 + 0{,}01 = 852{,}09\, m$ olur.

Şekil Ek 1. 7. Havalandırma havuzu planı ve kesiti

k) <u>Ön Çökeltim Havuzu Giriş Kulesi ile Çıkış Bacası Arası:</u>

Ön çökeltim havuzu çevre kanalı, çıkış bacasına 500 mm çaplı bir boru ile bağlanacaktır. Bu borunun üst kotu, çıkış bacası maksimum su kotuna eşit alınmıştır. Geçiş borusundaki yersel yük kaybı,

$h_y = 1{,}5 * 0{,}57^2/2g = 0{,}02\ m$'dir. Dolayısıyla çevre kanalının çukurlaştırılmış kesimindeki su kotu,$E = 852{,}39 + 0{,}02 = 852{,}41\ m$ olur.

Çevre kanalının çukur kesiminin taban kotu da,

$Z = 852{,}39 - 0{,}5 = 851{,}86\ m$ bulunur.

Çevre kanalının sonundaki kritik kesitteki su derinliği,

$H_{kr} = ((0{,}224/2)^2/0{,}6^2/9{,}81)^{1/3} = 0{,}15\ m$ bulunur.

Bu kesitte çevre kanalı taban kotu, 5 cm hava payı ile,

$Z = 852{,}39 + 0{,}05 = 852{,}44\ m$ alınırsa, maksimum su kotu,

$E = 852{,}44 + 0{,}15 = 852{,}59\ m$ bulunur.

Çevre kanalı başındaki su kotu da,

$H_0 = 3{,}1 * 0{,}15/2 = 0{,}23\ m$ alınarak,

$E = 852{,}44 + 0{,}23 = 852{,}67\ m$ bulunur.

Ön çökeltim havuzunda su kotu hesabı:

5 cm'lik serbest düşüm alınmak suretiyle savak kret kotu,

$Z = 852{,}67 + 0{,}05 = 852{,}72\ m$ elde edilir.

Savak yükü diyagramından maksimum debi için $h = 0{,}06\ m$ ve minimum debi için $h = 0{,}03\ m$ olduğundan, ön çökeltim havuzu su kotları,

$E = 852{,}72 + 0{,}06 = 852{,}78\ m$ ve minimum su kotu,

$e = 852{,}72 + 0{,}03 = 852{,}75\ m$ bulunur.

Giriş yapısı Stengel giriş tertibatı şeklinde teşkil edilmiştir.

$maks. Q_1 = 0{,}224\ m^3/s \quad V_1 = 0{,}45\ m/s$ olduğundan toplam yük kaybı,

$h = h_b + h_g$

$h_b = 0{,}5\ (0{,}5^2/19{,}62) = 0{,}01\ m$

$h_g = 1{,}0\ (0{,}5^2/19{,}62) = 0{,}02\ m$

$h = 0{,}03\ m$

Minimum debi için benzer şekilde $h = 0{,}02\ m$ bulunur.

O halde giriş kulesindeki su seviyeleri,

$E = 852{,}78 + 0{,}03 = 852{,}81\ m$

$e = 852{,}75 + 0{,}02 = 852{,}77\ m$ olur.

Şekil Ek 1. 8. Dişli savak

Şekil Ek 1. 9. Ön çökeltim havuzu şematik plan ve kesiti

l) <u>Ön Çökeltim Havuzu Dağıtma Bacası (T2) ile Giriş Kulesi Arası:</u>

$Q_1 = 0{,}224\ m^3/s$ ve giriş borusu çapı 500 mm olup,

$Q = (\pi\, d^2/4)V$, $V = 4 * 0{,}224/(\pi * 0{,}5^2) = 1{,}14\ m/s$, $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}0036$'dır.

Son çökeltim havuzlarında olduğu gibi toplam yük kaybı,

$h = (0{,}5 + 3 * 0{,}25 + 0{,}25 + 1)1{,}14^2/2g + 0{,}0036 * 25 = 0{,}14 + 0{,}09 = 0{,}23\ m$

ve benzer şekilde minimum debi için $h = 0{,}03\ m$ bulunur.

Dağıtma bacası su seviyeleri Q_{maks} ve Q_{min} için sırasıyla,

$E = 852{,}81 + 0{,}23 = 852{,}04\ m$

$e = 852{,}81 + 0{,}03 = 852{,}84\ m$'dir.

Dağıtım yapısında 3 m çaplı savak bulunmaktadır. Savak boyu $b = \pi * 3 = 9{,}9\ m$'dir.

$Q = 1{,}8 * b * h^{1,5}$ ifadesinden $Q = 0{,}436\, m^3/s$ için $h = 0{,}08\, m$ ve minimum debi için $h = 0{,}05\ m$ elde edilir. Burada 5 cm serbest düşü dikkate alınarak,

$savak\ kret\ kotu = 853{,}04 + 0{,}05 = 853{,}09\ m$ ve merkezindeki su kotları,

$E = 853{,}09 + 0{,}08 = 852{,}17\ m$

$e = 853{,}09 + 0{,}05 = 853{,}14\ m$'dir.

m) <u>9 Bacası ile Ön Çökeltim Havuzu Dağıtma Bacası (T2) Arası Yük Kaybı:</u>

Bu bacalar arası 700 mm çaplı çelik boru ile geçilmiş olup, $Q = 436\ L/s$ için $v = 1{,}13\ m/s, n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}0022$ bulunur. $L = 10\ m$ için sürekli yük kaybı,

$h_s = 10 * 0{,}0022 = 0{,}02\ m$

Yersel yük kaybı,

$h_y = (0{,}5 + 1 + 0{,}3)\ (1{,}13^2/19{,}62) = 0{,}12\ m$ olur. O halde 9 Bacasındaki su kotları,

$E = 853{,}17 + 0{,}14 = 853{,}31\ m$

$e = 853{,}14 + 0{,}03 = 853{,}17\ m$'dir.

n) <u>Parshall (Debi Ölçme, Venturi Yapısı) Mansap Kanalı ile 9 Bacası Arası:</u>

Parshall savağı mansap kanalı $b = 0{,}80\ m$, $n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}003$ için maksimum debide $h = 0{,}38\ m$ ve minimum debide $h = 0{,}12\ m$ bulunmuştu. Bu kanalın taban kotu,

$Z = 853{,}31 - 0{,}38 = 852{,}93\ m$ olduğundan

$E = 853{,}31\ m$

$e = 853{,}17\ m$ bulunur. Parshall kanalı çıkışında, giriş kaybını ($h_g \cong 0{,}1V^2/2g$) karşılamak üzere 0,01 m düşüm yapılmıştır. Böylece kritik kesitte akar kot (taban kotu) ve su kotu,

$Z = 852{,}93 + M + K + 0{,}01 = 852{,}93 + 0{,}03 + 0{,}08 + 0{,}01 = 853{,}05\ m$

$h_{kr} = 0{,}59\ m$ bulunduğundan,

$E = 853{,}05 + 0{,}59 = 853{,}64\ m$ olarak elde edilir.

Minimum debi için savak boğazındaki su kotu,

$e = 853{,}05 + 0{,}19 = 853{,}24\ m$ olur.

Proses tasarımı sonucu kum tutucuda su kotu,

$Q_{maks} = 436$ L $/s$ için $h = 0{,}92\ m$

$Q_{min} = 77$ L $/s$ için $h = 0{,}29\ m$ bulunmuştu.

Ölçüm savağı girişindeki kum tutucu taban kotu,

$Z = 853{,}05\ m$ olduğuna göre kum tutucuda su kotları,

$E = 853{,}05 + 0{,}92 = 853{,}97\ m$

$e = 853{,}05 + 0{,}29 = 853{,}34\ m$ olacaktır.

Şekil Ek 1. 10. Parshall kanalı

o) <u>İnce Izgara Çıkışı ile Kum Tutucu Arası:</u>

İnce ızgara ile kum tutucu arası $J = 0{,}003$ eğimli kanaldır. 5-6 kanalı $b = 0{,}8\ m$ ve

$Q_{maks} = 436\ \mathrm{L}\ /s$ için $h = 0{,}38\ m$, $v = 1{,}44\ m/s$

$Q_{min} = 77\ \mathrm{L}\ /s$ için $h = 0{,}11\ m$, $v = 0{,}82 m/s$'dir.

Tedrici daralma ve genişleme kaybı maksimum ve minimum debiler için sırasıyla,

$h_y = (0{,}5)\ (1{,}14^2/19{,}62) = 0{,}05\ m$ ve $h_y = 0{,}02\ m$ bulunur. Sürekli yük kaybı,

$J * L = 0{,}003 * 10 = 0{,}03\ m$ olur. Bu durumda ince ızgara çıkışı su kotları da,

$E = 853{,}97 + 0{,}08 = 854{,}05\ m$

$e = 853{,}34 + 0{,}05 = 853{,}38\ m$ olacaktır.

Izgarada yük kaybı 0,04 m olarak hesaplanmıştı.

Izgara önünde su kotu,

$E = 854{,}05 + 0{,}04 = 854{,}09\ m$ olacaktır.

Burgulu pompa çıkışında (deşarj kanalında), $L = 10\ m$, $n = 0{,}013$, $J = 0{,}003$, $h = 0{,}03\ m$ için maksimum su kotu da,

$E = 854{,}09 + 0{,}03 = 854{,}12\ m$ bulunur.

