



MM-303

MAKİNE ELEMANLARI-I DERS NOTLARI

KAYNAK KİTAPLAR

Akkurt M., Makine Elemanları I-II, **Birsen yayınları**
Babalık F.C, Çavdar K., Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, **Dora yayınları**
Babalık F.C, Çavdar K., Makine Elemanları Çözümlü Problem Kitabı, **Dora yayınları**
Kurbanoglu, C., Makine Elemanları, **Nobel Yayınları**
Budynas R.G., Nisbett J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design
Prof. Dr. Süleyman Taşgetiren, Makine Elemanları I, Ders Notları
Prof. Dr. Akgün Alsaran, Makine Elemanları I, Ders Notları
Prof. Dr. Gençaga Pürçek, Metalik Malzemeler Uygulanan Mekanik Deneyler, Ders Notları

SINAVLAR VE DEĞERLENDİRME

Bir ara sınav (vize), bir yılsonu sınavı (final) yapılacaktır. Ara sınavın başarı notuna katkı oranı %40, yılsonu sınavının başarı notuna katkı oranı %60'tır.

Öğr.Gör. Erdar KAPLAN

1. GİRİŞ

Dersin amacı: Makine mühendisi olacak öğrencilere, makine elemanlarının (dişli çarklar, kayış kasnak mekanizmaları, rulman, cıvata, kavrama, kavrana, kaynak, lehim, perçin, keçe vb) tasarımı için gerekli kabiliyetleri kazandırmak, makine elemanlarının birbirleriyle olan ilişkilerini kavratmak, makine tasarımında hayal güçlerini, yaratıcılık ve öngörülerini geliştirmek, tecrübe kazandırmak ve bunları projelendirmektir.

Dersin içeriği:

- ❖ Konstrüksiyon Malzemelerinin Özellikleri; Malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespiti, Makine tasarım malzemeleri, malzemelerin mekanik deneyleri
- ❖ Makine elemanlarında hasarlar (Gerilme analizi, emniyet analizleri, mukavemet hesapları)
- ❖ Mühendislik malzemelerinde yorulma, Yorulma ömrü (Sonlu ömür, Sonsuz ömür,)Yorulma diyagramları,
- ❖ Bağlama elemanları (kaynak, perçin, lehim, mil göbek, cıvata bağlantıları)

1. TEMEL BİLGİLER

Makine, enerji, veya güç üreten, ileten, değiştiren veya biriktiren sistemlerdir. Kuvvet makineleri ve iş makineleri olmak üzere iki ana grupta toplanır.

Kuvvet makineleri, iş ve enerji üretmek amacıyla icat edilmiş, bir enerji kaynağı tarafından tahrik edilen; enerji kaynağı olmadan iş üretemeyen makinelerdir.

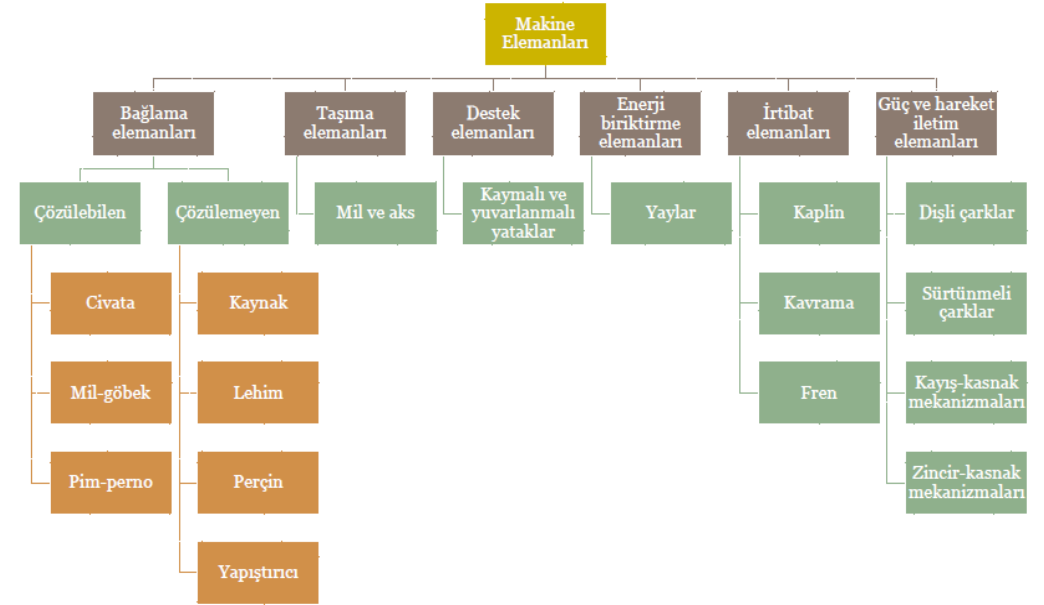
İş makineleri, iş yapmak amacıyla imal edilen ve kuvvet makineleri tarafından tahrik edilen, kuvvet makineleri olmadan iş üretemeyen makinelerdir.

Bir makineyi oluşturan her türlü yapı elemanına **makine elemanları** denir. Makine elemanı basit bir parça olabileceği gibi birçok parçanın birleşmesinden meydana gelebilir. Herhangi bir parçanın makine elemanı olabilmesi için;

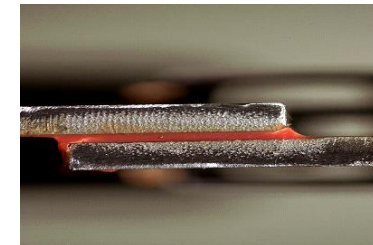
- ❖ Belirli bir fonksiyonu yerine getirmesi
- ❖ Ayır bir hesaplama ve şekillendirme prensibine sahip olması gerekir.

Makine elemanları bilimi, makineleri oluşturan yapı elemanlarının tasarım hesaplama ve şekillendirme prensiplerini inceleyen bir bilim dalıdır.

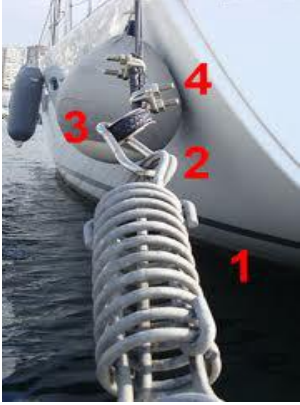
Makine elemanlarının ana konuları, bağlama elemanları, taşıma elemanları, destek elemanları, enerji biriktirme elemanları, irtibat elemanları, güç ve hareket iletim elemanlarıdır.



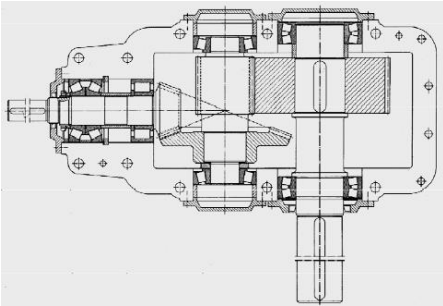
Bağlama elemanları, iki veya daha çok elemanı birbirine veya makineleri temele bağlayan elemanlardır. Bunlara kaynak, lehim, yapıştırma, perçin, cıvata, pim, perno, kama, mil, sıkı geçme bağlantıları örnek olarak verilebilir. Bu elemanların dayanımları, kullanım şekilleri ve maliyetleri birbirinden farklıdır. Kullanılacağı yere göre, kullanım amacına bağlı olarak istenilen bağlama elemanı seçilir. Kaynak, lehim ve perçin gibi bazı bağlama elemanları kullanıldıktan sonra sökülüp bir daha kullanılamazlar. Ama cıvata gibi bazı bağlama elemanlar takılıp sökülüp tekrar tekrar kullanılabilirler.



Mekanik enerji biriktirme elemanları, belirli bir enerjiyi şekil değiştirme ile biriktiren ve bunu istenildiği durumda geri veren elemanlardır. Örneğin yaylar; Yaylar mekanik enerji biriktirme elemanlarıdır. Yaylar, kendilerine bir kuvvet uygulandığında şekil değiştirerek bu kuvveti depolama ve kuvvet kaldırıldığında bu kuvvetleri geri verebilme özellikleri vardır.

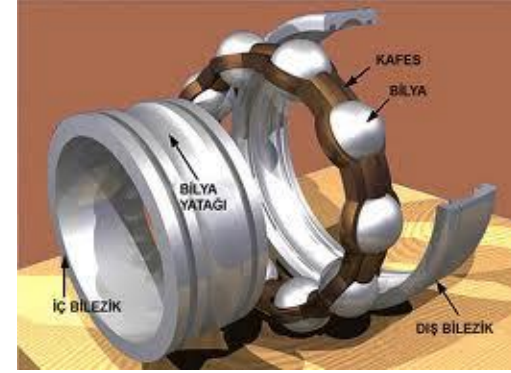


Taşıma elemanları, dişli çark, kasnak, volan gibi silindirik dönel elemanları taşıyan elemanlardır. Örneğin mil, aks bağlantıları; Akslar dönmekte olan elemanları sadece taşırlar. Aksların kuvvet iletme görevleri yoktur. Miller ise hem bu elemanları taşırlar, hem de birinden diğerine bir kuvvet aktarırlar. Bu nedenle akslarda sadece bir eğilme momenti meydana gelir. Millerde ise yaptıkları görev nedeniyle hem eğilme momenti hem burulma momenti meydana gelir.



Destekleme elemanları, genellikle hareket halindeki elemanları desteklemek amacıyla kullanılır. Örneğin kaymalı yataklar; Bir milin yüzeyi üzerinde kayarak dönmesini sağlayan

elemanlara kaymalı yatak denir. Kaymalı yatakta birinci amaç mil ile yatak arasında kalın bir yağ filmi oluşturarak metalin metale temasını engellemek, böylece sürtünme yi düşürmek ve aşınmayı ortadan kaldırmaktır.



İrtibat elemanları, iki eleman arasında genellikle eksenel yönden irtibat sağlayan elemanlardır. Örneğin kaplin ve kavramalar; Kavramalar, aynı doğrultu üzerinde dönmekte olan iki mil arasındaki hareket bağlantısını kesmek yada birinin hareketini öbürüne iletmek için kullanılan elemanlardır.



Güç ve hareket iletim elemanları, makinenin esas fonksiyonunu yerine getiren ve makinenin güç kaynağından iş kısmına doğru enerji akışını sağlayan elemanlardır. Örneğin dişli çark, kayış kasnak mekanizmaları, zincir bağlantıları;



Konstrüksiyon Nedir?

Konstrüksiyon, herhangi bir teknik sistemin belirlenmesi, uygulanacak fiziksel prensiplerin saptanması, bu prensipleri sağlayan elemanların seçimi, bunların montaj ve parça resimlerinin hazırlanmasına kadar geçen bütün faaliyetleri kapsamaktadır.



Makine Tasarımı?

Makine Tasarımı, mekanik tabiatlı eşya veya sistemlerin (makine, ürün, yapı, cihaz) tasarımı demektir. Makine tasarımında pek çok parça için malzeme, matematik, analiz ve mühendislik matematiği kullanılır. Makine tasarımı bütün mekanik tasarıma ihtiva eder.

Tasarım yapmak, belirli bir ihtiyacı karşılayacak bir plan formüle etmek veya bir problemi çözmektir. Eğer bu plan fiziksel bir realite ortaya çıkaracaksa yani bir ürün elde edilecekse, bu ürün aşağıda belirtilen özellikleri taşımalıdır:

- ❖ **Fonksiyonel:** Ürün belirtilen ihtiyacı gidermeli ve müşteriye memnun etmelidir.
- ❖ **Emniyetli:** Ürün çevreye, kullanıcıya zarar vermemelidir.
- ❖ **Güvenilir:** Belirlenen süre zarfında ürün kendisinden beklenen fonksiyonları yerine getirmelidir.
- ❖ **Rekabetçi:** Ürün piyasada bir yarışçıdır.
- ❖ **Kullanılabilirlik:** Ürün kullanıcı dostu olmalıdır.
- ❖ **Üretilirlik:** Ürün minimum parça sayısına sahip olmalı, seri üretime uygun olmalı

- ✓ **Pazarlanabilirlik:** Ürün, hedef kitlenin alım gücüne uygun olmalı,

Bir mühendislik tasarımına başlayabilmek için mühendisin önünde çözülmesi gereken somut bir sorun bulunmalıdır. Sorun ve gereksinim ortaya konulduktan sonra tasarımcı tasarım sürecinde belli başlı üç etkinlikte bulunur. Yaratıcılık, Karar verme, Modelleme

Yaratıcılık; Tamamen bir zihinsel etkinliktir.

Karar verme; Tasarım sürecinde çeşitli aşamalarda ortaya çıkan seçenekler ve yöntemler arasında en uygun olanını seçmektir.

Modelleme; Mühendislik bilgi birikiminin hesaplama yöntemleri ile tasarıma uygulanması

Tasarımda Ekonomiklik

Tasarımda ekonomiklik oldukça önemlidir ve kimi mühendislik tasarımlarında, tasarımın elde edilmesi için, harcanan zamandan daha fazla bir zaman o tasarımının maliyet analizleri için harcanmaktadır. Maliyeti azaltmanın ilk prensibi standart ve piyasada bulunan elemanları, boyutları veya geometrileri kullanmaktır.

2. KONSTRÜKSİYON MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ

2.1 MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Malzemelerin kuvvet altında göstermiş oldukları davranışlara ve davranışlardan elde edilen özelliklere **mekanik özellikler** denilir. Bu özellikler mühendise, makine parçasının boyutu şekli ve üretim metodunu belirlemede yardımcı olur. Bununla birlikte, malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek ve yapılarıyla özellikleri arasında ilişkileri belirlemek için farklı mekanik deneyler yapılır. Yapılan mekanik deneyler içerisinde en yaygın olanı **çekme deneyidir**. Bunun nedeni ise çekme deneyi ile hem malzemelerin mekanik davranışları ile ilgili sonuçların elde edilmesi ve elde edilen sonuçların mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılmasıdır. Bazı mekanik ve fiziksel özellikler aşağıda açıklanmıştır.