Sonuç olarak DNRx şehri AAT'sinde Kum tutucu çıkış (deşarj) kanalı ile klorlama havuzu çıkışı arasındaki toplam yük kaybı,

$\Delta H_{top} = 854{,}12 - 849{,}56 - 1{,}40\ (zorunlu\ d\text{üşü}) = 4{,}16\ m$ bulunur.

Şekil Ek 1. 11. Kum tutucu

Çamur Arıtma Birimleri

Çamur, ön çökeltim ve son çökeltim birimlerinden açığa çıkmaktadır. Son çökeltim havuzlarından alınan biyolojik fazla çamurlar, geri devir hattından ayrı bir boru ile ön çökeltim çamurlarının da toplandığı çamur terfi merkezine (ÇTM) verilmektedir. Buradan; karışık çamur yoğunlaştırıcıların dağıtma bacasına, oradan da yoğunlaştırıcılara verilmektedir. Yoğunlaştırılan çamurlar aerobik çamur çürütücülere iletilmektedir. Aerobik olarak stabilize olmuş çamur ise yatay bant filtrelere verilmektedir. Yoğunlaştırıcı duru suyu ise cazibe ile tesis girişine iletmektedir.

DNRx şehri AAT'sinde çamur arıtma birimlerinin hidrolik tasarımı aşağıda verilmiştir.

a) <u>Ön Çökeltim Havuzları ile ÇTM Arası Yük Kaybı:</u>

Ön çökeltim havuzunda su kotu $852{,}78\ m$'dir. Uygun bir akış için çamur çekme (tahliye) vanası çıkış kotu ile su kotu arasında $1{,}0\ m$'lik bir kot farkı olmalıdır. Bu yüzden anılan teleskopik vananın tam açık halde kotu $851{,}78\ m$ alınmıştır.

Çamur Terfi Merkezi emme haznesi taban kotu ise, projesinden,

$Z = 849{,}30\ m$ alınmıştır. Proses tasarımına göre,

1. Kademede üretilen çamur miktarı $360\ \ m^3/gün = 4{,}17 * 10^{-3}\ \ m^3/s = 4{,}17\ \mathrm{L}\ /s$

2. Kademedeki çamur miktarı $631\ \ m^3/gün = 7{,}3 * 10^{-3}\ \ m^3/s = 7{,}3\ \mathrm{L}\ /s$

olarak bilinmektedir.

Tıkanmaları önlemek açısından çamur basma borusu 200 mm çapında seçilmiştir.

2. Kademede çamurun 12 saatte basılacağı kabulü ile debi,

$Q = 631/12 * 3600 = 0{,}0146\ m^3/s = 14{,}6\ \ \mathrm{L}\ /s$ alınmıştır. Bu durumda pompa basma borusundaki hız,

$Q = \pi(d^2/4)/V, V = 4Q/(\pi d^2) = 4 * 0{,}0146/(\pi * 0{,}20^2) = 0{,}46\ \ \mathrm{m}/s$

bulunur. Çökelmenin önlenmesi gayesi ile pompa debisi $15\ \mathrm{L}\ /s$ alınacaktır. Buna göre basma borusundaki hız,

$Q = \pi(d^2/4)/V, V = 4Q/(\pi d^2) = 4 * 0{,}015/(\pi * 0{,}20^2) = 0{,}5\ \ \mathrm{m}/s$ bulunur.

Başlangıçta terfi yapılacağından, hidrolik hesaplar aerobik çamur çürütücüden geriye (başa) doğru yapılacaktır. Aerobik çamur çürütücüde su kotu, mevcut topografik şartlarda Bant Filtre pompalarının rahatça emiş yapmalarını sağlamak üzere $851{,}50\ m$ seçilmiştir.

Şekil Ek 1. 12. DNRx şehri AAT'si çamur arıtma ve iletim birimleri hidrolik profili

b) <u>Çamur Yoğunlaştırıcı ile Aerobik Çamur Çürütücü Arası:</u>

1. Kademe yoğunlaştırma debisi,

$Q_1 = 114\ m^3/gün = 10{,}5\ \text{L}/s$ (3 saatlik tahliye)

Durusu debisi ise,

$Q_{1,s} = 360 - 114 = 246\ m^3/gün = 20{,}5\ \text{L}/s$ (12 saatlik deşarj)

2. Kademe yoğunlaştırma debisi,

$Q_1 = 200/2 = 100\ m^3/gün = 9{,}3\ \text{L}/s$

$10{,}5\ \text{L}/s > 9{,}3\ \text{L}/s$

olduğundan hidrolik hesaplar 1. Kademeye göre yapılacaktır.

$maks.Q_1 = 10{,}5\,\text{L}/s$, $D = 200\,mm$, $v = 0{,}0105 * 4/(\pi 0{,}2^2) = 0{,}33\,\text{m}/s$ ($\sim 0{,}5\,\text{m}/s$ alınacaktır.) $n = 0{,}013$, $J = 0{,}0023$, çamur yük kaybı artırma faktörü (Bölüm 9.2, Şekil 9.2) $k = 2$ alınırsa, $L \cong 17\,m$ için,

$h_s = 2 * 0{,}0023 * 17 = 0{,}08\,m$

$h_y = 2(2k_g + 2k_d + 2k_ç)v^2/2g = 2(2 * 0{,}5 + 2 * 0{,}13 + 2 * 1)0{,}5^2/2g = 0{,}08\,m$

$h_t = 0{,}08 + 0{,}08 = 0{,}16\,m$ olur.

Yoğunlaştırıcıdan çamur çürütücüye cazibeyle rahat bir akış sağlanabilmesi için kayıplarla birlikte $1 + 0{,}16 \cong 1{,}20\,m$'lik bir kot farkı olması gerekir. Bu durumda yoğunlaştırıcıdaki su kotu,

$E = 851{,}50 + 1{,}20 = 852{,}70\,m$ bulunur.

Dolayısıyla teleskopik çamur tahliye (çekme) vanası $851{,}50\,m$ ile $852{,}50\,m$ kotları arasında hareket edecektir.

Çamur Çürütücü Çıkış Savağı Hesabı:

Yoğunlaştırılmış çamur debisi $10{,}5\,\text{L}/s$ olduğuna göre $b = 1{,}0\,m$ genişlikli savak üzerindeki yük, $Q = 1{,}8 * b * h^{1,5}$ ifadesiyle $h = 0{,}03\,m$ bulunur. 7 cm'lik hava payı esas alınırsa bu savağın kret kotu,

$Z = 851{,}50 - 0{,}03 - 0{,}07 = 851{,}40\,m$ olur.

Plan

A-A Kesiti

Şekil Ek 1. 13. Aerobik çamur çürütücü plan ve kesiti

c) <u>Dağıtma Bacası (T9) ile Yoğunlaştırıcı Arası:</u>

T9 dağıtma bacası ile yoğunlaştırıcı arasında kritik debi $Q_{kr} = 15\ \mathrm{L}\ /s$'dir.

$d = 200\ mm$, $v = 0{,}50\ \mathrm{m}/s$, $n = 0{,}013$, $J = 0{,}0025$ ve $L = 18\ m$

Çamur faktörü $k = 2$ alınırsa sürekli yük kaybı,

$h_s = 2 * 18 * 0{,}0025 = 0{,}09\ m$

Yersel yük kaybı ise,

Ani daralma $k = 0{,}5$

Vana $k = 0{,}12$

Dirsek (3 adet) $k = 3 * 0{,}33 = 1{,}0$

Ani genişleme $k = 1{,}0$

Toplam $k = 2{,}62$

$h_y = 2(2{,}62)0{,}5^2/2g = 0{,}07\ m$

bulunur. Bu durumda toplam yük kaybı,

$h = 0{,}09 + 0{,}07 = 0{,}16\ m$ olur.

10 cm'lik hava payı ve savak yükü ilavesi ile T9 dağıtma bacası içindeki su kotu,

$E = 852{,}70 + 0{,}16 + 0{,}10 = 852{,}96\ m$ olarak elde edilir.

Şekil Ek 1. 14. Çamur yoğunlaştırıcı plan ve kesiti

d) <u>ÇTM ile Dağıtma Bacası Arası:</u>

$L = 30\ m$, $Q = 15\ \mathrm{L}/s$, $d = 200\ mm$, $v = 0{,}50\ \mathrm{m}/s$, $n = 0{,}013$ ve $J = 0{,}0025$

Çamur için yük kaybı düzeltme faktörü $k = 2$ seçilirse,

Sürekli yük kaybı,

$h_s = 2 * 30 * 0{,}0025 = 0{,}15\ m$

Yersel yük kaybı,

$h_y = 2(0{,}5 + 1)0{,}5^2/2g = 0{,}04\ m$

ÇTM içindeki toplam yük kaybı, aşağıdaki kısmi eşdeğer boru boylarından hareketle,

2 dirsek $L_{eş} = 2 * 9 = 18\ m$

2 vana $L_{eş} = 2 * 2 = 4\ m$

1 klape $L_{eş} = 1 * 11 = 11\ m$

1 sökme parçası $L_{eş} = 3\ m$

olmak üzere toplam $36\ m \cong 50\ m$ (bağlantı boruları ile birlikte) eşdeğer boru boyu esası ile,

$h_{TM} = 2 * 50 * 0{,}0025 = 0{,}25\ m$

ve toplam yük kaybı

$h = 0{,}15 + 0{,}04 + 0{,}25 = 0{,}44\ m$ bulunur (Bakınız Bölüm 2.2.3).

Çamur Terfi Merkezi (ÇTM) pompalarının manometrik terfi kotu,

$852{,}96 + 0{,}44 = 853{,}40\ m$

Terfi yüksekliği ise,

$H_m = 853{,}40 - 849{,}30 = 4{,}1 \cong 5\ m$ olacaktır.

e) <u>Ön Çökeltim (T3/2) ile ÇTM Arası:</u>

T3/2 çıkışındaki teleskopik vananın maksimum ve minimum seviyeleri arasındaki kot farkı $1{,}0\ m$ alınacaktır. Havuzun çamur konisi ile vana odası arasındaki yük kayıpları aşağıdaki gibidir.

$maks.\ Q_1 = 30\ \mathrm{L}/s$ (5 sa'te 10 dk tahliye) alınarak

$D = 200\ mm$, $v = (0{,}03 * 4)/(\pi * 0{,}2^2) = 0{,}95\ \mathrm{m}/s$, $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}0085$ bulunur. Boru boyu $L \cong 14\ m\ olduğuna\ göre, çamur\ faktörü$ k=1,5 için,

$h_s = 1{,}5 * 15 * 0{,}0085 = 0{,}18\ m$

$h_y = 1{,}5(0{,}5 + 1 + 2 * 0{,}13)0{,}95^2/2g = 0{,}12\ m$

$h_t = 0{,}18 + 0{,}12 = 0{,}30\ m$ bulunur. Bu durumda T3/2 çıkışındaki teleskopik vananın maksimum ve minimum kotları, ön çökeltim havuzundaki su kotu $852{,}78\ m$ olduğuna göre,

$E = 852{,}78 - 0{,}3 = 852{,}48\ m$

$e = 852{,}78 - 1{,}0 = 851{,}78\ m$

olarak elde edilir.

Vana odası ile ÇTM arasındaki yük kayıpları da $L \cong 48\ m$ olduğuna göre,

$h_s = 1{,}5 * 48 * 0{,}0085 = 0{,}61\ m$

$h_y = 1{,}5(2 * 0{,}5 + 2 * 1)0{,}95^2/2g = 0{,}21\ m$

$h_t = 0{,}82\ m$ bulunur.

T3/2 ve T3/1 havuzlarının çamurlarını ÇTM'ye ileten borunun nihayetindeki enerji seviyeleri,

$E = 852{,}48 - 0{,}82 = 851{,}66\ m$

$e = 851{,}78 - 0{,}82 = 850{,}96\ m$ olacaktır.

f) <u>Geri Devir Terfi Merkezi ile ÇTM arası:</u>

Aktif çamur tesissinde oluşan biyolojik fazla çamur, geri devir TM pompalarının basma tarafındaki kolektörlerden $10\ L/s$ debide alınarak $200\ mm$'lik bir boru ile ÇTM'ye iletilecektir.

$v = (0{,}01 * 4)/(\pi * 0{,}2^2) = 0{,}32 \cong 0{,}5\ \mathrm{m}/s$, $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}0023$ bulunur.

$L \cong 100\ m$ ve çamur faktörü $k = 1{,}5$ alınarak bu iki TM arasındaki yük kayıpları,

$h_s = 1{,}5 * 100 * 0{,}0023 = 0{,}35\ m$

$h_y = 1{,}5(1 + 0{,}13)0{,}5^2/2g = 0,2\ m$

$h_t = 0{,}37\ m$ bulunur.

Geri devir TM içindeki yersel yük kayıpları toplamı da $\sim 0{,}5\ m$ alınarak fazla çamur hattı manometrik terfi kotu için,

$E = H_0 + (0{,}37 + 0{,}50)$ yazılabilir.

Geri devir TM minimum su seviyesi ile ÇTM maksimum su seviyesi arasındaki kot farkı,

$H_0 = 851{,}66 - 850{,}61 = 1{,}05\ m$ olduğundan,

$H_m = 1{,}052 + 0{,}87 = 1{,}92\ m$ bulunur.

Terfi Merkezleri Tasarımı

DNRx şehri AAT bünyesinde 3 adet terfi merkezi bulunmaktadır:

- Giriş terfi merkezi
- Geri devir terfi merkezi
- Çamur terfi merkezi

Bunlar aşağıda sırasıyla ele alınmıştır.

a) <u>Giriş Terfi Merkezi</u>

Kaba ızgaradan geçen atıksuların terfi edilerek müteakip ünitelere iletimini sağlamak üzere bir Burgulu Pompa İstasyonu planlanmıştır.

Dnrx şehri Atıksu Arıtma Tesisinin 2050 yılı maksimum debisi $Q_{maks} = 436\ L/s$,

2035 yılı maksimum debisi ise $224\ L/s$ olduğundan burgulu pompa debisi

$Q = 436/2 = 218 \cong 225\ L/s$ seçilmiştir. Buna göre,

1. kademede 1+1=2 adet

2. kademede 2+1=3 adet burgulu pompa kullanılacaktır.

Montaj açısı 38°, vida yol (kanat) adedi 3, dış çap 1200 mm, göbek çapı, 609 mm, $n = 45\ d/d$ kabul edilmiştir. Bu durumda (pompa kataloğuna göre) çıkış kanalı çıkışında savaklanacak su kalınlığı 0,37 m olacaktır. Bu ölçülere uygun pompanın kapasitesi çeşitli firma katalogları yardımı ile $Q = 230\ L/s$ olarak tespit edilmiştir. Pompanın çekeceği güç verimi $\eta = 0{,}60$ seçilerek,

$N = 230 * 6{,}72/(102 * 0{,}6) = 25{,}25\ kW$ hesaplanmıştır.

Marj ve standart güç kademesi göz önünde tutularak,

$23{,}41 * 1{,}15 = 29 \cong 30\ kW$ $N_m = 30\ kW$ alınacaktır.

Burgulu pompanın şematik kesiti Şekil Ek 1. 15'te gösterilmiştir.

$(D + d)/2 * \cos 38 = 0{,}71\ m$

Burgulu pompalara girişte,

Su kotu: $848{,}22\ m$

Eşik kotu: $847{,}51\ m$

Taban kotu: $847{,}31\ m$

$(D - d)/2 * \cos 38 = 0{,}23\ m$

Burgulu pompalardan çıkışta,

Eşik kotu: $854{,}71\ m$

Dökülme kotu: $854{,}94\ m$

$H = 854{,}71 - 847{,}51 = 7{,}2\ m$ $H_m = 854{,}94 - 848{,}22 = 6{,}72\ m$

Şekil Ek 1. 15. Burgulu pompa istasyonu kesiti

b) <u>Geri Devir Terfi Merkezi</u>

Son çökeltim çamurlarını havalandırma havuzunun başına devrettirmek için bir Geri Devir Terfi Merkezi planlanmıştır.

Proses tasarımında geri devir oranı %82 olarak hesaplandığından 2035 ve 2050 yılları itibariyle geri devir debileri sırasıyla,

$Q_r = 0{,}82 * 0{,}191 = 0{,}157\ m^3/s$

$Q_r = 0{,}82 * 0{,}324 = 0{,}266\ m^3/s$ olarak bulunur.

Geri devir terfi merkezinin düşey milli monoblok kuru tip pompalarla teçhiz edilmesi planlanmıştır. Buna göre,

1. kademe maksimum debisi $157\ L/s$ olan, 2 asıl pompa kullanılacaktır,

$157/2 = 78{,}5 \cong 80\ L/s$ kapasitesinde pompalar seçilmiştir. Böylece ihtiyaca göre ~%40, %82 oranlarında geri devir tatbiki mümkün olacaktır.

Geri devir terfi merkezinde 1. Kademe 2 asıl ve 2. Kademe 1 asıl ilave olmak üzere toplam 3 adet düşey milli monoblok pompanın konulması düşünülmüştür.

Geometrik Terfi Yüksekliği Hesabı:

Çamur, son çökeltim havuzundan emme çukuruna 400 mm çaplı boru ile alınacaktır. 2035 yılında iki adet son çökeltim havuzu vardır. Kritik durum 2035 yılında ortaya çıkmaktadır.

$Q_r = 0{,}157\, m^3/s$ olup, $Q_1 = 0{,}157/2 = 0{,}08\, m^3/s$ bulunur.

Son çökeltim havuzunda 400 mm'lik çamur borusunda, bu debide hız $0{,}64\ m/s$'dir.

Son çökeltim havuzu ile geri devir terfi merkezi emme çukuru arasındaki yük kaybı:

2 dirsek $L_{eş} = 2 * 12 = 24\ m$

1 vana (tam açık) $L_{eş} = 1 * 3 = 3\ m$

Giriş kaybı $L_{eş} = 8\ m$

Yersel yük kayıpları toplamı $L_{eş} = 35\ m$

Çamur borusu uzunluğu $L = 18\ m$ olduğundan toplam boy,

$L_t = 18 + 35 = 53\ m$'dir.

400 mm eski boru için $= 0{,}013$ için $J = 0{,}002$ ve $k = 1{,}5$ alınarak yük kaybı,

$h = 1{,}5 * 0{,}002 * 53 = 0{,}17\ m$ elde edilir.

Son çökeltim havuzunda su seviyesi $850{,}78\ m$'dir.

Emme çukuru su kotu $850{,}78 - 0{,}17 = 850{,}61\ m$ olacaktır.

Havalandırma havuzu su seviyesi $851{,}50\ m$'dir.