Homojenlik: Malzeme özelliklerinin her noktada aynı olmasıdır. Özellikle metallerde homojenlik çok önemlidir. Çok küçük özellik farklılığı varsa, gerilme ve şekli değiştirme

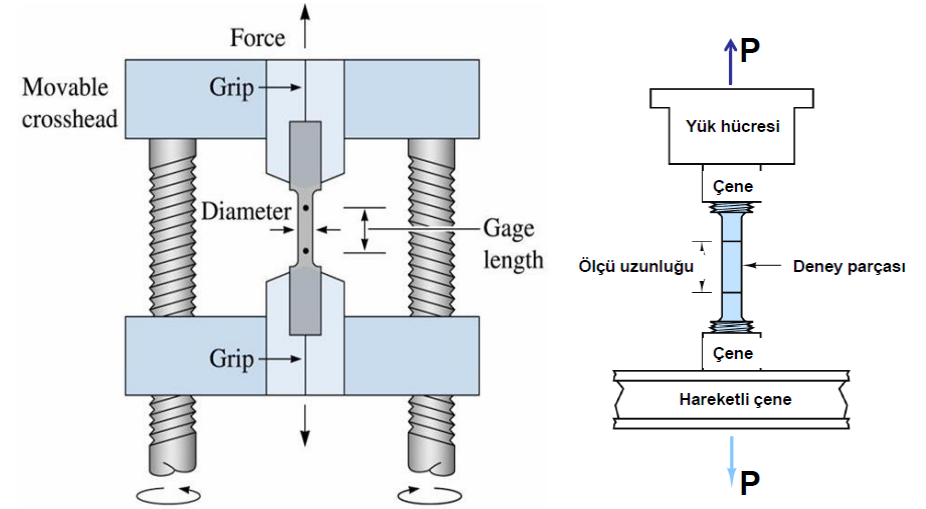
hesapları yapılırken malzeme homojen kabul edilir. Küçük bölgelerde özellik farklılıkları bulunsu da genel özellikleri homojen olan malzemelerde bu özelliklerine göre kullanılabilirler.

İzotropi: Malzemenin özellikleri yöne bağlı olarak değişmez ise bu malzeme izotropiktir. Malzemelerin gerilme ve şekil değiştirme hesapları bu kabul üzerine yapılır. Yönlere göre özellikleri farklılık gösteren malzemeler anizotropik malzemelerdir. Bu malzemeler bu özellikleri bilindiği durumlarda bir çok avantaja sahip olarak kullanılabilirler.

Çekme deneyi; Çekme deneyi, malzemelerin mukavemeti hakkında esas tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemeleri özelliklerine göre sınıflandırmak amacıyla yapılır. Çekme deneyi, standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir çekme hızında ve sabit sıcaklıkta koparıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standartlara göre hazırlanan çekme numunesine uygulanan kuvvet ya da gerilme ile meydana gelen uzama değerleri kaydedilir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılırlar. Bu yüzden çekme deneyi en yaygın deney olarak kullanılan tahribatlı malzeme muayenesi yöntemlerinden birini oluşturur.

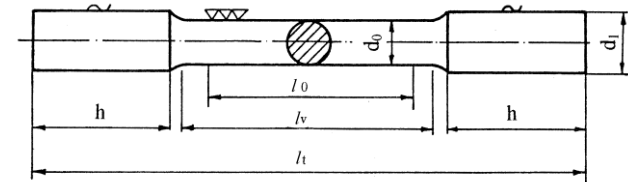
Çekme makinesi; Günümüzde çok gelişmiş, universal çekme-basma deneyi makineleri mevcuttur. Bu makineler hidrolik ve elektronik sistemlerle donatılmış ve değişik yükleme kapasitelerine sahiptir. Uygulanan yük ve meydana gelen uzama değerleri bilgisayarlar yardımıyla anında çizdirilebilmektedir. Bu makinelerde numune boyunda meydana gelen uzama, kontak tipi uzama ölçerlerin (**ekstansometer**) yanında son yıllarda geliştirilen non-kontak video uzama ölçerler (video extensometer) ile belirlenmektedir. Universal bir çekme makinesi Şekil 1'de gösterildiği gibi temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, deneyin gerçekleştirildiği elektro mekanik sistem, diğeri ise alınan verilerin işlendiği ve sonuçların elde edildiği veri işleme sistemidir. Elektromekanik sistem, numunelerin yerleştirildiği çeneler, uygulanan yükün algılandığı yük hücresi, meydana gelen uzamanın ölçüldüğü uzama ölçer (ekstansometre) ve hareketin sağlandığı mekanik sistemlerden oluşmaktadır. Veri işleme sistemi ise modern makinelerde bilgisayarlar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu

sistemde gelişmiş yazılımlar sayesinde, çekme deneyi ile elde edilebilecek bütün veriler toplanıp işlenebilmektedir.



Şekil 2.1 Çekme Deneyi Test Düzenegi

Çekme numunesi; Çekme deneyine tabi tutulacak numuneler, temsil ettiği malzemenin tüm özelliklerini taşımalıdır. Bu nedenle, **numunenin alındığı bölgenin, alınış ve hazırlanış şeklinin büyük önemi** vardır. Numune hazırlanırken, temsil ettiği malzeme özelliklerinde herhangi bir değişiklik oluşmamasına dikkat edilmelidir. Üretim sırasında **aşırı sıcaklık** oluşumu önlenmeli, ayrıca deformasyondan kaynaklanan etkilerde elimine edilmelidir. Çekme deneyine tabi tutulacak numunenin şekil ve boyutları standartlarda belirtilmiştir. Bu nedenle deney sonuçlarının güvenilirliği ve karşılaştırılabilir olması açısından deneyler standartlara göre hazırlanmış numuneler ile yapılmalıdır. Alınacak malzemeye göre çekme numunesinin kesiti, dairesel, kare, dikdörtgen ve halka şeklinde ve hatta bazı durumlarda özel profil şeklinde olabilir. Türk standartları, TS 138-A'da çekme numunelerini şekil ve boyutlarına göre standartlaştırmıştır.

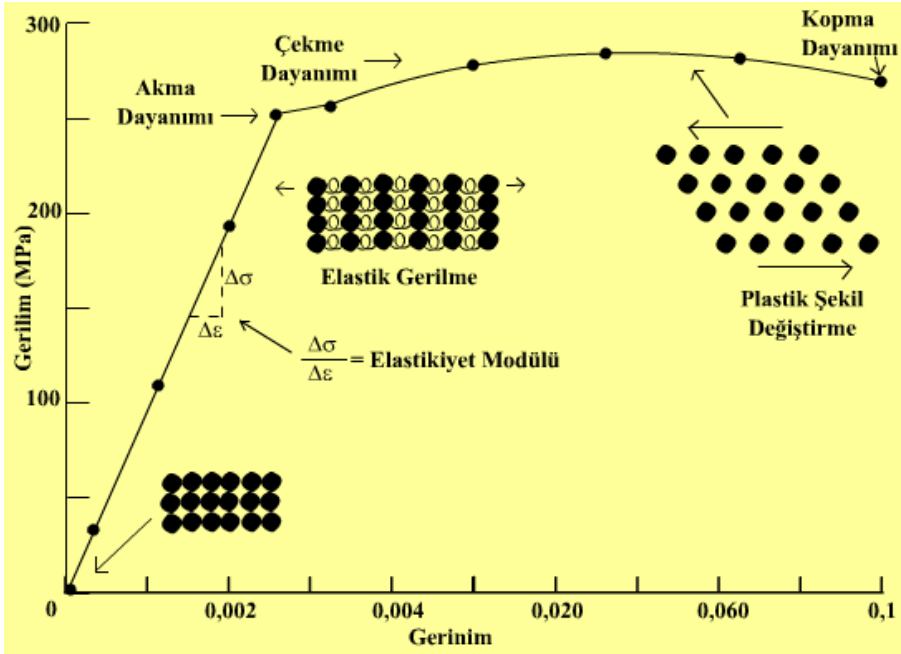


Şekil 2.2 Dairesel Kesitli Deney numunesi

Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki temel mekanik özellikler belirlenebilir.

- Akma gerilmesi (**Yield stress**)
- Çekme gerilmesi (**Tensile stress**)
- Kopma uzaması (**Elongation to failure**)
- Kesit daralması (**Reduction in cross-section**)
- Tokluk (**Toughness**)
- Elastisite modülü (**Elastic modulus**)
- Rezilyans (**Resilience**)

Çekme deneyi sonucunda **kuvvet (F -uzama (Δl))** eğrisi elde edilir. Ancak bu eğri ile birlikte kullanılan numunenin boyutlarını da vermek gerekir. Bu nedenle bu eğri yerine daha evrensel olan **gerilme-birim şekil değiştirme** eğrisi kullanılır. **Gerilme birim şekil değiştirme eğrisine çekme diyagramı adı da verilir.** Şekil 2.3'te normalize edilmiş durumdaki az (düşük) karbonlu bir çeliğin gerilme birim uzama eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.3 Düşük karbonlu bir çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramı örneği

Şekil 2.3'de çekme deneyi sonucunda elde edilen tipik gerilme-uzama diyagramları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, gerime-uzama diyagramı üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar, elastik deformasyon bölgesi, homojen plastik deformasyon bölgesi ve homojen olmayan plastik deformasyon bölgesidir. Elastik deformasyon bölgesinde gerilme-uzama eğrisi lineer bir değişim gösterir. Yani artan gerilme ile birlikte % uzama değeri de orantılı olarak artar. Bu aralıkta uygulanan gerilme kaldırılırsa yüzde uzama değeri sıfıra iner. Yani numune üzerinde kalıcı şekil değişimi oluşmaz. Bu bölgede “*Hooke Kanunu* ($\sigma=E.e$)” geçerli olup doğrunun eğimi malzemenin “*Elastisite Modülünü*” verir.

Uygulanan gerilme elastik bölgenin dışına çıktığında, malzeme plastik şekil değişimine uğramaya başlar ve homojen deformasyon bölgesine girer. Bu bölgede uygulanan gerilmeyle beraber harekete geçen dislokasyonlar kaymayı meydana getirir ve malzeme kalıcı olarak şekil değiştirir. Bu bölgede malzeme üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında, elastik şekil değişimi ortadan kalkarken, kaymanın neden olduğu plastik şekil değişimi ise kalıcıdır. Kaymanın başladığı nokta elastik ve plastik davranışı ayıran noktadır.

Çekme işlemine devam edildiğinde, öyle bir noktaya gelinir ki, malzemede plastik kararsızlık oluşur ve numunenin ölçü boyundaki herhangi bir noktada kesit büzülme başlar ve **numune boyun** verir. Bundan sonra kesit daralması nedeniyle deformasyon daha az bir kuvvetle devam eder ve bu bölge sonunda numune kırılır.

Çekme deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için gerilme-uzama diyagramını yakından incelemek ve meydana gelen mekanizmaları iyi bilmek gerekir.

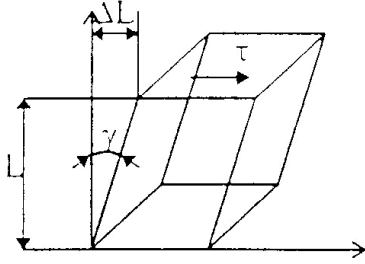
Elastik şekil değiştirme ve bu bölgede geçerli olan büyüklükler

Elastik deformasyon bölgesinde malzeme çok küçük yükler altındadır ve yük kaldırıldığında malzeme ilk şekline geri döner. Elastik deformasyon esnasında atomlar aralarındaki bağı koparmadan hareket ederler ve bu yer değiştirme miktarı uygulanan gerilme ile orantılıdır.

$$\text{Gerilme/deformasyon oranı=sabit}$$

Elastiklik: Elastiklik, malzemenin şeklini koruyabilmesi olarak tarif edilir. Malzemeye bir dış yük tatbik edildikten sonra yük kaldırıldığında malzeme eski şeklini alıyorsa malzeme elastik özellik gösteriyor demektir.

Elastisite modülü, malzemenin rijitliği ile ilgili bir değer olup, bu değer özellikle konstrüksiyon mühendisliğinde çok önemlidir.



Şekil 2.4 Kayma Gerilmesi

Eğer gerilmeler kayma şeklinde ise kayma gerilmesi ile elastik birim kayma arasında; $G = \tau / \gamma$ şeklinde bir ilişki vardır. Burada, G kayma elastisite modülü, τ kayma gerilmesi ve γ ise elastik birim kayma şekil değişimi olarak alınmaktadır. Elastisite modülü atomlar arası bağ kuvvetini temsil eder ve malzemenin rijitliğinin bir sonucudur. Bağ enerjisi yüksek olan malzemelerin elastisite modülü ve ergime sıcaklığı da yüksek olur. Elastisite modülü ne kadar büyükse malzemenin elastik uzaması da o ölçüde düşüktür rijitliği ise yüksektir. Aşağıdaki tabloda bazı malzemelerin elastisite modülü ve poisson oranları verilmiştir.

Tablo 1. Bazı malzemelerin Elastisite ve kayma modülü ile Poisson oranları

Malzeme	Elastisite Modülü (E) [GPa]	Kayma modülü (G) [GPa]	Poisson Oranı (ν)
Alüminyum	69	25	0.33
Pirinç	97	37	0.34
Bakır	110	46	0.34
Magnezyum	45	17	0.29
Nikel	207	76	0.31
Çelik	207	83	0.30
Titanyum	107	45	0.34
Tungsten	407	160	0.28

Elastisite Modülü: Orantı limitine kadar $\sigma - \epsilon$ diyagramındaki eğrinin eğimi olup çekme durumunda $E = \sigma / \epsilon$ 'a eşittir. Elastisite modülü başlıca, *kimyasal bileşim*, *soğuk deformasyon miktarı* ve *sıcaklıkla* değişir. Ayrıca yapı kusurları ve ferromanyetik özellikler de elastisite modülüne etki eder;

- Alaşım ilavesi ile eğer ergime noktası yükseliyorsa bu durumda elastisite modülünün de yükseleceği söylenebilir.
- Elastisite modülü anizotropik özellik gösteren malzemelerde veya soğuk deforme olmuş malzemelerde farklı kristalografik doğrultularda farklı değerler alabilir.
- Elastisite modülünün değeri artan sıcaklıkla azalır. Genellikle bu azalma ergime sıcaklığının yarısına kadar doğrusaldır. Bu noktadan sonra azalma artar. Ergime sıcaklığına yaklaşıldığında atomlar arası çekim kuvveti olmadığından, elastisite modülünün değeri sıfıra yaklaşır.
- Malzemenin dayanımının elastisite modülü üzerinde bir etkisi yoktur. Örneğin, sertleştirilmiş aynı bileşime sahip çeliğin sert ve yumuşak hallerinde aynı elastiklik modülü geçerlidir.

Poisson oranı; $\nu = -\frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{boyuna}}$ poisson oranının değeri metalik malzemelerde 0.25-0.32

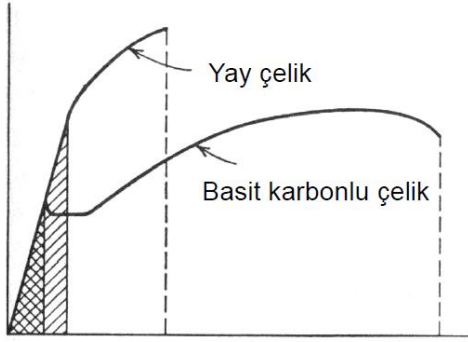
arasında değişmekte, ancak çoğunlukla 0.30 değerini almaktadır. Elastik büyüklükler arasında aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu söylenebilir.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Orantı sınırı: Çekme diyagramında Hooke yasasının, yani $\sigma = E \cdot \epsilon$ bağıntısının geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir. Başka bir deyişle, uygulanan gerilmenin elde edilen uzamayla orantılı olarak değiştiği, yani aralarında bir orantı katsayısının (E) bulunduğu bölgenin sınırına karşılık gelen gerilme değeridir

Elastiklik sınırı: Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman plastik uzamanın görülmediği veya yalnız elastik şekil değişiminin meydana geldiği en yüksek gerilme değeridir. Hassas olarak belirlenen bu sınırın orantı sınırından daha yüksek olmasına karşın, uygulamalarda genellikle elastik sınır orantı sınırına eşit kabul edilebilir.

Rezilyans: Bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimi yapan kuvvetin kalkmasıyla geri vermesi özelliğine rezilyans denir. Rezilyans, rezilyans modülü ile ölçülür ve çekme eğrisinin elastik sınıra kadar olan kısmı altında kalan alandır. Rezilyans modülü;



$$U_R = \frac{\varepsilon_e Re}{2} = \frac{Re^2}{2E}$$

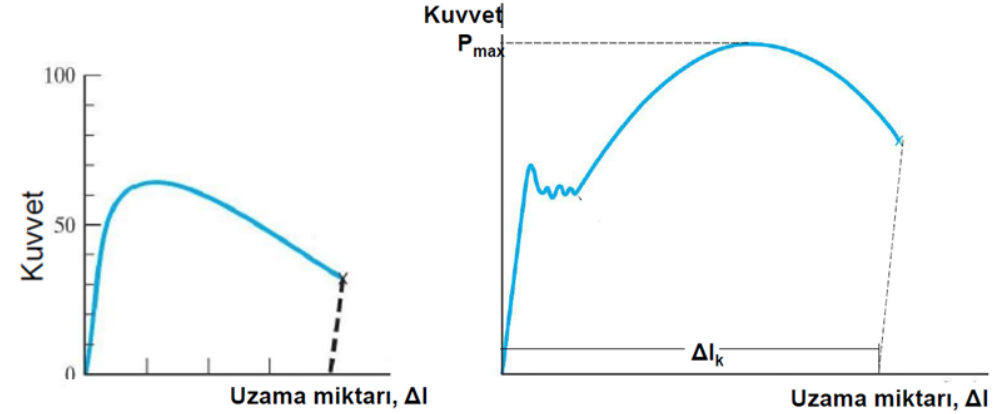
Şekil 2.5 Yay çeliği ve basit karbonlu bir çeliğin rezilyans modülü

Yukarıdaki şekilde orta karbonlu bir çelik ile yay çeliğinin rezilyans modüllerini veren bölgeler gösterilmiştir. Buna göre akma dayanımı yüksek olan yay çeliğinin rezilyansıda yüksektir.

Plastik Bölgede Ölçülen Büyüklükler

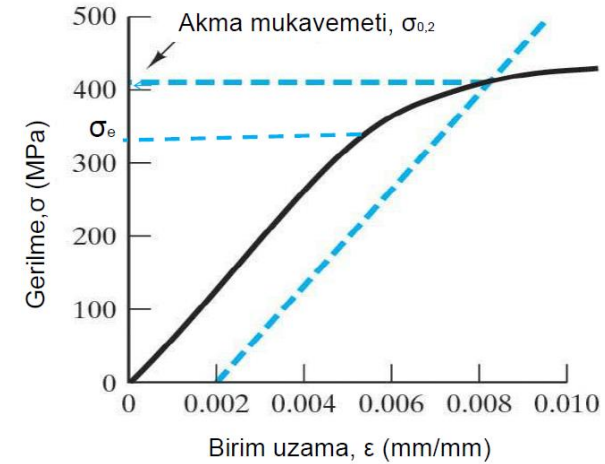
Akma gerilmesi (σ_a): akma dayanımı, kaymanın fark edilir ve etkili olduğu durumdaki gerilmedir. Düşük karbonlu çelikler gibi belirli bir şekilde akma gösteren malzemelerde akma gerilmesi akma yükünün (F_{akma}) numunenin orijinal kesit alanına bölünmesi ile bulunur. Bu tür malzemelerde kuvvetin ilk kez sabit kaldığı veya düşmeye başladığı gerilme, akma sınırı olarak alınır. Önemli bir gerilme düşüşü varsa o zaman alt ve üst diye ayırt edilen iki akma sınırı söz konusudur. Alt akma sınırı süreksizliklerin sona erdiği en küçük gerilmedir. Bu tip bir değişim daha çok ara yer atomu içeren malzemelerde görülür. Küçük ara yer atomları bu bölgede dislokasyonların etrafında kümeleşerek kaymayı engeller ve akma noktasını yükseltir (üst akma noktası). Kayma olayı başladıktan sonra dislokasyonlar küçük atom kümelerinden uzaklaşır ve daha düşük gerilme seviyelerinde (alt akma noktası) hızlı hareket etmeye devam eder. Bu bölge homojen olmayan deformasyonlarla birlikte

başlar ve gözle görülen Lüders bantları şeklinde bütün gövdeye yayılır. Bu tip gerilme-uzama davranışı sergileyen malzemelerde akma dayanımı kolaylıkla belirlenir.



Şekil 2.6 a) Belirgin akma noktası göstermeyen b) Belirgin akma noktası gösteren

Mühendislik malzemelerin çoğu bariz bir şekilde akma noktası göstermez. Bu durumda akma gerilmesi ise, mühendislik çekme diyagramı üzerinden, %0,2 kalıcı bir deformasyona neden olan kuvvetin numunenin orijinal kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Söz konusu kuvvetin belirlenmesi için, %0.2 kalıcı şekil değişimi noktası belirlenir ve bu noktadan gerilme-şekil değişimi eğrisinin elastik kısmına bir paralel çizilir. Bu paralelin gerilme-uzama eğrisini kestiği noktaya karşılık gelen gerilme değeri o malzemenin akma dayanımıdır.

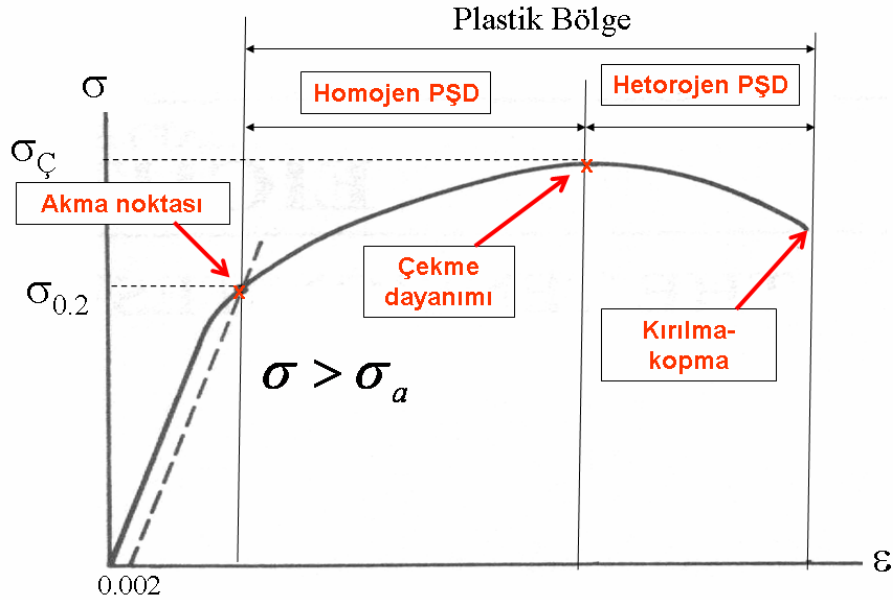


Şekil 2.7 Belirgin akma noktası göstermeyen bir numunenin Gerilme-uzama diyagramı

Akma dayanımı, mühendislik malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Dizayn mühendisliğinde, akma mukavemeti müsaade edilebilen maksimum sınırdır. Akma mukavemetinin üzerindeki değerler ise malzeme şekillendirme işlemlerinde kullanılır. Kullanım esnasında, uygulanan kuvvete dayanabilecek parçalar tasarlanıyorsa, parçanın plastik olarak şekil değiştirmedikten emin olunmalıdır.

Plastiklik: Bir malzemeye dış yük uygulandığında şekil değişimi olur ve yük kaldırıldığında malzeme eski şekline dönmeyiz ise malzeme plastik şekil değiştirmiş demektir. Buradaki şekil değişimi kalıcı şekil değişimidir.

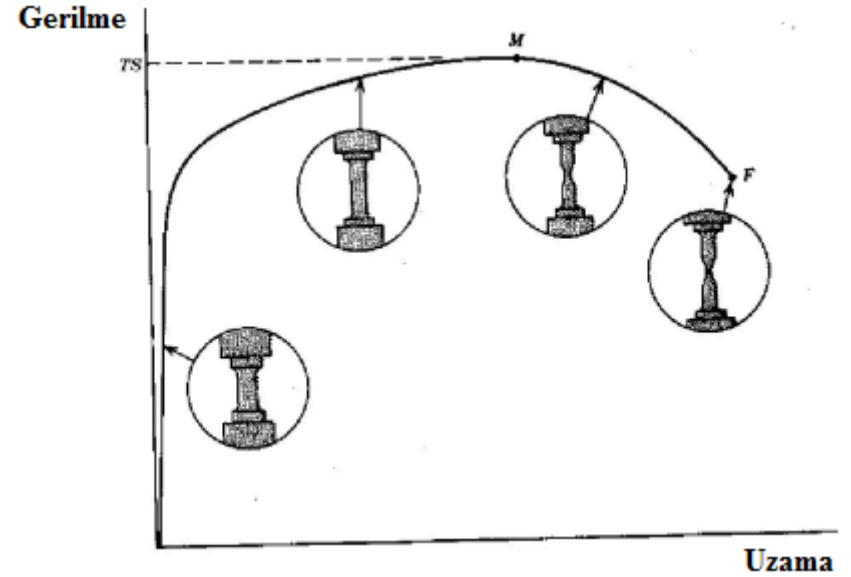
Çekme Dayanımı: Bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek gerilme değeridir. $\sigma - \epsilon$ diyagramındaki en büyük gerilmedir. Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Çekme dayanımı R_m veya σ_c ile gösterilir.



Şekil 2.8 Gerilme-Birim uzama diyagramına bir örnek

Birim uzama (Kopma) : $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100$ [%] Kopma uzaması, numunede ortaya çıkan toplam uzama miktarının numunenin orijinal ölçü uzunluğuna oranı olarak tanımlanır.

Kesit daralması: $-\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100$ [%] numunenin koptuktan sonraki kesit alanındaki daralmanın, başlangıçtaki orijinal kesit alanına oranının % olarak ifadesidir.

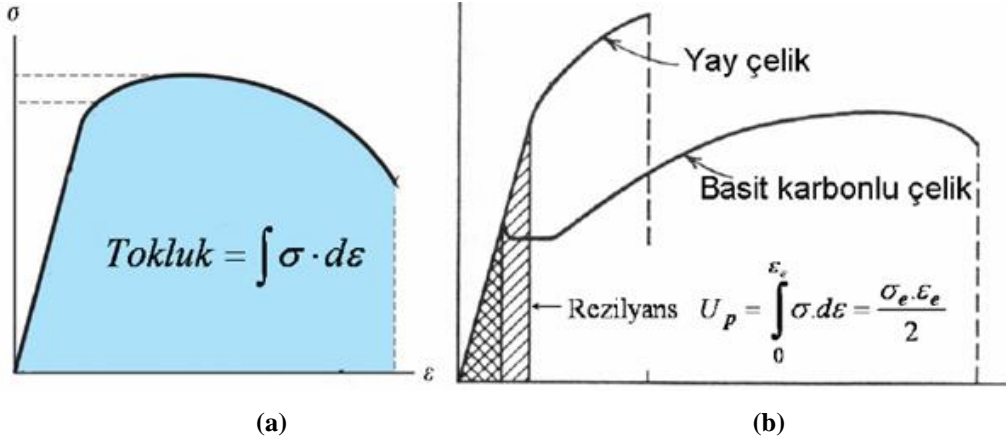


Şekil 2.9 Kesit daralmasının gerilme-uzama diyagramı üzerinde şematik gösterimi

Süneklik: Süneklik, malzemenin kırılmadan şekil değiştirebilme özelliğidir. Malzemenin süneklik değerleri yanında, akma dayanımının çekme dayanımına oranı (σ_a/σ_c) da malzemenin şekillendirilme kabiliyetini gösteren önemli bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu oran iyi şekillendirilebilen yumuşak çelikte yaklaşık 0.66 iken, söz konusu özelliğin çok yetersiz olduğu malzemelerde (örneğin sertleştirilmiş çelikler) 1'e yakındır.