Hava payı 1 m ve boru ekseni için 0,25 m fark dikkate alınırsa geometrik yükseklik,

$H_{geometrik} = 851{,}50 + 1{,}25 - 850{,}11 = 2{,}87 \cong 3\ m$ elde edilir.

Geri Devir Terfi Merkezi ile Havalandırma Havuzları Dağıtma Yapısı:

Çapı 500 mm olan borunun boyu 90 m'dir. Yersel yük kayıpları için eşdeğer boru boyları (vana ve diğer teçhizatlar için çap 300 mm'dir),

2 dirsek 300 mm $L_{eş} = 2 * 9 = 18\ m$

2 vana 300 mm $L_{eş} = 2 * 2 = 4\ m$

1 klape 300 mm $L_{eş} = 1 * 11 = 11\ m$

1 sökme parçası $L_{eş} = 1 - 3 = 3\ m$

Toplam $L_{eş} = 36\ m$

$Q_1 = 0{,}080\ \ m^3/s$ için $v = 1{,}13\ \ m/s$ ve eski boru $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}009$ bulunur.

Çamur için faktör $k = 1{,}5$ alınarak yük kaybı,

$h = 1{,}5 * 36 * 0{,}009 = 0{,}49\ m$ elde edilir.

Bu kayıp terfi hattına kadarki kayıp olup takriben sabittir. 500 mm çaplı geri devir terfi hattındaki yük kayıpları, su için verilen değerler $k = 1{,}5$ ile çarpılarak hesaplanmıştır.

$Q = 90\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}00067 * 90 = 0{,}09\ m$

$Q = 120\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}0010 * 90 = 0{,}14\ m$

$Q = 160\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}0018 * 90 = 0{,}24\ m$

$Q = 200\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}0029 * 90 = 0{,}39\ m$

$Q = 280\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}0060 * 90 = 0{,}81\ m$

$Q = 360\ L/s$ için $k\ J\ L = 1{,}5 * 0{,}0098 * 90 = 1{,}32\ m$

Buna göre verilen karakteristik eğriye en yakın pompa seçilmelidir.

$Q = 80\ L/s,\ H = 5\ m$

$n = 1000\ \ d/d,\ N_m = 11\ kW$

Geri Devir Terfi Merkezi Emme Çukuru Hesabı:

Geri devir terfi merkezi 400 mm çaplı borular ile çökeltim havuzuna bağlıdır. Emme çukurunda 1 m'lik seviye alçalması halinde son çökeltim havuzu çamur borusundan geçecek debi orifis formülü ile hesaplanabilir. Bu durumda,

$Q = C\ A\sqrt{2\ g\ h}$, bağlantı hattı kısa olduğundan aradaki yersel ve sürekli kayıplar ihmal edilerek, akacak debi, $C \cong 0{,}6$ alınmakla,

$A = 0{,}785\ D^2 = 0{,}785 * 0{,}4^2 = 0{,}126\ m^2,\ h = 1{,}0\ m$ için,

$Q = 0{,}60 * 0{,}126 * \sqrt{19{,}62 * 1{,}0} \cong 0{,}330\ \ m^3/s = 330\ L/s$ bulunur.

Bu değer bir pompanın bastığı debiden çok büyük olduğundan debi gelişine bağlı olarak ayrıca bir emme hacmine ihtiyaç yoktur.

Geri devir terfi merkezi kesiti Şekil Ek 1. 16'da verilmiştir.

Şekil Ek 1. 16. Çamur geri devir terfi merkezi kesit

c) <u>Çamur Terfi Merkezi (ÇTM)</u>

ÇTM'ye iki tür çamur gelmektedir:

(1) Son çökeltimden biyolojik fazla çamur
(2) Ön çökeltim çamuru

Ön çökeltimden gelen çamur 5 sa'te bir defa gelip, akışı takriben 10 dk kadar devam etmektedir. Bu akış debisi 30 L/s olup, sabit kalması sağlanmıştır.

Pompa debisi hesabı aşağıda verilmiştir.

Çamur terfi merkezine $Q = 7\ L/s$ debili düşey tip monoblok 1'i yedek 2 adet çamur pompası kullanılmıştır.

Terfi merkezi kuru tip olarak projelendirilmiştir.

ÇTM'ye, ön çökeltim havuzu çamur vanası kapalı iken, sadece fazla çamur debisi sürekli olarak gelmektedir. Bu debi,

$Q_{2050} = 3328 * 100/1{,}007 * 1000 = 330\ m^3/gün = 4\ L/s$'dir.

Çamur Terfi Merkezi Hesapları:

Ön Çökeltim çamurları ile fazla biyolojik çamurlar, ÇTM emme çukurundan yoğunlaştırıcı dağıtma bacasına terfi edilmektedir. Hidrolik hesaplarda ÇTM pompa debisinin $15\ L/s$ olduğu belirlenmişti.

Kullanılan pompa $Q_i = 10 + 5 = 15\ L/s$

<u>Manometrik Terfi Yüksekliği Hesabı:</u>

$L = 30\ m$, $Q = 15\ L/s$, $d = 200\ mm$, $v = 0{,}5\ m/s$, $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}0025$'tir.

Çamur için yük kaybı düzeltme faktörü $k = 2$ seçilirse,

Sürekli yük kaybı,

$h_s = 2 * 30 * 0{,}0025 = 0{,}15\ m$

Yersel yük kaybı,

$h_y = 0{,}25\ m$

$h_t = 0{,}15 + 0{,}25 = 0{,}40\ m$ bulunur.

ÇTM pompalarının manometrik terfi yüksekliği $852{,}70 - 849{,}30 + 0{,}4 = 3{,}8 \sim 5\ m$'dir.

$Q = 15\ L/s$, $h = 5\ m$, $N = 3\ kW$, $n = 1000\ d/d$, $n = 1\ çalışan + 1\ yedek$

ÇTM şematik plan ve kesiti Şekil Ek 1. 17'de verilmiştir.

Şekil Ek 1. 17. ÇTM şematik plan ve kesiti

Bant Filtre Pompaları:

Çamur çürütücüden alınan çamurlar yatay Bant Filtrelere basılacaktır. 2035 yılında çamur debisi $Q = 114\, m^3/gün$ elde edilmişti. Çamurların bant filtreye 2 vardiya yani 14 sa'te basılacağı kabul edildiğinden,

$Q = 114/14 = 8{,}14\, m^3/sa = 2{,}3\ L/s \sim 2{,}5\, L/s$ bulunur.

Bunun için 1 asıl 1 yedek santrifüj çamur pompası seçilmiştir. Bant filtre ile çamur çürütücü arasındaki kot farkı $4{,}60\, m$ olup, basma borusu çapı 80 mm alınırsa, $v = 0{,}5\ m/s$ ve $n = 0{,}013$ için $J = 0{,}005$ bulunur. Çamur için yük kaybı faktörü $k = 2$ ve $L = 35\, m$ alınarak,

Sürekli yük kaybı,

$h_s = 2 * 35 * 0{,}005 = 0{,}35\, m$

Yersel yük kaybı,

$h_y = 2 * (3 * 0{,}5^2/19{,}62) = 0{,}08\, m$

$h_t = 0{,}35 + 0{,}08 = 0{,}43\, m$ bulunur.

Bu durumda,

$H_{geometrik} = 853{,}10 - 847{,}80 - 0{,}70 = 4{,}60\, m$

$H_m = 5\, m$ olur.

Manometrik terfi yüksekliği 5 m seçilmiştir. Bu pompalar için,

$Q = 2{,}5\, L/s$, $H_m = 5\, m$, $N = 1{,}1\, kW$, $n = 1000\ d/d$, $n = 1\ çalışan + 1\ yedek$'tir.

2050 yılı debisi $282\, m^3/gün$ bulunmuştu.

Çamurların bant filtreye 2 vardiya yani 14 sa'te basılacağı kabul edildiğinden $Q = 282/14 = 5{,}6\, L/s \sim 6\, L/s$ bulunur.

2. Kademe ile çamur pompalarının kapasitesi arttırılacaktır.

KAYNAK

Eroğlu, V., Öztürk, İ. ve Arıkan, O.A. (1994). Dinar (Afyonkarahisar) Atıksu Arıtma Tesisi Tatbikat Projesi, Proje Raporu, Nisan 1994. Altınok Müşavir Mühendislik Ltd. Şti.