Tokluk: Bir malzemenin plastik deformasyon sırasında enerji absorbe etme özelliğine tokluk denir. Çekme eğrisi altında kalan alan çekme işini verir ve bu değer tokluğun bir ölçüsüdür. Aşağıdaki şekilde tokluğu yüksek ve düşük iki malzemenin çekme diyagramı verilmiştir. Bu

malzemelerden yüksek karbonlu yay çeliğinin akma ve çekme mukavemeti orta karbonlu yapı çeliğinin akma ve çekme mukavemetinden çok daha yüksektir. Ancak, yapı çeliğinin toplam % uzama miktarı daha fazla yani, sünekliği daha iyidir. Yapı çeliği için çekme diyagramı altındaki alan daha büyük olduğundan, yapı çeliği yay çeliğine göre daha tok bir malzemedir. Buna göre tokluk, mukavemet ve sünekliğin her ikisini de içine alan bir özelliktir.



Şekil 2.10 (a) Gerilme uzama eğrisinde tokluğun belirlenmesi ve (b) Gevrek ve sünek iki malzemede tokluğun gösterimi

Gevreklik: Plastik şekil değiştirme kabiliyetinin olmaması durumunu ifade eder. Eğri bazen elastik sınırdan bazen de elastik sınıra çok yakın bir noktada son bulur.

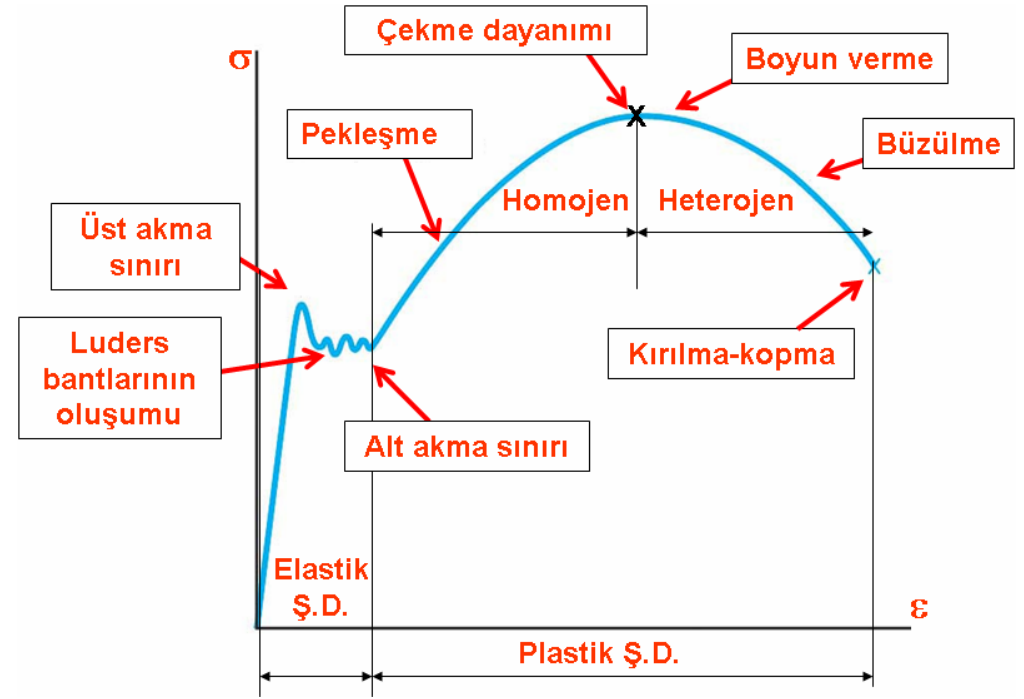
Dövülebilirlik: Süneklik gibi tarif edilir. Ancak buradaki şekil değiştirme basma şeklindedir. Dövülebilir malzemeler büyük plastik şekil değişimine müsade ederler ve haddelenebilirler. (Al, Cu, Pb gibi).

Plastik Şekil Değişimi Bölgesi

Homojen deformasyon bölgesinde gözlenen olaylar

Bazı metalik malzemeler elastik şekil değişiminden plastik şekil değişimine geçerken akma olayını belirgin bir şekilde gerçekleştirirler. Bu malzeme gurubuna en iyi örnek yumuşak

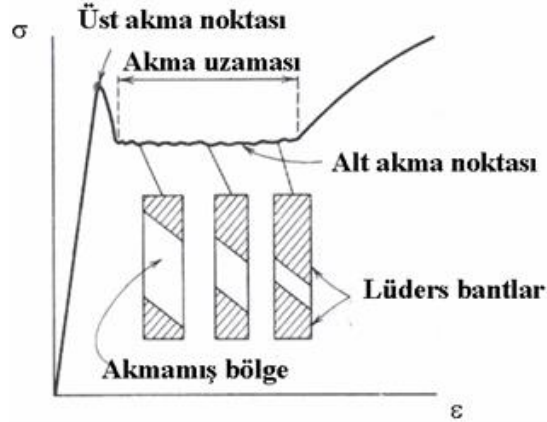
durumdaki (herhangi bir sertleştirme işlemi uygulanmamış) basit ve çoğunlukla düşük karbonlu çeliklerdir. Demir dışı metaller ve yüksek sıcaklıklarda metallerin hiçbiri belirgin akma özelliği göstermezler.



Şekil 2.11 Belirgin akma noktası gösteren malzemelerin gerilme-uzama grafiği

Malzemeye akma dayanımının üzerinde bir gerilme uygulanması durumunda **plastik yani geri dönüşsüz şekil değişimi başlamış olur**. Bu durumda dislokasyonlar harekete geçerek kayma mekanizmasını çalıştırır ve plastik şekil değişimi başlar. Bu bölgede şekil değişimi devam ederken bazı mekanizmalar sayesinde yeni dislokasyonlar meydana gelir ve uygulanan deformasyon ile beraber dislokasyon yoğunluğu da artar. Yoğunlaşan dislokasyonlar gerek kendileriyle ve gerekse başka engellerle (boşluk, ara yer atomu, çökelti, tane sınırı vb.) etkileşerek, hareketleri daha güç gerçekleştirmeye başlar. Diğer bir değişle daha ileriki hareketi için daha yüksek gerilmeye ihtiyaç duyulur. Buna “*deformasyon sertleşmesi*” (strain hardening or work hardening) veya “*pekleşme*” adı verilir. Bu nedenle homojen deformasyon bölgesinde

gerilme-birim şekil değişimi eğrisi artan deformasyon miktarı ile birlikte sürekli olarak yükselir. Üst akma noktasından sonra gelişen testere dişi görünümündeki bölge kesit boyunca tüm kayma bantlarında akmanın gerçekleştiğini gösterir. Oluşan bu bantlara **Lüders Bantları** adı verilir.



Şekil 2.12 Az karbonlu çelikte süresiz akma olayı ve Lüders bantlarının oluşumu

Bu olay tamamlanınca malzeme kesit boyunca homojen pekleşmeye uğrar. Bu gerilmenin en yüksek olduğu noktaya kadar homojen şekil değiştirme sürmeye devam eder.

Deney sırasında numune sürekli uzadığı için hacim sabitliğine göre kesit sürekli olarak azalır. Kesit daralması uygulanan kuvvetin azalmasını, oluşan pekleşme ise artmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölgede pekleşme etkisi kesit daralma etkisinden daha etkili olduğu için gerilme sürekli artar. Ancak artış oranı giderek azalır ve ögle bir noktaya gelinir ki, burada kesit daralması ile pekleşme etkisi birbirini dengeler. Bu noktada elde edilen gerilme değeri o malzemenin dayanabilecek olduğu maksimum gerilme değerini (çekme gerilmesi) verir.

Homojen PŞD bölgesine kadar zorlanmış daha ileri zorlamalara maruz kalmamış malzemelerde ikinci bir akma olayı gözlenebilir. Bu olay arayer atomlarının mevcudiyeti ile açıklanmaktadır. Bu arayer atomlarının dislokasyonların altındaki boşluklara yerleşerek dislokasyonları kilitledikleri düşünülmektedir. Bu atom gruplarına **Cottrell Atmosferi** adı verilmektedir. Bu ikinci akmanın oluşabilmesi için yukarıdan da anlaşılabacağı gibi **Cottrell**

atmosferinin etkin rol oynaması gerekir. Bu ise ısı aktivasyonu gerektirir. Şöyle ki, soğuk plastik şekil değiştirmeye maruz kalmış, belirgin akma gösteren bir malzeme, gereken ısı aktivasyonu sağlamak amacıyla belli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp (100-200 C) soğutulduktan sonra tekrar plastik şekil değişimine maruz bırakılırsa, daha yüksek gerilme değerlerinde belirgin akma olayı bir kez daha gerçekleşir. Bu olaya **Deformasyon Yaşlanması** (Strain aging) adı verilir.



Şekil 2.13 Deformasyon yaşlanması

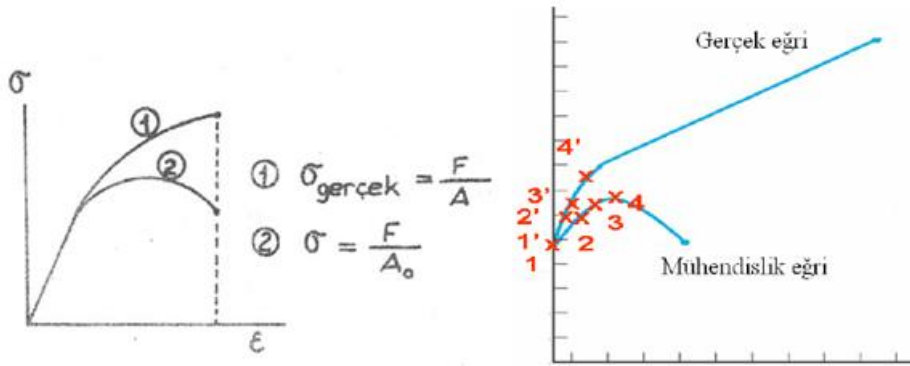
Homojen olmayan deformasyon bölgesi gözlenen olaylar

Gerilmenin pik yaptığı nokta geçildiğinde, kesit pekleşmeye oranla çok büyük bir hızla daralmaya başlar ve numunede **boyun verme (necking)** olayı meydana gelir. Boyun vermenin başladığı noktaya plastik kararsızlık noktası denir ve bu nokta maksimum gerilmeyi yani çekme dayanımını verir. Tepe noktasından sonra numune sadece boyun bölgesinde yerel olarak deforme olur. Boyun bölgesindeki kesitin sürekli azalması, uygulanan yükte düşmeye

neden olur ve diyagram aşağı döner. Bu olay deney numunesinin kopmasıyla son bulur. Kopmanın meydana geldiği gerilme değeri ise “*kopma mukavemeti*” olarak alınır.

Gerçek σ - ϵ Diyagramı ile Mühendislik σ - ϵ Diyagramı arasındaki ilişki

Şu ana kadar anlatılan gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri **mühendislik** değerler olarak nitelendirilir. Mühendislik değerlerin hesaplanması, deney parçasının deney öncesi boyutları dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak plastik deformasyonla birlikte parçanın boyunda sürekli bir uzama gerçekleşir ve buna bağlı olarak plastik şekil değiştirmede hacim sabitliği prensibine dayanarak kesitinde azalma gerçekleşir. Bu ölçüler esas alınarak elde edilen gerilme birim şekil değiştirme değerleri, **gerçek** değerler olarak nitelendirilir (σ_g , ϵ_g). Tasarımda, küçük miktarlarda şekil değiştirmeler söz konusu olduğu için mühendislik değerleri kullanmak yeterli olur. Ne var ki, imalatla büyük miktarlarda şekil değişimleri söz konusu olduğu için mutlaka gerçek değerleri kullanmak gerekir. Aşağıda bir malzemeye ait gerçek gerilme ve mühendislik gerilme grafiği birlikte verilmiştir.