EK.2. FAİZ TABLOLARI

Tablo Ek. 2.1. i = %4

Yıllar	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	Yıllar
	1	2	3	4	5	6	
1	1·040	0·9615	1·00000	1·04000	1·000	0·962	1
2	1·082	0·9246	0·49020	0·53020	2·040	1·886	2
3	1·125	0·8890	0·32035	0·36035	3·122	2·775	3
4	1·170	0·8548	0·23549	0·27549	4·246	3·630	4
5	1·217	0·8219	0·18463	0·22463	5·416	4·452	5
6	1·265	0·7903	0·15076	0·19076	6·633	5·242	6
7	1·316	0·7599	0·12661	0·16661	7·898	6·002	7
8	1·369	0·7307	0·10853	0·14853	9·214	6·733	8
9	1·423	0·7026	0·09449	0·13449	10·583	7·435	9
10	1·480	0·6756	0·08329	0·12329	12·006	8·111	10
11	1·539	0·6496	0·07415	0·11415	13·486	8·760	11
12	1·601	0·6246	0·06655	0·10655	15·026	9·385	12
13	1·665	0·6006	0·06014	0·10014	16·627	9·986	13
14	1·732	0·5775	0·05467	0·09467	18·292	10·563	14
15	1·801	0·5553	0·04994	0·08994	20·024	11·118	15
16	1·873	0·5339	0·04582	0·08582	21·825	11·652	16
17	1·948	0·5134	0·04220	0·08220	23·698	12·166	17
18	2·026	0·4936	0·03899	0·07899	25·645	12·659	18
19	2·107	0·4746	0·03614	0·07614	27·671	13·134	19
20	2·191	0·4564	0·03358	0·07358	29·778	13·590	20
21	2·279	0·4388	0·03128	0·07128	31·969	14·029	21
22	2·370	0·4220	0·02920	0·06920	34·248	14·451	22
23	2·465	0·4057	0·02731	0·06731	36·618	14·857	23
24	2·563	0·3901	0·02559	0·06559	39·083	15·247	24
25	2·666	0·3751	0·02401	0·06401	41·646	15·622	25
26	2·772	0·3607	0·02257	0·06257	44·312	15·983	26
27	2·883	0·3468	0·02124	0·06124	47·084	16·330	27
28	2·999	0·3335	0·02001	0·06001	49·968	16·663	28
29	3·119	0·3207	0·01888	0·05888	52·966	16·984	29
30	3·243	0·3083	0·01783	0·05783	56·085	17·292	30
31	3·373	0·2965	0·01686	0·05686	59·328	17·588	31
32	3·508	0·2851	0·01595	0·05595	62·701	17·874	32
33	3·648	0·2741	0·01510	0·05510	66·210	18·148	33
34	3·794	0·2636	0·01431	0·05431	69·858	18·411	34
35	3·946	0·2534	0·01358	0·05358	73·652	18·665	35
40	4·801	0·2083	0·01052	0·05052	95·026	19·793	40
45	5·841	0·1712	0·00826	0·04826	121·029	20·720	45
50	7·107	0·1407	0·00655	0·04655	152·667	21·482	50
55	8·646	0·1157	0·00523	0·04523	191·159	22·109	55
60	10·520	0·0951	0·00420	0·04420	237·991	22·623	60
65	12·799	0·0781	0·00339	0·04339	294·968	23·047	65
70	15·572	0·0642	0·00275	0·04275	364·290	23·395	70
75	18·945	0·0528	0·00223	0·04223	448·631	23·680	75
80	23·050	0·0434	0·00181	0·04181	551·245	23·915	80
85	28·044	0·0357	0·00148	0·04148	676·090	24·109	85
90	34·119	0·0293	0·00121	0·04121	827·983	24·267	90
95	41·511	0·0241	0·00099	0·04099	1012·785	24·398	95
100	50·505	0·0198	0·00081	0·04081	1237·624	24·505	100

Tablo Ek. 2.2. i = %6

Yıllar	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	Yıllar
	1	2	3	4	5	6	
1	1·060	0·9434	1·00000	1·06000	1·000	0·943	1
2	1·124	0·8900	0·48544	0·54544	2·060	1·833	2
3	1·191	0·8396	0·31411	0·37411	3·184	2·673	3
4	1·262	0·7921	0·22859	0·28859	4·375	3·465	4
5	1·338	0·7473	0·17740	0·23740	5·637	4·212	5
6	1·419	0·7050	0·14336	0·20336	6·975	4·917	6
7	1·504	0·6651	0·11914	0·17914	8·394	5·582	7
8	1·594	0·6274	0·10104	0·16104	9·897	6·210	8
9	1·689	0·5919	0·08702	0·14702	11·491	6·802	9
10	1·791	0·5584	0·07587	0·13587	13·181	7·360	10
11	1·898	0·5268	0·06679	0·12679	14·972	7·887	11
12	2·012	0·4970	0·05928	0·11928	16·870	8·384	12
13	2·133	0·4688	0·05296	0·11296	18·882	8·853	13
14	2·261	0·4423	0·04758	0·10758	21·015	9·295	14
15	2·397	0·4173	0·04296	0·10296	23·276	9·712	15
16	2·540	0·3936	0·03895	0·09895	25·673	10·106	16
17	2·693	0·3714	0·03544	0·09544	28·213	10·477	17
18	2·854	0·3503	0·03236	0·09236	30·906	10·828	18
19	3·026	0·3305	0·02962	0·08962	33·760	11·158	19
20	3·207	0·3118	0·02718	0·08718	36·786	11·470	20
21	3·400	0·2942	0·02500	0·08500	39·993	11·764	21
22	3·604	0·2775	0·02305	0·08305	43·392	12·042	22
23	3·820	0·2618	0·02128	0·08128	46·996	12·303	23
24	4·049	0·2470	0·01968	0·07968	50·816	12·550	24
25	4·292	0·2330	0·01823	0·07823	54·865	12·783	25
26	4·549	0·2198	0·01690	0·07690	59·156	13·003	26
27	4·822	0·2074	0·01570	0·07570	63·706	13·211	27
28	5·112	0·1956	0·01459	0·07459	68·528	13·406	28
29	5·418	0·1846	0·01358	0·07358	73·640	13·591	29
30	5·743	0·1741	0·01265	0·07265	79·058	13·765	30
31	6·088	0·1643	0·01179	0·07179	84·802	13·929	31
32	6·453	0·1550	0·01100	0·07100	90·890	14·084	32
33	6·841	0·1462	0·01027	0·07027	97·343	14·230	33
34	7·251	0·1379	0·00960	0·06960	104·184	14·368	34
35	7·685	0·1301	0·00897	0·06897	111·435	14·498	35
40	10·286	0·0972	0·00646	0·06646	154·762	15·046	40
45	13·765	0·0727	0·00470	0·06470	212·744	15·456	45
50	18·420	0·0543	0·00344	0·06344	290·336	15·762	50
55	24·650	0·0406	0·00254	0·06254	394·172	15·991	55
60	32·988	0·0303	0·00188	0·06188	533·128	16·161	60
65	44·145	0·0227	0·00139	0·06139	719·083	16·289	65
70	59·076	0·0169	0·00103	0·06103	967·932	16·385	70
75	79·057	0·0126	0·00077	0·06077	1300·949	16·456	75
80	105·796	0·0095	0·00057	0·06057	1746·600	16·509	80
85	141·579	0·0071	0·00043	0·06043	2342·982	16·549	85
90	189·465	0·0053	0·00032	0·06032	3141·075	16·579	90
95	253·546	0·0039	0·00024	0·06024	4209·104	16·601	95
100	339·302	0·0029	0·00018	0·06018	5638·368	16·618	100

Tablo Ek. 2.3. i = %8

Yıllar	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	Yıllar
	1	2	3	4	5	6	
1	1·080	0·9259	1·00000	1·08000	1·000	0·926	1
2	1·166	0·8573	0·48077	0·56077	2·080	1·783	2
3	1·260	0·7938	0·30803	0·38803	3·246	2·577	3
4	1·360	0·7350	0·22192	0·30192	4·506	3·312	4
5	1·469	0·6806	0·17046	0·25046	5·867	3·993	5
6	1·587	0·6302	0·13632	0·21632	7·336	4·623	6
7	1·714	0·5835	0·11207	0·19207	8·923	5·206	7
8	1·851	0·5403	0·09401	0·17401	10·637	5·747	8
9	1·999	0·5002	0·08008	0·16008	12·488	6·247	9
10	2·159	0·4632	0·06903	0·14903	14·487	6·710	10
11	2·332	0·4289	0·06008	0·14008	16·645	7·139	11
12	2·518	0·3971	0·05270	0·13270	18·977	7·536	12
13	2·720	0·3677	0·04652	0·12652	21·495	7·904	13
14	2·937	0·3405	0·04130	0·12130	24·215	8·244	14
15	3·172	0·3152	0·03683	0·11683	27·152	8·559	15
16	3·426	0·2919	0·03298	0·11298	30·324	8·851	16
17	3·700	0·2703	0·02963	0·10963	33·750	9·122	17
18	3·996	0·2502	0·02670	0·10670	37·450	9·372	18
19	4·316	0·2317	0·02413	0·10413	41·446	9·604	19
20	4·661	0·2145	0·02185	0·10185	45·762	9·818	20
21	5·034	0·1987	0·01983	0·09983	50·423	10·017	21
22	5·437	0·1839	0·01803	0·09803	55·457	10·201	22
23	5·871	0·1703	0·01642	0·09642	60·893	10·371	23
24	6·341	0·1577	0·01498	0·09498	66·765	10·529	24
25	6·848	0·1460	0·01368	0·09368	73·106	10·675	25
26	7·396	0·1352	0·01251	0·09251	79·954	10·810	26
27	7·988	0·1252	0·01145	0·09145	87·351	10·935	27
28	8·627	0·1159	0·01049	0·09049	95·339	11·051	28
29	9·317	0·1073	0·00962	0·08962	103·966	11·158	29
30	10·063	0·0994	0·00883	0·08883	113·283	11·258	30
31	10·868	0·0920	0·00811	0·08811	123·346	11·350	31
32	11·737	0·0852	0·00745	0·08745	134·214	11·435	32
33	12·676	0·0789	0·00685	0·08685	145·951	11·514	33
34	13·690	0·0730	0·00630	0·08630	158·627	11·587	34
35	14·785	0·0676	0·00580	0·08580	172·317	11·655	35
40	21·725	0·0460	0·00386	0·08386	259·057	11·925	40
45	31·920	0·0313	0·00259	0·08259	386·506	12·108	45
50	46·902	0·0213	0·00174	0·08174	573·770	12·233	50
55	68·914	0·0145	0·00118	0·08118	848·923	12·319	55
60	101·257	0·0099	0·00080	0·08080	1253·213	12·377	60
65	148·780	0·0067	0·00054	0·08054	1847·248	12·416	65
70	218·606	0·0046	0·00037	0·08037	2720·080	12·443	70
75	321·205	0·0031	0·00025	0·08025	4002·557	12·461	75
80	471·955	0·0021	0·00017	0·08017	5886·935	12·474	80
85	693·456	0·0014	0·00012	0·08012	8655·706	12·482	85
90	1018·915	0·0010	0·00008	0·08008	12723·939	12·488	90
95	1497·121	0·0007	0·00005	0·08005	18701·507	12·492	95
100	2199·761	0·0005	0·00004	0·08004	27484·516	12·494	100

Tablo Ek. 2.4. i = %10

Yıllar	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	Yıllar
	1	2	3	4	5	6	
1	1·100	0·9091	1·00000	1·10000	1·000	0·909	1
2	1·210	0·8264	0·47619	0·57619	2·100	1·736	2
3	1·331	0·7513	0·30211	0·40211	3·310	2·487	3
4	1·464	0·6830	0·21547	0·31547	4·641	3·170	4
5	1·611	0·6209	0·16380	0·26380	6·105	3·791	5
6	1·772	0·5645	0·12961	0·22961	7·716	4·355	6
7	1·949	0·5132	0·10541	0·20541	9·487	4·868	7
8	2·144	0·4665	0·08744	0·18744	11·436	5·335	8
9	2·358	0·4241	0·07364	0·17364	13·579	5·759	9
10	2·594	0·3855	0·06275	0·16275	15·937	6·144	10
11	2·853	0·3505	0·05396	0·15396	18·531	6·495	11
12	3·138	0·3186	0·04676	0·14676	21·384	6·814	12
13	3·452	0·2897	0·04078	0·14078	24·523	7·103	13
14	3·797	0·2633	0·03575	0·13575	27·975	7·367	14
15	4·177	0·2394	0·03147	0·13147	31·772	7·606	15
16	4·595	0·2176	0·02782	0·12782	35·950	7·824	16
17	5·054	0·1978	0·02466	0·12466	40·545	8·022	17
18	5·560	0·1799	0·02193	0·12193	45·599	8·201	18
19	6·116	0·1635	0·01955	0·11955	51·159	8·365	19
20	6·727	0·1486	0·01746	0·11746	57·275	8·514	20
21	7·400	0·1351	0·01562	0·11562	64·002	8·649	21
22	8·140	0·1228	0·01401	0·11401	71·403	8·772	22
23	8·954	0·1117	0·01257	0·11257	79·543	8·883	23
24	9·850	0·1015	0·01130	0·11130	88·497	8·985	24
25	10·835	0·0923	0·01017	0·11017	98·347	9·077	25
26	11·918	0·0839	0·00916	0·10916	109·182	9·161	26
27	13·110	0·0763	0·00826	0·10826	121·100	9·237	27
28	14·421	0·0693	0·00745	0·10745	134·210	9·307	28
29	15·863	0·0630	0·00673	0·10673	148·631	9·370	29
30	17·449	0·0573	0·00608	0·10608	164·494	9·427	30
31	19·194	0·0521	0·00550	0·10550	181·943	9·479	31
32	21·114	0·0474	0·00497	0·10497	201·138	9·526	32
33	23·225	0·0431	0·00450	0·10450	222·252	9·569	33
34	25·548	0·0391	0·00407	0·10407	245·477	9·609	34
35	28·102	0·0356	0·00369	0·10369	271·024	9·644	35
40	45·259	0·0221	0·00226	0·10226	442·593	9·779	40
45	72·890	0·0137	0·00139	0·10139	718·905	9·863	45
50	117·391	0·0085	0·00086	0·10086	1163·909	9·915	50
55	189·059	0·0053	0·00053	0·10053	1880·591	9·947	55
60	304·482	0·0033	0·00033	0·10033	3034·816	9·967	60
65	490·371	0·0020	0·00020	0·10020	4893·707	9·980	65
70	789·747	0·0013	0·00013	0·10013	7887·470	9·987	70
75	1271·895	0·0008	0·00008	0·10008	12708·954	9·992	75
80	2048·400	0·0005	0·00005	0·10005	20474·002	9·995	80
85	3298·969	0·0003	0·00003	0·10003	32979·690	9·997	85
90	5313·023	0·0002	0·00002	0·10002	53120·226	9·998	90
95	8556·676	0·0001	0·00001	0·10001	85556·760	9·999	95
100	13780·612	0·0001	0·00001	0·10001	137796·123	9·999	100

Tablo Ek. 2.5. i = %12

Yıllar	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	Yıllar
	1	2	3	4	5	6	
1	1·120	0·8929	1·00000	1·12000	1·000	0·893	1
2	1·254	0·7972	0·47170	0·59170	2·120	1·690	2
3	1·405	0·7118	0·29635	0·41365	3·374	2·402	3
4	1·574	0·6355	0·20923	0·32923	4·779	3·037	4
5	1·762	0·5674	0·15741	0·27741	6·353	3·605	5
6	1·974	0·5066	0·12323	0·24323	8·115	4·111	6
7	2·211	0·4523	0·09912	0·21912	10·089	4·564	7
8	2·476	0·4039	0·08130	0·20130	12·300	4·968	8
9	2·773	0·3606	0·06768	0·18768	14·776	5·328	9
10	3·106	0·3220	0·05698	0·17698	17·549	5·650	10
11	3·479	0·2875	0·04842	0·16842	20·655	5·938	11
12	3·896	0·2567	0·04144	0·16144	24·133	6·194	12
13	4·363	0·2292	0·03568	0·15568	28·029	6·424	13
14	4·887	0·2046	0·03087	0·15087	32·393	6·628	14
15	5·474	0·1827	0·02682	0·14682	37·280	6·811	15
16	6·130	0·1631	0·02339	0·14339	42·753	6·974	16
17	6·866	0·1456	0·02046	0·14046	48·884	7·120	17
18	7·690	0·1300	0·01794	0·13794	55·750	7·250	18
19	8·613	0·1161	0·01576	0·13576	63·440	7·366	19
20	9·646	0·1037	0·01388	0·13388	72·052	7·469	20
21	10·804	0·0926	0·01224	0·13224	81·699	7·562	21
22	12·100	0·0826	0·01081	0·13081	92·502	7·645	22
23	13·552	0·0738	0·00956	0·12956	104·603	7·718	23
24	15·179	0·0659	0·00846	0·12846	118·155	7·784	24
25	17·000	0·0588	0·00750	0·12750	133·334	7·843	25
26	19·040	0·0525	0·00665	0·12665	150·334	7·896	26
27	21·325	0·0469	0·00590	0·12590	169·374	7·943	27
28	23·884	0·0419	0·00524	0·12524	190·699	7·984	28
29	26·750	0·0374	0·00466	0·12466	214·582	8·022	29
30	29·960	0·0334	0·00414	0·12414	241·332	8·055	30
31	33·555	0·0298	0·00369	0·12369	271·292	8·085	31
32	37·582	0·0266	0·00328	0·12328	304·847	8·112	32
33	42·091	0·0238	0·00292	0·12292	342·429	8·135	33
34	47·142	0·0212	0·00260	0·12260	384·520	8·157	34
35	52·799	0·0189	0·00232	0·12232	431·663	8·176	35
40	93·051	0·0107	0·00130	0·12130	767·088	8·244	40
45	163·987	0·0061	0·00074	0·12074	1358·224	8·283	45
50	289·001	0·0035	0·00042	0·12042	2400·008	8·305	50
∞				0·12000		8·333	∞

DİZİN

A

A/O prosesi, 244, 245, 247, 249
A2/O prosesi, 246, 247, 248
Açık kanallar, 25, 66, 67, 75, 82, 107
Adsorpsiyon, 171, 276, 288, 289, 291, 292, 296, 298, 469
Ağır metal, 344, 459, 468, 482, 488
Akı dengesi, 284
Akıllı Sensörler, 441
Akım saptırmalı baca, 72
AKR, 150, 151, 152, 214, 238, 241, 242, 244, 492
Aktif çamur, 13, 100, 107, 110, 113, 133, 135, 136, 137, 138, 145, 148, 149, 150, 224, 248, 258, 259, 263, 265, 272, 286, 345, 362, 390, 437, 440, 470, 471, 472, 473, 496, 500, 501, 563
Aktif karbon adsorpsiyon kapasitesi, 294
Akustik esaslı debimetre, 25, 28
Alg, 16, 166, 167, 262, 350
Alkali stabilizasyonu, 366
Alkalinite, 17, 137, 231, 237, 270, 329, 330, 334, 336, 338, 346, 368
Ana Sunucu, 450
Ana Terminal Birimi, 450
Anaerobik prosesler, 314, 318, 328
Anapara, 420, 513
ANITA™Mox Prosesi, 241
Ani akıtma yöntemi, 45
Ardışık kesikli reaktör, 151, 214, 238, 239, 244
Arıtılmış su akısı, 282, 283
Aritmetik Artış, 5
Arsenik, 346, 396, 477, 485, 488
Asbestli çimento boru, 61, 62
Asidik ön-arıtma, 372
Askıda büyüyen, 133, 161
Askıda katı madde, 17, 327
Atık stabilizasyonu, 135
Atıksu, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 12, 18, 19, 23, 25, 46, 47, 49, 76, 80, 82, 83, 88, 89, 93, 94, 95, 97, 99, 103, 104, 108, 116, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 129, 130, 137, 150, 151, 153, 155, 158, 160, 166, 169, 180, 188, 195, 197, 198, 199, 201, 202, 203, 204, 211, 218, 230, 231, 233, 236, 250, 255, 257, 258, 266, 287, 293, 298, 309, 311, 324, 327, 330, 334, 336, 338, 341, 346, 349, 356, 359, 365, 392, 395, 398, 401, 414, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 425, 427, 428, 429, 431, 432, 434, 437, 440, 443, 458, 459, 463, 465, 468, 471, 472, 473, 474, 475, 478, 485, 489, 495, 504, 505, 507, 548, 563
Azot giderimi, 182, 232, 247, 249, 263