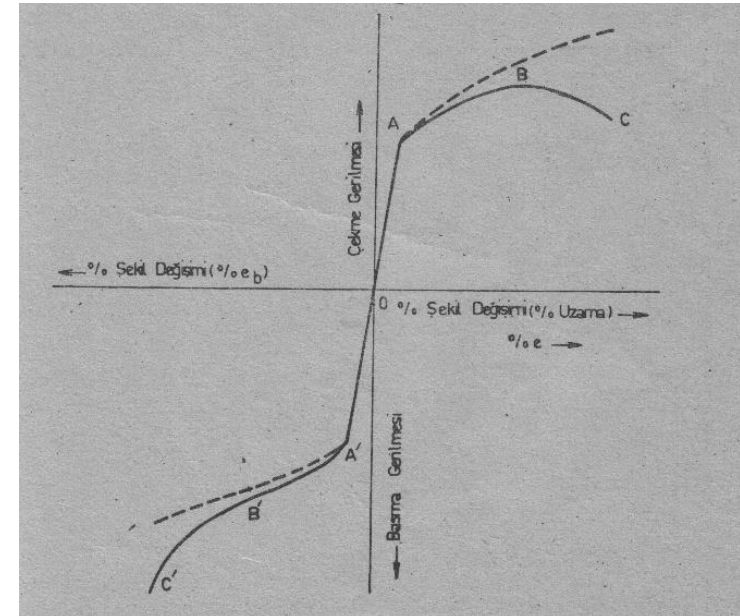


Şekil 2.14 Mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değişimini gösteren diyagramlar

Basma Deneyi: Basma deneyi işlem itibarıyla çekme deneyinin tamamen tersidir. Basma deneyi de çekme deneyi makinelerinde yapılır. Basma gerilmesine maruz kalan malzemelerin temel mekanik özelliklerle genellikle basma deneyi ile belirlenir. Bu tür malzemeler, genellikle gevrek yapıli malzemelerdir. Örnek olarak, gri dökme demir, yatak alaşımları gibi metalik malzemeler ve tuğla ve beton gibi metal dışı malzemelerin basma mukavemetleri çekme

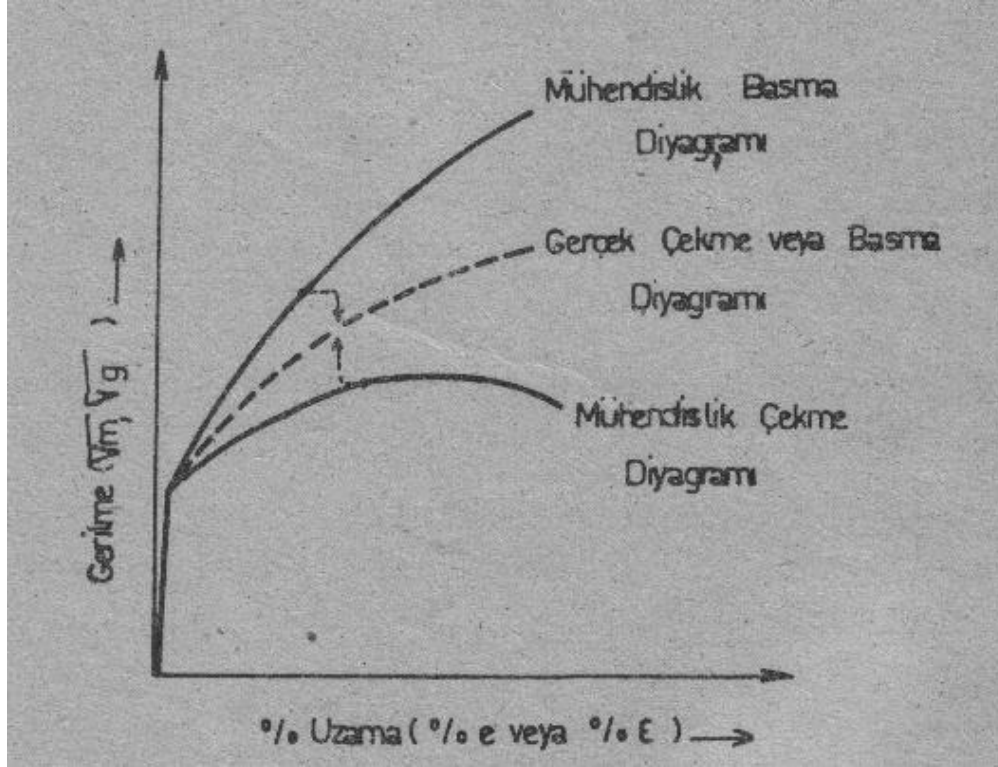
mukavemetlerine göre çok daha yüksek olduğu için basma kuvvetinin uygulandığı yerlerde kullanılırlar. Homojen bir malzemenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi için çekme ve basma durumları aynıdır. Basma deneyi sırasında numunenin kesit alanı sürekli olarak büyüdüğü için boyun oluşumu yoktur. Basma deneyi bilhassa gevrek ve yarı gevrek malzemelerin sünekliğinin hassas bir şekilde belirlenmesinde kullanılır.

Basma diyagramı: Metalik malzemelerin basma ve çekme diyagramlarının şekli genel olarak birbirine benzer. Basma deneyinde de önce bir elastik bölge (OA') görülür. A' noktası elastik sınır olarak tanımlanır ve bu noktadan sonra plastik deformasyon başlar. Bu bölge, çekme deneyinde elde edilen bölge ile tamamen aynıdır. Plastik deformasyon bölgesinin ilk kısmı (A'B') çekme diyagramının plastik deformasyon eğrisinin ilk kısmına benzer bir eğimle devam eder, fakat daha sonra basma eğrisinin eğimi artar. Bunun nedeni, deney sırasında numunenin kesit alanının sürekli artmasıdır. Deneyin sonuna doğru, kesit çok arttığında gerilme de ani olarak yükselir. Öte yandan, numunenin gerçek kesit alanına bağlı olarak hesaplanan gerçek gerilme değeri ise mühendislik gerilme değerinden daha düşüktür. Basma ve çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim uzama diyagramları aynıdır.



Şekil 2.15 Çekme ve basma gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma diyagramları birbirinin aynısıdır. Ancak, mühendislik çekme ve basma diyagramları, plastik bölgede birbirinden farklıdır. Bu bölgede mühendislik basma gerilme değerleri mühendislik çekme gerilmesi değerlerinden daha fazladır.



Şekil 2.16 Metalik malzemelerde mühendislik ve gerçek çekme ve basma diyagramları

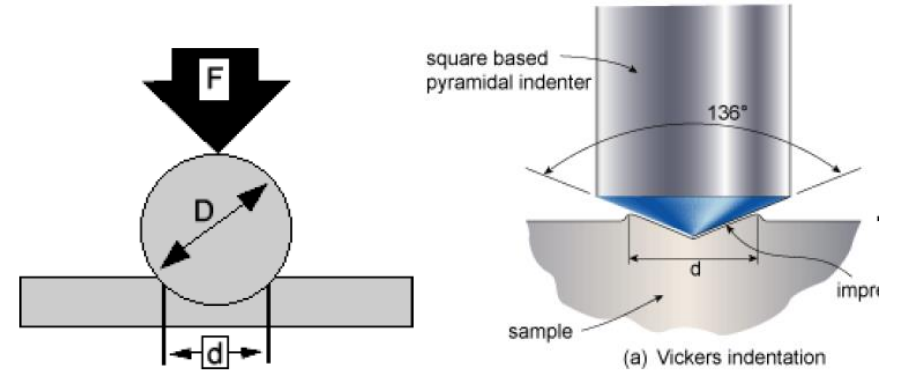
Sertlik: Yapılışının basit olması ve malzemeye hasar vermemesi nedeniyle malzeme üzerinde yapılan en genel mekanik deneylerden biri sertlik deneyidir. Ayrıca, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki de bulunmaktadır ve bu sayede diğer bazı özellikler hakkında fikir edinilebilmektedir. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik değeri ile orantılıdır. Dolayısıyla yapılan basit bir sertlik deneyi sonucunda o malzemenin mukavemet değerleri hakkında da fikir edinilebilir.

Sertlik izafi bir ölçü olup, malzemelerin sürtünmeye, kesilmeye, çizilmeye ve plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir. Bilimsel anlamda ise malzemelerin dislokasyon hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir.

Sertlik ölçme genellikle, konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir.

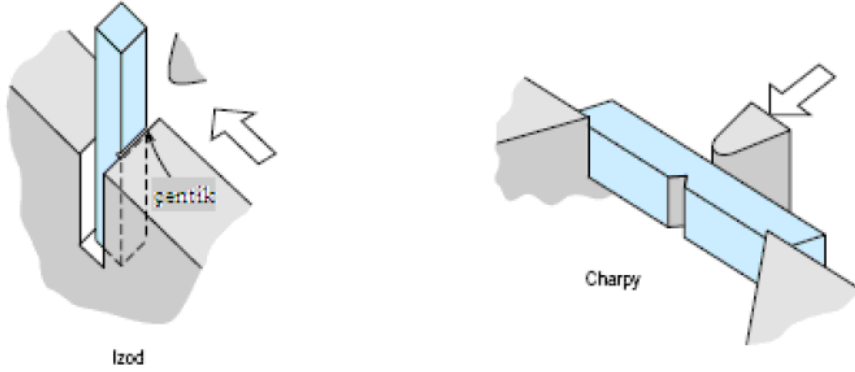
En genel sertlik ölçme deneyleri aşağıda verilmiştir. Bu ölçüler arsında matematiksel ilişkiler mevcut olup bir değerden diğerine geçiş yapılabilmektedir. Sertlik ölçümleri yapılırken, yöntem ne olursa olsun numune üzerinde birkaç ölçüm yapıp bunların ortalaması alınmalıdır.

- Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- Vickers sertlik ölçme yöntemi
- Rockwell sertlik ölçme yöntemi
- Mikro-sertlik ölçme deneyi.



Şekil 2.17 Sertlik ölçme teknikleri

Darbe deneyi: Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemelen bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Gri dökme demir numunelerinde, malzemenin bünyesindeki grafit levhacıklar çentik gibi etki yapacaklarından, ayrıca çentik açmağa lüzum yoktur. Darbe deneyi, metallerin özellikle gevrek kırılmaya müsait şartlardaki mekanik özellikleri hakkında sağlam bir fikir elde etmek amacıyla uygulanır.



Şekil 2.18 Darbe deneyi örnekleri

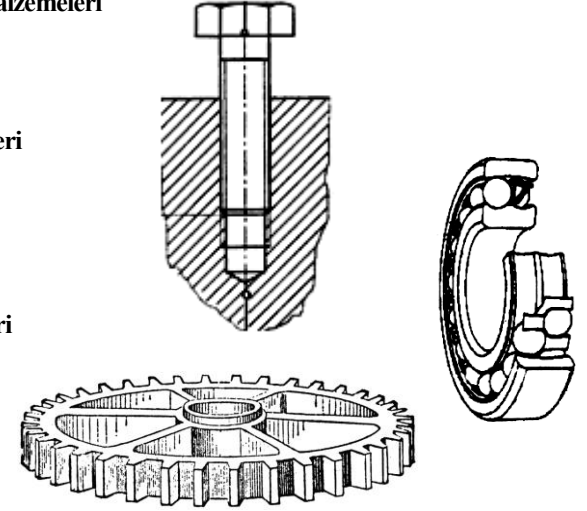
Yorulma deneyi: Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanım esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışır. Bu tür uygulamalarda, uygulanan gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. “Yorulma” adı verilen bu olay ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır.

Yorulma Mukavemeti (Sürekli Yorulma Dayanımı): Malzemenin, zamanla değişen gerilme ile zorlanması durumunda sınırlı ve belirli bir devir sayısında taşıyabildiği gerilmedir. Bu gerilme değeri verildiğinde yanına tekrar sayısı mutlaka yazılmalıdır; R_{fN} ile gösterilir.

Yorulma Limiti (Süresiz Yorulma Dayanımı): Malzemenin, zamanla değişen gerilme durumunda, teorik olarak sonsuz tekrar sayısında hasara uğramadığı gerilmedir. Bakır, bakır alaşımları, alüminyum, alüminyum alaşımları, magnezyum gibi demir olmayan metaller yorulma limiti göstermezler. Bu malzemeler için sürekli yorulma dayanımı söz konusudur. Malzemelerin yorulma limiti değerleri deneylerle elde edilir ve çeşitli malzemelerin yorulma limiti değerlerini çizelgelerde bulmak mümkündür. R_{fd} ile gösterilir.

3. MAKİNE TASARIM MALZEMELERİ

- ❖ Kaynaklı Konstrüksiyon Malzemeleri
- ❖ Lehim Malzemeleri
- ❖ Perçin Malzemeleri
- ❖ Cıvata ve Somun Malzemeleri
- ❖ Pim Malzemeleri
- ❖ Perno Malzemeleri
- ❖ Kama Malzemeleri
- ❖ Rulmanlı Yatak Malzemeleri
- ❖ Kaymalı Yatak Malzemeleri
- ❖ Mil Malzemeleri
- ❖ Yay Malzemeleri
- ❖ Dişli Çark Malzemeleri



3.1 Kaynaklı Konstrüksiyon Malzemeleri

Kaynak yapılan çeliğin kaynak dikişindeki ısı esas malzeme tarafından hızlı bir şekilde çekilir. Çeliğin karbon oranının %0,2 den fazla olması durumunda kaynak dikişinde sert ve kırılgan mikro yapılar oluşabilir. Bu nedenle kaynaklanacak çeliklerin karbon oranları %0,2'den küçük olmalıdır. Piyasada kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılan levha, I profili, U profili, köşebent vs. yarı mamul çeliklerin karbon oranları genellikle %0,14...0,23 aralığındadır. En çok kullanılan çelikler St33 (S185), St37(S235), St44(S275) ve St52(S355) çelikleridir.

Karbon oranı yüksek olan çelikler ön ısıtma yapılarak kaynatılabilir; fakat böyle bir işlem pek çok konstrüksiyon için uygulanamaz ve ekonomik değildir. Hafif yapılar elde etmek için, hem kaynaklanabilir, hem de dayanımı yüksek ince taneli çelikler kullanılır.

3.2 Lehim Malzemeleri

Lehim malzemesi ergiyerek, ergimeyen iki metali bağlar. Bağlantı, lehim malzemesinin, lehimlenecek malzemenin yüzey boşluklarına, girintilerine, pürüzlülük içlerine doldurması ile sağlanır. Ergime sıcaklığı 450°C 'den küçük olan lehimlere yumuşak lehim, büyük olanlara sert lehim denilir.

Lehim malzemesi seçilirken ilk dikkat edilecek özellik ergime sıcaklığıdır. Lehim bağlantısının çalışma şartlarına göre sıcaklık ve buna bağlı olarak da lehim alaşımı seçilir. Yumuşak lehim malzemelerinin ergime sıcaklıklarının düşük ve sabit olması genellikle tercih edilir. Bu nedenle lehim malzemeleri genellikle ötektik alaşımlardır. Ticari olarak satılan yumuşak lehim malzemelerinin ergime sıcaklığı 11°C (Ga-In-Sn alaşımı) ile 425°C (Ge-Al alaşımı) arasında değişmektedir.

Kalay-Kurşun Lehimleri: Kalay-kurşun lehimlerinin çok geniş kullanım alanı vardır. Ötektik alaşım %63Sn-%37Pb oranındadır ve ergime sıcaklığı 180°C civarındadır. Alaşım oranları %100Sn ve %100Pb aralığında olabilir. %5Sn-%95Pb lehim kalay kaplı parçaların ve otomobil radyatörlerinin lehiminde kullanılır. Otomobil radyatör lehimlemesinde kullanılan alaşıma, çalışma sıcaklığında dayanımın artması için az miktarda gümüş katılır. Radyatör lehimlenmesinde %10Sn-%90Pb ve %20Sn-%80Pb alaşımları da kullanılır. Bu alaşımların kullanılması durumunda lehimin katılaşması geniş bir sıcaklık aralığında olduğundan, soğuma esnasında, sıcak yırtılmanın olmaması için parçanın hareket ettirilmemesi gerekir. Yüksek kalaylı lehimlerin ergime sıcaklıkları düşüktür ve genellikle elektronik sanayinde kullanılır. Lehim alaşımının içinde bulunabilecek kalıntı elementleri (Al, Sb, As, Bi, Cd, Cu, Fe, Ni, P, S, Zn,) lehim özelliklerini değiştireceği için belirli değerlerin altında tutulması gerekir

Diğer Yumuşak Lehim Malzemeleri: Ergime sıcaklıkları değişik yumuşak lehim alaşımları vardır. Kalay-antimon lehim (%94Sn,%4,5...5,5Sb) paslanmaz çeliklerin lehiminde kullanılır. Bu alaşım iyi sürünme ve yorulma dayanımına sahip olduğu için soğutma tesisatlarında kullanılır. Kalay-kurşun lehimleri (%94..96Sn+%3,4...5,8Ag) diğer alaşımlara

göre pahalıdır; fakat diğer lehimlere göre yüksek dayanımından dolayı, bilhassa gıda sanayinde tercih edilir.

Kalay-çinko ve çinko-alüminyum lehimleri galvanik korozyona dayanımlarından dolayı tercih edilirler. Ötektik kalay-çinko alaşımının (%91Sn+%9Zn) ergime sıcaklığı 199°C'dir ve düşük sıcaklıklarda çalışacak parçaların birleştirilmesi için uygundur. 388°C ergime sıcaklığına sahip ötektik çinko-alüminyum lehim (%95Zn-%5Al) ısı eşanjörü borularının birleştirilmesinde kullanılır. İndiyum esaslı lehimler, bilhassa sıfır altı sıcaklıklardaki özelliklerinin iyi olmasından dolayı uzay araçları ve uydularda kullanılır. %52In-%48Sn ve %97In-%3Ag lehimleri cam-metal, cam-cam birleştirmelerinde kullanılır. Bu alaşımlar aynı zamanda düşük buharlaşma basınçlarından dolayı vakum teknolojisinde kullanılır. %50In-%50Pb lehim elektronik endüstrisinde kullanılır.

Yapılacak lehimin yüzeylere iyi tutunması için, Lehim ile birleştirilecek yüzeyler, asit, nem, pas,yağ, boya vs gibi kirliliklerden temizlenmelidir. Temizleme işlemi mekanik ve kimyasal yollarla yapılabilir. Temizleme için kullanılan kimyasallara *dekapan* denilir.

Metallerin lehimlenebilme kabiliyetleri, oksit oluşturma aktiflikleri ile ilgilidir. Kolay oksit oluşturan metallerin lehimle birleştirilmeleri de zordur.

Berilyum ve titanyum lehimlenemez metallerdir. Alüminyum ve alüminyum bronz çelik çok zor lehimlenir. Altın, gümüş bakır, kalay çok kolay lehimlenir.

Sert Lehim (Brazing): Yukarıda da bahsedildiği gibi, sert lehim yapmak için, lehim malzemesinin 450 °C'nin üzerinde ısıtılması gerekir. Isıtma işlemi, şaloma ile, fırın yardımıyla, indüksiyonla vs yapılabilir. Sert lehim malzemeleri ve uygulama alanları aşağıda verilmiştir.

Tablo 2. Sert Lehim Malzemeleri

Lehim malzemesi	Birleştirilecek malzeme	Uygulama örnekleri
Al-Si ötektik alaşımı (%88,4Al-%11,6Si)	Alüminyum, alüminyum alaşımları, çelik ile alüminyum, alüminyum ile bakır	otomobil radyatörleri, ısı eşanjörleri, arı peteği yapılar
Cu-Sn peritektik alaşımı Cu-Zn peritektik alaşımı	Bakır, bakır alaşımları, bakır ile yumuşak çelik, bakır ile paslanmaz	Isı eşanjörleri, otomobil parçaları,
Cu-Ag ötektik alaşımı	Demir esaslı alaşımlar, Alüminyum	Çok geniş kullanım alanı
(Ni/Fe+Cr)-Si-B	paslanmaz çelikler, Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, karbon çelikleri,	Uçak türbin parçaları, Otomobil parçaları, Isı
(Nj.Pd)-Si-B	AISI 300 serisindeki paslanmaz çelikler, Sementit karbür (elmas uç	Arı peteği yapılar, Sementit karbür/polikristal elmas
Au-Ni katı çözültisi	Nikel esaslı ısı rezistansları, çelikler	Arı peteği yapılar, Türbin
Cu-(Ti,Zr)-Ni ötektik ve	Titanyum/zirkonyum esaslı alaşımlar	Titanyum tüpler, uçak

3.3 Perçin Malzemesi

Perçinler, kaynak teknolojisi gelişmeden önce kazan, boyler, köprü, gemi ve çelik konstrüksiyon inşaatları gibi yapıların imalinde kullanılırdı. Kaynak teknolojisinin geliştiği günümüzde perçinli bağlantılar fazla kullanılmamaktadır. Alüminyum gibi kaynağı zor olan malzemelerin bağlantılarında, farklı iki malzemenin birleştirilmesinde, kaynağın meydana getirdiği ısıdan dolayı malzemenin bozulmaması istenen yerlerde perçinli bağlantılar hala cazip olmaktadır.

Perçin baş tarafı şişkin silindik parçadır. Perçinin şaft boyu, levha kalınlığından 1,5d kadar fazla olmalıdır. Perçin delik çapı, perçin çapından büyük açılır. Perçinleme esnasında perçin şişerek deliği doldurur. Çelik malzemeler için, perçin yapma işlemi, perçin çapına bağlı olarak sıcak veya soğuk yapılabilir, $d < 9$ mm ise soğuk perçin, $d > 9$ mm ise sıcak perçin yapılır, $d > 26$ mm ise perçin presle dövülerek, $d < 26$ mm ise balyozla dövülerek bağlantı yapılır.

Perçin malzemeleri, bağlantı yapılacak parçaların malzemesine bağlıdır. Perçin malzemesinin soğuk şekillendirmeye uygun olması gerekir. Soğuk veya sıcak şekillenebilir özellikte olan bütün malzemeler perçin-malzemesi olarak kullanılabilir. Çelik olarak; soğuk veya sıcak şekillenebilir özellikte olan genel yapı çelikleri, otomat çelikleri, ıslah çelikleri, sementasyon çelikleri vs olabilir. Perçin malzemesi, birleştirme yapılacak levhalardan farklı olursa korozyon ve gevşeme problemleri meydana gelir. Perçin malzemesinin genleşme katsayısı perçinlenen parçaların genleşme katsayısından fazla olmamalıdır. Bundan dolayı alüminyum parçalar alüminyum perçin ile, bakır parçalar bakır perçin ile, çelik parçalar çelik perçinle bağlanmalıdır.

3.4 Cıvata ve Somun Malzemeleri

Cıvata ve somunlar genellikle çelikten imal edilir. Korozyona dayanıklılık istenen yerlerde paslanmaz çelikler ve bakır alaşımları (pirinç) kullanılır. Cıvata malzemelerinde ilk önce soğuk şekillendirme özelliğinin iyi olması istenir. Bu özeliği sağlamak için, cıvata üretiminde kullanılan çeliklerin mikro yapısındaki sementitler lamelli olmamalıdır. Çelik küreleştirme tavlmasına tabi tutularak sementitler küreleştirilir. Cıvataların çentik darbe tokluğu ve yorulma dayanımlarının iyi olması istenir. Böyle bir özellik genellikle ıslah etme işlemi ile sağlanır ve cıvatalar genellikle ıslah çeliklerinden yapılır.

Cıvataların mekanik özelliklerini belirten semboller kabartma usulü kullanılarak cıvata başlarına yazılır. DIN ve ISO standartlarına göre cıvata kaliteleri aşağıda gösterildiği gibi iki rakamla verilir. Dayanım değerleri yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bunun için, birinci rakamın 100 ile çarpımı çekme dayanımı (R_m) değerini verir. İki rakamın çarpımı ile elde edilen sayı 10 ile çarpılır ise akma sınırı (R_e) değerini verir. SAE VE ASTM standartlarına göre cıvata kaliteleri, cıvata başlarına kabartma usulü konulan çizgiler ve sembollerle gösterilir.

Tablo 3. Cıvata Kaliteleri ve Mekanik Özellikleri

Kalite DIN 267	Kalite ISO 898	Rm (N/mm ²) DIN 267	Rm (N/mm ²) ISO 898	Re (N/mm ²) DIN 267	Re (N/mm ²) ISO 898	Cıvata imalatında kullanılan çelik örnekleri
3.6	3.6	340	330	200	190	QSt36-3 QSt38-3
4.6	4.6	400	400	240	240	
4.8	4.8	400	420	320	320	Cq22 Cq35
5.6	5.6	500	500	300	300	
5.8	5.8	500	520	400	420	
6.6	-	600	-	360	-	
6.8	6.8	600	600	480	480	
6.9	-	600	-	540	-	
8.8	8.8	800	800	640	640	≤ M20 Cq45, 19MnB4, 22B2, > M20 Cq45, 38Cr2, 46Cr2,
-	9.8	.	900		720	
10.9	10.9	1000	1040	900	940	≤ M8 35B2 > M8 34Cr4, 37Cr4, 41Cr4
12.9	12.9	1200	1220	1080	1100	≤ M18 37Cr4, 34CrMo4 ≤ M24 34CrMo4, 42CrMo4 > M24 34NiCrMo6, 30CrNiMo8
14.9	-	1400	-	1260	-	42CrV6

3.5 Pim Malzemeleri

Pimler, merkezleme veya emniyet elemanı olarak kullanılırlar; ayrıca hafif zorlamalı bağlantılarda bağlama elemanı olarak da kullanılabilirler. Silindirik, konik veya çentikli yapılu elemanlar olup muhtelif çeşitleri vardır. Pim malzemesi olarak cıvata malzemeleri kullanılır ve cıvatalar gibi kalitelere ayrılmıştır. En çok 5.6 ve 6.6 kalitedeki pimler kullanılır. Pimler küçük ve değiştirilmesi kolay olduğu için, pim malzemesi bağlantı elemanları içinde en zayıf olmalıdır.

3.6 Perno Malzemeleri

Pernolar silindirik düz veya başlı olabilirler. Pernolar, mafsallı bağlantılarda, küçük tekerleklerin, kasnakların ve ruloların taşıyıcı elemanlara bağlanmasında kullanılır. Pernolardan aşınmaya ve yerine göre yorulmaya dayanıklılık istenir. Perno malzemesi olarak, genel yapı çelikleri, ıslah çelikleri, sementasyon çelikleri, otomat çelikleri kullanılabilir. Aşınmaya dayanıklılık istenen yerlerde sementasyon veya indüksiyon ile yüzey sertleştirilmesi yapılabilir.

3.7 Kama Malzemeleri

Kamalar; dişli çark, kasnak, volan vs. gibi makine elemanlarının mile göre izafi hareket etmesini engeller; yani mildeki momentini bağlı olduğu elemana aktarır. TS 147 de, kama malzemesi olarak C45 ıslah çeliği verilmiştir. Kamanın kullandığı bağlantıda, bağlantı elemanlarının malzemesi seçilirken kamanın malzemesinin en düşük dayanımlı olması tavsiye edilir. Bu şekilde, bağlantıda hasar meydana gelir ise ilk önce ucuz ve imalatı kolay olan kama hasar görür.

3.8 Rulmanlı Yatak Malzemeleri

Rulmanlı yatakların bilezikleri ve dönen elemanları derinlemesine sertleşme kabiliyeti olan 100O6 gibi çeliklerden veya sementasyon çeliklerinden yapılır. Sertleştirme sonucu 58-65HRC sertlik elde edilir. Rulmanın çalışma sıcaklığı 125° C'nin üstüne çıkması durumunda sıcağa dayanıklı (%4Cr,%7W, %2V, %4Mo, %5Co gibi) rulman çelikleri kullanılır. Korozyonlu ortamlarda çalışacak rulmanlı yataklar için martenzitik paslanmaz çelikler (%15Cr, %4Mo, %5Co) kullanılır. Rulman çelikleri vakum ergitme yöntemiyle elde edilir. Bu yöntem ile elde edilen çeliğin homojen bir mikro yapısı vardır ve kalıntılar çok azdır. Böyle bir çeliğin güvenilirliği yüksek olur.

Dönen elemanları tutmak için kullanılan kafesler, küçük boyutlu rulmanlı yataklarda çelik saclardan veya pirinçten preslenerek yapılır; büyük boyutlu rulmanlı yataklarda talaşlı işleme ile yapılmış çelik veya pirinç kafesler kullanılabilir. Küçük veya orta boy rulmanlı yataklar için poliamitten (nylon6.6) yapılmış kafesler kullanılabilir. Poliamid kafesli rulmanlı yatakların çalışma sıcaklıkları -40°C'nin altına inmemeli ve 120°C 'nin üstüne çıkmamalıdır. Çelik kafesler sürtünme ve aşınmayı azaltmak için, karbonitrüleme gibi yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutulurlar. Aşırı sıcak ve yüksek korozyonlu ortamlar için geliştirilmiş seramik malzemeler kullanılır.

3.9 Kaymalı Yatak Malzemeleri

Kaymalı yatak malzemeleri sertliklerine göre üçe ayrılır:

- ❖ Sertlikleri 50 BSD (HB)' den küçük olan plastik alaşımlar. Plastik alaşımlar, beyaz alaşımlar, kurşun bronzları, plastik alüminyum alaşımları ve gümüştür. Aşırı yüklenen ve aşırı hızla çalışan yataklarda plastik alaşımlar kullanılır. Yatak tam yağlamalı çalışmalıdır. Yatak malzemesi burç üzerine ince kabuk şeklinde kaplama yapılır.
- ❖ Sertliği 50-100 BSD arasında olan yumuşak alaşımlar. Yumuşak alaşımlar, yumuşak bronzlar (Sn, Sn-Pb, Sn-Pb-Zn bronzları) ve alüminyum alaşımlarıdır.
- ❖ Sertliği 100 BSD' den büyük olan sert alaşımlar. Sert alaşımlar, Alüminyum ve demir bronzları ve dökme demirlerdir.