B

BABE prosesi, 238
Bakır, 62, 138, 331, 346, 396, 412, 413, 486, 487, 488
Bakiye, 443
Bakteri, 124, 166, 315
Bant elek, 91
Bant filtre, 356, 363, 364, 382, 383, 428, 571
Bardenpho prosesi, 233, 246, 247, 248, 426
Baryum, 485, 488
Basınçlı borular, 25, 26, 63, 82
Basit Faiz, 513
Besi maddesi, 136, 166, 221, 312, 334, 336, 344, 395
Bileşik Faiz, 513
Birinci kademe arıtma, 428
Biyobozunma, 489
Biyogaz, 321, 334
Biyoinhibisyon, 500, 501
Biyokütle, 131, 189, 203, 224, 226, 231, 235, 237, 256, 312, 313, 317, 318, 326, 327, 328, 443, 493, 499
Biyolojik arıtma, 14, 123, 125, 130, 132, 135, 139, 140, 148, 152, 188, 221, 236, 263, 341, 350, 466, 470, 474, 493
Biyolojik Dezentegrasyon, 373
Biyolojik kuleler, 157, 158
Biyolojik Tıkanma, 276
Borulama, 81, 452
Bugünkü Değer Metodu, 420
Bulanıklık, 265

C

Cıva, 346, 396, 487, 488

Ç

Çamur biriktirme lagünleri, 385
Çamur geri devirli havalı lagünler, 165
Çamur keki, 383, 408
Çamur kurutma yatakları, 384, 385
Çamur terfi merkezi, 563, 568
Çamur üretimi, 136, 271, 334, 417, 485
Çekvalf, 73
Çinko, 138, 331, 346, 396, 412, 413, 488
Çökelme hızı, 93, 334
Çözünmüş karbondioksit, 130
Çözünmüş madde akısı, 282
Çözünmüş oksijen, 130, 238, 241, 443
Çubuk ızgara, 23, 89, 90
Çürütme tankı, 202, 203, 205, 207, 211, 212, 214, 215, 217

D

Dağıtılmış Kontrol Sistemleri, 441
Dağıtım yapısı, 553
Dairesel (Vorteks akımlı) kum tutucu, 94, 95
Dairesel çökeltim tankı, 100
Damlatmalı filtreler, 133, 153, 154, 160, 227, 228
DeAmmon, 241, 242
Deamonifikasyon, 239, 243
Debi, 8, 9, 19, 24, 25, 28, 29, 37, 42, 76, 77, 80, 84, 91, 96, 97, 187, 190, 193, 199, 235, 283, 334, 336, 409, 426, 442, 453, 454, 463, 507, 508, 545
Değişken akım, 51, 52

Değişken giderler, 528, 529
Değişken Hızlı Sürücüler, 452
Dekantör, 365, 506
Demir, 124, 138, 203, 222, 270, 271, 307, 331, 345, 346, 361, 379, 396, 483, 485, 486
Dengeleme, 96, 97, 98, 465, 471, 472, 506, 508
Denitrifikasyon, 134, 135, 160, 161, 171, 175, 230, 231, 234, 240, 255, 256, 263, 268, 350, 425, 471
Denitrifikasyon XE "Denitrifikasyon" filtreleri, 268
Denitritasyon, 236, 237, 238
Dezenfeksiyon yan ürünleri, 277
Dezentegrasyon, 371, 372, 375
Difüzör, 117
Dikdörtgen kanal, 34, 67
Dikdörtgen ön çökeltim tankı, 100
Dikdörtgen savak, 40, 41, 42, 85
Dinamik viskozite, 107
Diyafram vana, 72
Doluluk oranı, 78
Döner biyodiskler, 133, 158, 159, 228, 229
Döner fırın, 391, 392
Döner tambur yoğunlaştırıcı, 364
Döngü Kontrolörleri, 441
Durum İzleme Sistemleri, 451
Düzenli depolama, 398

E

Eklenik ihtimal, 9
Elek, 90, 91, 96, 269, 304, 308
Elektrokoagülasyon, 304, 305, 306, 307, 308
Elektrolit, 305
Emülsiyon, 476, 480
Endüstriyel atıksu, 18, 89, 93, 96, 100, 123, 188, 300, 312, 326, 401, 459, 461, 462, 467, 468, 472, 477, 481, 482, 486, 488, 491, 504, 505
Enerji, 50, 53, 54, 108, 120, 124, 125, 139, 153, 165, 223, 321, 346, 375, 378, 417, 418, 421, 423, 434, 487, 506, 529
Enerji çizgisi, 50
Enerji denklemi, 53
Enerji kullanımı, 423
Enstrüman, 452, 455
Enstrümantasyon, 452
Eşdeğer nüfus, 7, 19, 250, 354, 420
Eşdeğerlilik, 513
Evsel atıksu, 11, 16, 17, 19, 120, 123, 129, 130, 148, 152, 154, 162, 163, 198, 222, 261, 333, 334, 366, 382, 392, 393, 394, 403, 417, 504

F

F/M, 137, 138, 139, 143, 145, 147, 150, 151, 189, 227, 229, 286, 328, 334, 493, 496
Faiz, 513, 514, 517, 519, 520, 522, 523, 524, 525, 526, 527
Faiz Oranı, 513
Faiz Periyodu, 513
Fakültatif havalandırmalı lagünler, 164
Fiziko-kimyasal arıtma, 471
Flok yükü, 492
Flokülasyon, 108, 469, 480, 484
Florür, 486
Foseptik, 345
Fosfor giderimi, 123, 135, 182, 247, 270, 271, 272, 422
Fransız tipi YSA, 214

G

GAC Temas Reaktörü, 294
Geometrik Artış, 5, 6
Geri kazanım, 282
Geri tepme klapesi, 73
Granüler filtrasyon, 265, 266, 268
Güç ihtiyacı, 107
Gümüş, 487

H

Hareketli elek, 91
Hava debisi, 117
Havalandırma, 13, 82, 84, 85, 86, 114, 115, 116, 117, 120, 133, 136, 137, 140, 145, 146, 150, 154, 188, 189, 242, 255, 338, 339, 359, 388, 425, 438, 443, 496, 506, 509, 535, 546, 547, 548, 566, 567
Havalandırmalı kum tutucu, 82, 93, 94
Havalandırmalı lagünler, 133, 161, 162, 163, 462, 470
Havasız arıtma, 311, 312, 313, 315, 316, 320, 322, 326, 328, 329, 330, 331, 333
Havasız reaktör, 321, 322, 325, 327
Hız gradyanı, 110
Hızlı karıştırma, 108
Hidrolik bekletme süresi, 162, 168, 192, 244, 247, 258, 259, 311, 333, 334, 337
Hidrolik kalış süresi, 93, 210
Hidrolik profil, 49, 81, 83
Hidrolik yarıçap, 49, 62, 66
Hidrolojik karakteristikler, 202
Hurda Değeri, 523, 524, 525

I

I/O Sistemleri, 441
Imhoff tankı, 210, 214, 215, 216, 218, 219, 328
Islak çevre, 50
Islak hazneli terfi merkezleri, 104
Islak kesit, 49
Izgara, 82, 89, 90, 91, 117, 208, 251, 252, 253, 345, 352, 390, 535, 536, 537, 554
Izgara yaklaşım kanalı, 89, 90, 536

İ

İçme suyu, 278, 279, 280, 341, 385
İkinci kademe arıtma, 107, 149
İleri atıksu arıtımı, 264, 265
İletişim Hatları, 450

İlk (mekanik) arıtma, 89
İller Bankası, 2, 3, 5, 6, 47
İnce Izgara, 91
İnert, 11, 14, 326, 480, 495, 500
İyon değiştirme, 299
İyon konsantrasyonu, 301