Yumuşak ve sert alaşımlar, tam yağlamanın yapılamadığı sınır sürtünmeli durumlarda kullanılır.

Beyaz Yatak Alaşımları: Beyaz yatak alaşımları plastik matriks içinde sert bileşiklerin yer aldığı yumuşak metal (Sn, Pb, Cd, Sb, Zn) alaşımlarıdır. En önemli beyaz yatak alaşımları ve özellikleri Çizelgede verilmiştir. Beyaz yatak alaşımları, sınır sürtünme şartlarında düşük sürtünme katsayıları, iyi plastik özelliği, kendi kendine alıştırma özelliği ve aşınma dayanımları yönünden diğer malzemelerden ayırt edilirler. Plastiklik, yükün yatak üzerine homojen dağılmasını sağlar ve sert tozların, yağın oksitlenmesinden meydana gelen sert parçacıkların yatağa girmesi durumunda fazla tehlike oluşturmasının önüne geçer. Bu sert parçacıklar beyaz yatak malzemesinin içine gömülür abrazyon aşınması yapmasına mani olur. Beyaz yatak alaşımlarının en büyük zaafı bilhassa yüksek sıcaklıklardaki temas yorulma dayanımının düşük olmasıdır. Beyaz yatak alaşımları, 25-35HRC sertliğine ıslah edilmiş çelik mil ile beraber çalışır. Mil sertliğinin 50-55HRC olması güvenirliliğin artmasına neden olur. Beyaz yatak alaşımları, yatak burcu üstüne çok ince olarak kaplanır. Kalınlığın azalması ile temas yorulma dayanımı artar.

Tablo 4. En Çok Kullanılan Beyaz Yatak Alaşımları

Alaşım elementleri %	Ergime aralığı °C	Sertlik HV (20°C'de)	Isıl genleşme katsayısı 10 ⁻⁶ /°C	Uygulama örnekleri
Sn:89 Sb:7,5 Cu:3,5	239-312	23-25	23	Krank milleri, gaz türbini gibi yağlamalı yataklarda.
Sn:87 Sb:9 Cu:4	239-340	27-32	23	Krank mili, gemi dişli kutu yatakları, türbin yatakları
Sn: 12 Sb:13 Cu:1 Pb:74	245-260	26	28	Düşük sıcaklık ve yüklerde

Bronzlar: Bronzlar, sınır sürtünme şartlarında yüksek yük taşıyabilen yatak malzemeleridir. Büyük yükleme yapılan, krank milleri, dişli ve türbin yatakları vs bronzlardan yapılır.

Tablo 5. En Çok Kullanılan Bronz yatak Alaşımları

Alaşım elementleri %	Ergime aralığı °C	Sertlik HV (20°C'de)	Isıl genleşme katsayısı 10 ⁻⁶ /°C	Kullanıldığı yerler
Kurşun bronzu Cu:75 Sn:5 Pb:20	Matris:900 Kurşun:327	45- 70	18	Yüksek basınç altındaki burçlar, kaymalı yataklar; içten yanmalı motorlarda krank mili yatakları, kam mili yatakları, dişli kutusu burçları, gaz türbini yataklarında ince ve orta kalınlıkta kaplama şeklinde.
Kurşun bronzu Cu:80 Sn:10 Pb:10	Matris:820 Kurşun:327	65-90	18	Burçlar, kaymalı yataklar; kam mili yatakları, dişli kutusu burçları, gaz türbini yataklarında ince kalınlıkta kaplama şeklinde.
Kurşun bronzu Cu:85	Matris:920 Kurşun:327	45-70	18	Değişik yerlerde kullanılan burçlar, yataklar.
Kurşun bronzu Cu:74	Matris:900 Kurşun:327	40-55	18	Yüksek basınç altında çalışan yataklar, burçlar vs. Bilhassa, üstü kaplanan krank mili yatakları.
Fosfor bronzu Cu:	800	70-150	18	Yüksek basınç altında ve yüksek sıcaklıkta çalışan burçlar yataklar; eksantrik pres yatakları vs.

Cu:70 Pb:30	Matris:1050 Kurşun:327	35-45	16	Krank mili, gaz türbini, kompresör gibi yüksek ve orta hızlarda çalışan yatak malzemesi. Üstüne kaplama yapılabilir veya yapılmayabilir.
-------------	---------------------------	-------	----	--

Gümüş: Aşırı yüklenen mil yatakları az miktarda Sn, Pb ilaveli gümüş alaşımlarından yapılır. Gümüş kaplamanın plastiklik özelliği vardır, yumuşaktır ve iyi bir yatak malzemesi özelliği gösterir. Gümüş, porozlü bronz üzerine 0,1 -0,3 mm kalınlığında veya Cu-Ni alaşımı üzerine 20-25 µm kalınlığında elektroliz yöntemi ile kaplanır. Yatağın kendi kendisini alıştırma özelliğini geliştirmek için 10-30 µm kalınlığında Pb veya Pb-Sb alaşımı ile kaplanır. Bunun üzerine de birkaç mikron kalınlığında İn (indiyum) kaplanır. Milin sertliği 50RSD-C'den daha büyük olmalıdır.

Çok Katlı kaplamalar: Çok katlı kaplamalarda beyaz metal tabakasına destek olması için 0,2-0,5 mm kalınlığında yatak malzemesi kaplanır. Bu destek tabakası temas yorulması dayanımını ve darbe dayanımını artırır. Destek malzemesi olarak, alüminyum bronzları kullanılır. En iyi netice sinterleme yöntemiyle üretilmiş porozlü Cu-Al, Cu-Ni alaşımlardır.

Dökme Demir Yatak Malzemeleri: Dökme demir yataklar, bronzlara göre daha ucuz olduklarından dolayı bronz yatak yerine kullanılır. Dökme demirlerin zaafı kırılgan olmalarıdır. Bilhassa yük yoğunlaşması olan kısımların kırılma tehlikesi vardır. Dökme demir yatakların içinde çalışacak millerin sertliği 55HRC'den fazla olmalıdır.

Hafif Alaşımlar: En çok bilineni Alüminyum bronzudur. %6Sn+%1,5Ni+% 0,5-1 Sb+% 0,5 Si+% 0,5-1 Mn+Al alaşımı hem iyi plastiklik hem de yüksek dayanım özelliği verir. Alüminyum alaşımı yatakların korozyona dayanıklılıkları iyidir. Bu alaşımların zaafı, düşük aşınma dayanımlı olmalarıdır. Yatak, basınçlı yağ ile yağlanmalıdır ve milin sertliği 55HRC'den büyük olmalıdır. Alüminyum alaşımlı yatakların kullanılması durumunda yüksek seviyedeki ısıl genleşme katsayısı göz önünde bulundurulmalıdır.

Metal Seramikler: Sınır sürtünme şartlarında veya yeterli yağlama olmaması durumlarında, kendinden yağlamalı metal seramik bronz-grafit, demir-grafit kompozisyonları kullanılır. Bu yataklar metal ve grafit tozların preslenip sinterlenmesiyle elde edilir. Metal seramik yataklar, mikroporozlü yapılarından dolayı büyük miktarda yağ emebilirler. Bu yataklar kullanılmadan önce yağ ile doyurulur. Böyle bir yatak hiç yağlanmadan birkaç ay çalışabilir. Doyurma işlemi periyodik olarak yapılır. % 97-98 Fe+% 2-3 grafit kompozisyonunda yüksek kalite gözlenmiştir. % 7'ye kadar Ni ilavesi plastikliği ve darbelere dayanıklılığı artırır. Bu malzemeler korozyona da dayanıklıdır.

Metal Olmayan Yatak Malzemeleri: Bu malzemeler, plastikler, sert ağaçlar, kauçuk ve grafitir. Bütün bu malzemelerden yapılmış yatakların içinde çalışacak millerin sertliği 50HRC'den büyük olmalıdır. Bu malzemelerin özellikleri, düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler ve su ile çalışma özellikleri yağ ile çalışma özelliklerinden iyidir.

Plastikler: Plastik yataklar, sınır sürtünme şartlarında çalışan, yavaş dönme hareketi ve titreşimli hareket yapan yerlerde, düzenli yağlamanın mümkün olmadığı zamanlarda önem kazanır. Bu yataklar düşük yüklerde yağlama yapmadan da çalışabilir. Yatak yapılacak plastik, su ile şişmeyen ve yağlama sıvılarına kimyasal olarak aktif olmayan özellikte olmalıdır. Plastik yatağın taşıyabileceği yük, plastiğin sertliğine ve mukavemetine, çalışma sıcaklığına dönme hızına, yağlamanın tipine kalitesine bağlı olarak 1-10 N/mm² arasında değişir. Genellikle yatak olarak kullanılan plastikler: polyamidler ve flurokarbonlardır. Plastiklerin aşınma dirençleri oldukça yüksektir.

Karbon Grafit: Karbon grafit, grafit, kömür, kurum ve kok karışımının katran, zift gibi yapıştırıcılar ile karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi ile elde edilir. Karbon grafit iyi bir yatak malzemesi özelliği verir, kolayca işlenebilir; fakat kırılgandır. Cu, Cd, beyaz metallerin tozları, karbon grafitin içine dayanımı, ısı iletimini ve aşınma direncini artırmak için katılır. Kırılganlık formaldehit, silikon reçineleri ve teflon ile doyurularak bertaraf edilebilir.

Tablo 6. Yatak Alaşımlarının karşılaştırmalı özellikleri (1 kötü 5 iyi)

Malzeme	Brinell		Maks. Çalış. Sıcaklık °C	Min. mil sertliği HRC	Aşınma özelliği	Yatak sarmasına karşı koyma	Korozyon direnci	Yağın oksitlenmesine etkisi	Yorulma dayanımı
	20°C	150°C							
Kalay esaslı beyaz yatak alaşımları	20-30	6-12	150	25	5	5	5	5	1
Kurşun esaslı beyaz	15-20	6-12	150	25	5	5	3	1	1
Çok katlı kaplamalar (Üstü beyaz)	20-30	6-12	250	25	5	5	5	5	4
Kadmiyum esaslı beyaz yatak alaşımı	30-40	15	250	30	4	5	1	4	2
Kurşun	40-70	40-60	300	45	2	3	2	2	4
Gümüş	25-30	25-30	400	45	3	4	5	5	5
Kalay bronzları	60-80	60-70	400	45	1	1	4	4	5
Plastik alüminyum alaşımları	35-40	32-46	300	45	2	2	5	5	4

Yağlamasız Yatak Malzemeleri: Yağlamasız yataklar, yağlamanın mümkün olmadığı, yağlama yağının sisteme zarar verebileceği ve yağlama yapılsa bile vakum gibi etkilerden dolayı yatakta yağın kalmayacağı yerlerde kullanılır. Bu yataklar çalışır iken ısınır ve ısının yükselmesi aşınmayı artırır ve yatağın yük taşıma kabiliyetini azaltır.

Yatakta oluşan sıcaklık; sürtünme katsayısı, basınç ve hızın çarpımı ile orantılıdır ($\mu \cdot P \cdot v$). Oluşan ısının yataktan uzaklaştırılması için uygun yatak tasarımı ve malzeme seçimi yapılmalıdır. Aşınma miktarı ise basınç ve hızın çarpımı ile orantılıdır. Çizelge de yağlamasız yatak malzemeleri verilmiştir.

Tablo 7. Yağlamasız Yatak Malzemelerinin Özellikleri

Malzeme tipi	Örnek	P _{müsed} MPa (Stati)k	T _{müsed}	Isıl genleşme	Isı iletim katsayısı W/m°C	Önemli özelliği
Termoplastikler	Nylon(Poliamid) Asetal(Derlin)	10	100	100	0,24	Ucuz
Katkılı termoplastikler	(Nylon, Asetal) +MoS ₂ , PTFE, Grafit, Pb vs	15-20	250	60-100	0,24	Düşük sürtünme katsayısı
Katkılı PTFE	PTFE+Bronz, mika, karbon, metaller, camlar	2-7	250	60.-100	0,25-0,5	Çok düşük sürtünme katsayısı
Katkılı termosetler	Fenolikler, epoksiler +asbest, tekstil, PTFE	30-50	175	10-80	0,4	Fiber takviyeler dayanımı artırır
Karbon-grafit	Grafit ve reçine	1-3	500	1,5-4	10-50	Kimyasal olarak inert
Karbon-metal	Katkılar: Cu,Ag,Sb,Sn,Pb	3-5	350	4-5	15-30	Karbon-grafit'e göre dayanım iyi
Katı yağlamalı metaller	Bronz+grafit, MoS ₂ , Ag, PTFE	30-70	250-500	10-20	50-100	Yüksek sıcaklığa dayanıklı
Özel mekanik işlem yapılamayan ürünler	Çelik-gözenekli bronz/PTFE	350	275	20	42	
	PTFE/camyünü+reçine	700	250	12	0,24	
	Termoset+yüzey PTFE	50	150	10	0,3	
	Metal+doyurulmuş PTFE	7	275	100	0,3	

3.10 Mil Malzemeleri

Miller, genellikle yuvarlak kesitli, karbonlu veya alaşımlı çeliklerden yapılır. Millerde dayanım ve tokluk gereklidir. Bu özellikleri elde etmek için, bilhassa aşırı zorlanan miller ıslah edilir. Islah edilmeyecek miller için soğuk çekilmiş çelik kullanmak daha avantajlıdır. Aşınan yerlerin çeşitli yöntemlerle yüzey sertleştirme işlemi yapılmasına gerek vardır.

Miller genellikle değişken gerilme ile zorlandıklarından, mil yapılacak malzemeler yorulmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Hareketli makinelerdeki millerin mümkün olduğu kadar hafif olması istenir. Bundan dolayı yüksek dayanımlı çelikler tercih edilir.