K

Kaba ızgara, 24, 89, 90, 91, 252, 535, 536, 537, 538, 563
Kadmiyum, 346, 396, 412, 413, 485, 488
Kalaylı boru, 62
Kapitalize Değer, 522
Karbon oksidasyonu, 224, 226, 232, 233
Kargir, 206
Karıştırma, 98, 107, 108, 109, 110, 116, 120, 162, 364, 378, 405, 471
Katı madde yükü, 144
Kaynakta arıtım, 466
Kelebek vana, 72
Kırılma noktası, 263, 294
Kırsal, 2, 214
Kısmi nitritasyon, 240, 241, 243
Kimyasal çöktürme, 345, 352, 471
Kimyasal destekli ön çökeltim, 101
Kimyasal Dezentegrasyon, 372
Kinematik viskozite, 50, 77
Kireç, 262, 263, 270, 271, 272, 332, 350, 365, 366, 379, 383, 474, 479, 480, 482, 484, 485
Kirlilik yükü, 198
Klorlama, 82, 440, 535, 538, 539
Koagülant, 102, 478, 482
Koagülasyon, 469, 477, 478, 480
Koliform, 17, 163
Kompost, 345
Kompostlaştırma, 356, 378, 380, 381, 395
Konsantrasyon polarizasyonu, 276
Kontrolör, 435
Konvansiyonel ön çökeltim, 102
Krom, 346, 396, 412, 413, 482, 483
Kum tutucu, 24, 82, 92, 93, 99, 253, 535, 553, 554
Kurşun, 62, 346, 396, 412, 413, 486
Kuru hazneli terfi merkezleri, 104
Kurutma, 385, 388, 391, 411, 412, 484
Küçük arıtma sistemleri, 197
Küresel vana, 73
Kütle Transfer Bölgesi, 293, 298

L

Laminer akım, 49, 53
Lojistik Eğri, 5

M

Makro besi maddeleri, 331
Makroretiküler reçineler, 301
Maksimum debi, 6, 252
Maliyet, 114, 187, 421, 429, 434, 524, 529, 532
Mangan, 138, 331, 346, 486
Mantar, 124
Medyan, 346
Mekanik Dezentegrasyon, 371
Mekanik havalandırıcılar, 96, 118, 119, 120
Mekanik iletim, 436
Mekanik susuzlaştırma, 382
Membran, 152, 153, 187, 274, 275, 276, 277, 278, 281, 283, 284, 323, 443
Membran biyoreaktörler, 152
Metal tuzları, 263, 271, 345
Metan, 312, 313, 314, 317, 337, 339, 368
Metanol, 230, 231, 236, 423
Mezofilik, 130, 320
Mikro besi maddeleri, 331
Mikrobiyal çoğalma, 128
Mikrobiyal ölüm, 128
Mikroelek, 263
Mikrofiltrasyon, 275, 277
Mikroorganizma, 138, 166, 189, 222, 230, 235, 240, 243, 318, 378, 406
Minimum debi, 4, 7, 77, 543, 546, 548, 551, 553
MLE prosesi, 232, 238
Molekül geometrisi, 288
Mono pompa, 350, 352, 356
Moody diyagramı, 57, 58, 59, 60, 63

N

Nakit akış diyagramı, 517, 522, 525
Nakit Akışı, 513
Nanofiltrasyon, 275, 278
Net basınç, 283
Net Bugünkü Değer, 521
Net dönüşüm oranı, 188, 235
Net spesifik mikrobiyal çoğalma hızı, 128
Nikel, 331, 346, 396, 412, 413, 482, 487, 488
Nitrifikasyon, 133, 134, 135, 139, 144, 150, 154, 159, 160, 161, 163, 171, 175, 176, 223, 224, 225, 227, 228, 231, 232, 249, 255, 256, 265, 350, 376, 421, 471, 498
Nitritasyon, 237, 238
Nominal Faiz, 514
Normal dağılım, 9

O

Oksidasyon hendeği, 134, 151, 226, 232, 233, 234
Oksijen transferi, 111, 112
Olgunlaşma havuzları, 168, 169
Organik madde, 11, 15, 133, 139, 230, 278, 286, 316, 341, 345, 394, 471, 488, 497
Orifismetre, 25
Ortalama debi, 6, 191, 334
Ozonlama, 286

Ö

Öğütücü, 90, 91, 92
Ökaryotik, 123, 124
Ön çökeltim, 82, 98, 99, 100, 101, 149, 166, 182, 190, 535, 549, 550, 551, 556, 568
Ön-çökeltim çamurları, 376, 382
Özgül enerji, 51

P

P&ID, 452, 455, 507
Palmer-Bowlus savağı, 37, 38, 442
Paranın Gelecekteki Değeri, 513
Paranın Zaman Değeri, 513
Parshall kanalı, 31, 32, 33, 34, 533, 553
Parshall savağı, 442, 535
Pastörizasyon, 380
Patojen, 134, 171, 376
PhoStrip prosesi, 245, 246, 249
Pıhtılaştırıcı, 102
Pik debi, 7, 80, 94, 95, 334
Piyozometre, 50
Polimer, 266, 271, 272, 348, 363, 364, 365, 379, 423
Pompa, 23, 103, 104, 105, 106, 352, 353, 355, 429, 538, 563, 568, 571
Pompa çeşitleri, 106
Pompa istasyonu, 23, 538
Pompa verimi, 104, 105
Pozitif yer değiştirmeli üfleyiciler, 118
Pres filtre, 379, 383, 384
Programlanabilir Kontrolörler, 441
Prokaryotik, 123, 124
Proses, 14, 108, 134, 139, 143, 145, 147, 150, 226, 230, 231, 238, 239, 241, 266, 312, 327, 331, 332, 417, 418, 419, 435, 437, 441, 445, 465, 471, 556, 566
Protozoa, 17, 124
Pünomatik, 436
Pürüzlülük, 63, 67

R

Reaksiyon kinetiği, 126
Reel Faiz, 513
Renk, 201, 286, 307, 459, 482, 508

S

Sabit akım, 51
Sabit giderler, 528
Saha Donanımı, 450
Sakrofilik, 130
Santrifüj, 93, 104, 106, 117, 118, 348, 350, 364, 379, 382, 383, 409
Savak, 25, 31, 38, 39, 42, 43, 82, 84, 100, 101, 136, 163, 542, 546, 548, 551, 553
SCADA, 441, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 458
Selenyum, 138, 331, 346, 396, 487, 488
Serbest yüzey akışlı, 169, 178
Sertlik, 276, 402
SHARON prosesi, 238, 239
SHARON-ANAMMOX, 241, 243
Sıcaklık, 50, 119, 129, 130, 154, 162, 163, 190, 231, 235, 238, 241, 275, 289, 308, 328, 329, 333, 334, 336, 367, 374, 376, 436, 442, 453, 454, 504, 507, 510
Sızma debisi, 7
Solar kurutma, 387, 388
Son çökeltim, 84, 133, 135, 136, 144, 145, 146, 158, 235, 236, 245, 506, 508, 535, 543, 552, 555, 566, 568
Sonikasyon, 371
Sorpsiyon, 489
Sönmemiş kireç, 365
Stabilizasyon, 130, 166, 214, 226, 365, 418, 420
Standart sapma, 473
Substrat, 127, 131, 142, 189, 231, 235, 237, 318, 319, 375
Susuzlaştırma, 380, 381, 382, 408, 411
Sülfat, 17, 138, 262, 322, 479, 485, 488, 507
Sürekli beslemeli havalı lagünler, 164
Sürekli enjeksiyon yöntemi, 45
Sürekli yük kaybı, 67, 355, 554, 562, 569, 571
Süreklilik denklemi, 52, 56
Sürgülü vana, 72
Süzüntü, 408

Ş

Şartlandırma, 363, 378, 382, 506

T

Tank şekli, 115, 117
Tasarım kriterleri, 162
Taşkın, 45
Tekil ödeme, 519
Teorik oksijen ihtiyacı, 144
Terfi (Basma) Yüksekliği, 104
Terfi merkezi, 568
Termal bertaraf, 396
Termal kurutma, 356, 386
Termofilik, 130, 322, 328, 367
Termo-Kimyasal Dezentegrasyon, 373
Termo-Mekanik Dezentegrasyon, 374
Ters Osmoz, 278
Toplam katı madde, 17
Toplam koliform, 198, 208
Toplam organik karbon, 17, 443
Toz Aktif Karbon, 296
Transmiter, 435
Trapez kanal, 35, 36
Trapez savak, 43
Türbinmetre, 25, 28
Türbülanslı akım, 49, 50, 53

U

U kanal, 31, 34, 35, 36, 37
UCT prosesi, 246, 248
Ultrafiltrasyon, 263, 275, 277
Ultrason, 374, 442
Uzak Terminal Birimleri, 450

Ü

Üçgen savak, 42, 44, 84, 545
Üçüncül arıtma prosesleri, 466
Üfleyici, 114, 115, 118
Üniform Ödeme Değeri, 513

V

Varlık Yönetim, 445, 451
Venturi, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 46, 51, 107, 392
Verim, 118, 129, 143, 327
VIP prosesi, 246, 248, 249, 425

Y

Yağış şiddeti, 80
Yakma, 321, 348, 381, 382, 388, 389, 390, 392, 396, 399
Yakma fırını, 390
Yan ürün, 464
Yanma, 389, 392, 453, 454
Yanma XE "Yanma" gazları, 392
Yapay sulak alanlar, 169, 172, 214, 418
Yatay hız, 93
Yerinde arıtma, 198
Yersel yük kaybı, 547, 553, 559, 562, 569, 571
Yıllık eşdeğer maliyet, 523
Yoğunlaştırma, 341, 359, 360, 377
Yük kaybı, 50, 54, 55, 71, 104, 269, 539
Yüzdürme, 99, 110, 428, 471
Yüzey aktif maddeler, 262
Yüzey yükü, 100, 144, 210
Yüzeyde büyüyen, 135
Yüzeysel akış, 5

Z

Zor ayrışan, 13