Şayet mil darbeli çalışan bir makinede çalışıyor ise tokluk da iyi olmalıdır. Bu özellikleri sağlamak için mil ıslah çeliklerinden yapılır. Mil imal edildikten sonra sertliği 35...40HRC civarında olacak şekilde ıslah edilir. Şayet mil kaymalı yatak içinde çalışacak ise, yatak içinde kalan muylu kısmı 55HRC civarında yüzey sertleştirme işlemleriyle sertleştirilmelidir. Milin üzerinde gerilme yığılması oluşturan fatura, kama kanalı, vida, yağ deliği gibi yerlerin dikkatli tasarımı gerekir. Küçük çaplı millerin soğuk çekilmiş çelikten yapılması daha iyidir. Türkiye piyasasında akson adı altında S235(St37) çeliğinin soğuk çekilmiş şekli satılmaktadır. Çeliğin P, S gibi kalıntı elementleri ve oksitler sülfürler gibi kalıntı bileşiklerinden temiz olması yorulma dayanımını artırır. Milin üzerine yapılacak, krom kaplama, dolgu kaynağı ve kaynaklardır.

3.11 Yay Malzemeleri

Yaylanma özelliği gösteren pek çok malzeme vardır. Fakat yaylar genellikle çelikten yapılır. Yay yapılacak çeliğin akma sınırı yüksek olmalıdır. Yay tellerine, üretim esnasında genellikle patentleme denilen termomekanik işlem uygulanır. Bunun yanında soğuk çekilerek deformasyon sertleştirilmesi ile sertleştirilmiş teller de vardır. Bazı yayların imal edildikten sonra ıslah etme işlemi ile dayanımı artırılır (araçlarda kullanılan yaprak yaylar gibi). Yayların yorulma dayanımını artırmak için ikinci bölümde anlatıldığı gibi taşlama, parlatma, bilye bombardımanı gibi işlemler uygulanabilir. Çizelgede bazı yay malzemeleri ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Korozyonlu ortamlarda çalışacak yayalar için paslanmaz çelikler, fosfor bronz gibi bakır alaşımları ve nikel alaşımları kullanılabilir.

Tablo 8. Yay Çeliklerinin Mekanik Özellikleri

Çeliğin standardı			Islah edilmiş durumda mekanik özellikler		
DIN	AISI	GOST	Akma sınırı N/mm ²	Çekme dayanımı N/mm ²	Kopma uzaması %
1.0903(51 Sİ7)	~9255	50S2	1130	1320-1570	6
1.0906(65Si7)	~9260	~60S2	1130	1320-1570	6
1.0902(46Si7)	~9250	-	1080	1270-1470	6
1.0961(60SiCr7)	-	-	1130	1320-1570	6
1.0913(50Mn7)	~C1052	~45G2	1030	1180-1330	6
1.7103(67SiCr5)	~9254	60S2HA	1325	1470-1670	5
1.7176(51Cr3)	5155H	~50Ch6	1180	1370-1620	6

1.7701 (51 CrMoV4)	-	-	1180	1370-1670	6
1.8159(50CrV4)	~6150	50ChGFA	1180	1370-1670	6

Kauçuk Yaylar: Kauçuk yayların sönümlleme faktörleri büyüktür. Bundan dolayı kauçuk yaylar titreşimleri absorbe etmek için kullanılırlar

3.12 Dişli Çark Malzemeleri

Dişli çarklar; çelikler, dökme demirler, demir olmayan metaller, sinter malzemeler, plastik malzemeler gibi çok değişik malzemelerden yapılabilir. Bu malzemelerin her birinin ayrı üstün özelliği vardır.

Tasarımcı dişli çarkı veya malzemesini seçerken; kullanacağı malzemenin bulunabilirliğini, maliyetini, yük taşıma kabiliyetini, üretilebildiğini, dişli boyutunu ve ağırlığını, çalışma sıcaklığını, hızını, yağlama şeklini ve güvenilirliğini dikkate alması gerekir. Dişli çark malzemesinden istenen önemli özellikler; yüzey sertliği, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı, darbeli yüklere dayanım, aşınma ve korozyona karşı dirençtir.

Dişli çarkların en önemli hasar şekilleri, diş dibinden yorularak kırılma ve yüzey basıncı ile yorularak pullanma (pitting) şeklindedir. Çelik içindeki kalıntılar ve gaz boşlukları, yorulma çatlaklarının başlangıcı olduklarından, yüksek dayanımlı dişli çark yapılacak çelikler temiz çelikler olmalıdır. Çeliğin sertliğinin artması, yüzey basıncı yorulma dayanımını artırdığından dolayı dişli çarklar sertleştirilir. Dişli çark komple sertleştirilir ise tokluğu azalır, dişlerin darbeli yüklerde kırılmasına sebep olur. Darbelere dayanıklı güvenilir sertlik 40HRC civarındadır. Dişli-çark komple sertleştirilecek ise bu sertliğin üzerine çıkılmamalıdır. Hem daha fazla sertlik hem de darbelere dayanıklılık istenilmesi durumunda yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmalıdır. Bu nedenle yüksek dayanımlı dişli çarklar, termokimyasal işlemler ile yüzey sertleştirilmesi yapılabilen sementasyon çelikleri, nitrürasyon çelikleri veya bölgesel ısıtma ile (Alev veya indüksiyon ile) yüzey sertleştirilmesi yapılabilen ıslah çeliklerinden yapılır. Yüzey sertleştirme işlemi, yüzey sertliğinin yanında, yüzey tabakasında bası iç gerilmeleri meydana getirir. Bu bası iç gerilmeleri dişin yorulma dayanımının artmasına neden olur.

Yüksek dayanım istenen dişli çarklar, sementasyon çeliği veya ıslah çeliklerinden yapılır. Sementasyon çeliğinden yapılan dişli çarklar, talaşlı işlemde sonra sementasyon, yani karbonlama ve sertleştirme ısıl işlemine tabi tutulurlar.

Dişli çarkların yüzeyi nitrürasyon ile de sertleştirilebilir. Nitrürasyon işleminde elde edilen sertlik derinliği çok az olduğu için ancak küçük modüllü dişlilerde uygun olabilir, büyük modüllü dişlilerde yeterli sertlik derinliği elde edilemez.

Yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan dişli çarkların modül hesabı yapılırken sağlamlaşma faktörü değeri alınmalıdır. Yüzey sertleştirme, bilye bombardımanı, ezerek plastik deformasyon sertleştirme, yüzey kaplama gibi işlemler malzemelerin yorulma dayanımlarını değiştirirler. Bilhassa sementasyonla yüzey sertleştirme yapılan dişlilerde yorulma dayanımı önemli bir şekilde artmaktadır. Bu artışlar sağlamlaşma faktörü K_s ile hesaba katılır.

Dökümle üretilcek, bilhassa büyük modüllü ve boyutlu dişli çarklar için dökme demirler önem kazanmaktadır. Bilhassa, yüzey sertleştirme işlemi uygulanabilen küresel grafitli dökme demirler cazip olmaktadır. Hafif zorlama durumlarında lamel grafitli dökme demirler, ucuzluğu ve işenebilirliğinin kolay olması açısından cazip olabilir. Ucuzluk açısından diğer bir malzeme grubu genel yapı çelikleridir. Genel yapı çeliklerinin, bilhassa dayanımı yüksek olanlarının talaşlı işlemesi dökme demirlere göre daha zordur.

Dişli çarkların diğer bir hasar şekli aşınmadır. Bilhassa, sonsuz vida mekanizması gibi, sürtünmenin fazla olduğu dişli çarklarda aşınma birinci derecede dikkate alınması gereken hasar şeklidir. Sonsuz vida mekanizması gibi sürtünen dişli çark mekanizmalarında, dişlilerden birinin demir dışı malzemeden yapılması gerekir. Bu nedenden dolayı, sonsuz vida karşılık dişlisi yüksek aşınma dayanımına sahip bronzlardan yapılır.

Hafif zorlanan dişli çarklar, bilhassa küçük çapta olanlar plastik malzemelerden yapılır. Plastik malzemeden yapılmış dişli çarkların ses yapma problemi olmadığı gibi yağlama yapmaya da

gerek yoktur. Plastik malzemeler, korozyona dayanıklı, kuru şartlarda sürtünme ve aşınma katsayıları düşük, hafif, ucuz ve kolay şekillendirilmeleri açısından dişli çarklar için cazip malzemelerdir. Dayanım değerleri çeliklere göre azdır, yorulma limiti göstermemeleri ve sürtünme ile hasara uğramaları en büyük eksiklikleridir. Türkiye piyasasında, fiber adıyla satılan fenolik laminat kompozitler, plastiklere göre yüksek bası dayanımından dolayı cazip olmaktadır. Çizelge de dişli çark üretiminde kullanılan plastik malzemeler verilmiştir.

Sinter malzemeler, bilhassa küçük modüllü dişli çarkların seri üretiminde cazip olmaktadır. Makine elemanları ve dişli çark hesapları ile ilgili kaynaklar dişli kalitelerine göre müsaade edilen dayanım değerlerini vermektedir. Bu değerlerin kullanılması durumunda ilgili standartların belirttiği kalitede dişli üretmek gerekir. Üretilmediği durumda hesaplar yanlış yapılmış olur. Burada kaynakların vermiş olduğu dayanım değerlerini vermekle beraber, dayanım hesaplarının nasıl yapıldığı detaylı bir şekilde anlatılacak ve kıyaslama yapılacaktır.

Küresel Grafitli Dökme Demir: Küresel grafitli dökme demir, piyasada sfero döküm olarak da bilinmektedir. Grafitlerin lamelli olması hem gerilme yığılması meydana getirir, hem de taşıyıcı kesiti azaltır. Grafitlerin yumrulaştırılması durumunda malzeme içindeki grafitlerin çentik etkisi azalacak, yükü taşıyan kesit artacaktır. Bu sebepten dolayı küresel grafitli dökme demirlerin dayanımları, kopma uzamaları ve toklukları lamel grafitli dökme demirlere göre yüksektir. Grafitin yumrulaşması (küreleşmesi) için, döküm yapılmadan önce, aşılama potasının içine %0,5 Seryum (Ce) veya %0,5 Mg konulur ve üzerine ergimiş metal dökülür. Küresel grafitli dökme demir çeşitleri ve mekanik özellikleri Çizelgede verilmiştir. Küresel grafitli dökme demirler çelikler gibi sertleştirme, ıslah etme, yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutulabilir.

Tablo 9. TS 526’da verilen küresel grafitli döküm çeşitleri, mekanik özellikleri ve yapısı

Sembol	Çekme Dayanımı (en az) N/ mm ²	Akma sınırı (en az) Rp 0.2 N / mm ²	Kopma Uzaması (en az) A ₅ %	Brinell Sertliği (ençok) BSD	Mikro yapı özellikleri
DDK-40	410	275	12	140-201	Daha çok ferritik
DDK-50	490	345	7	270-241	Ferritik/Perlitik
DDK - 60	590	390	3	192-269	Perlitik/ Ferritik
DDK-70	685	440	2	229 - 302	Daha çok perlitik
DDK-80	785	490	2	248 - 352	Perlitik
DDK-35.3	345	215	22		Ferritik
DDK-40.3	390	245	18		Ferritik

DIN standartlarında DDK yerine GGG harfleri kullanılmaktadır. Türkiye’de, küresel grafitli dökme demirler genellikle GGG gösterimi ile bilinmektedir. Avrupa standartlarında ise EN-GJS sembolü ile gösterilmekte ve çekme dayanımı değerleri MPa cinsinden verilmektedir. ASTM standartları A897-90 ve A897M-90’a göre küresel grafitli dökme demirler, çekme dayanımı, akma sınırı, kopma uzaması değerlerin sırayla yazılması ile verilir. Dayanım değerleri ksi cinsindendir.

Tablo 10. Dişli Çark Üretiminde En Çok Kullanılan çelikleri ve ısıtım işlem

Çelik		Uygulanabilen ısıtım işlem	Önemli özelliği
SAE, AISI	DIN		
1045	Ck45	Komple sertleştirme, indüksiyonla yüzey sertleştirme, alevle yüzey sertleştirme	Sertleşme kabiliyeti zayıf
4130	1.7218 25CrMo4	Komple sertleştirme	Sertleşme kabiliyeti az
4140	1.7225 42CrMo4	Komple sertleştirme, Sertleştirme+Nitrürasyon , indüksiyonla yüzey sertleştirme,	Sertleşme kabiliyeti fena değil
4145		Komple sertleştirme Sertleştirme+Nitrürasyon indüksiyonla yüzey sertleştirme Alevle yüzey sertleştirme	Sertleşme kabiliyeti orta
8640		Komple sertleştirme Sertleştirme+Nitrürasyon indüksiyonla yüzey sertleştirme Alevle yüzey	Sertleşme kabiliyeti orta
4340	1.6565 40CrNiMo 6	Komple sertleştirme Sertleştirme+Nitrürasyon indüksiyonla yüzey sertleştirme Alevle yüzey sertleştirme	Kalın kesitlerde iyi sertleşebilme
Nitrallöy 135 Mod		Sertleştirme+Nitrürasyon	Özel ısıtım işlem gerektirir
Nitrallöy_G		Sertleştirme+Nitrürasyon	Özel ısıtım işlem gerektirir
4150	1.7238 50CrMo4	Komple sertleştirme Sertleştirme+Nitrürasyon indüksiyonla yüzey sertleştirme Alevle yüzey	Sertleşme kabiliyeti iyi fakat, sertleştirme esnasında çatlamaya
4142		Sertleştirme+Nitrürasyon indüksiyonla yüzey sertleştirme Alevle yüzey sertleştirme	4140’a göre daha iyi sertleşme kabiliyeti
1020		Sementasyon	Sertleşme kabiliyeti çok
4118		Sementasyon	Çekirdek sertliği fena
4620		Sementasyon	İyi kabuk sertleştirme
	1.7131	Sementasyon	Çekirdek sertliği fena
8620		Sementasyon	Çekirdek sertliği fena
4320		Sementasyon	İyi çekirdek sertliği
8822		Sementasyon	Kalın kesitlerde iyi
4820		Sementasyon	Sertleştirme kabiliyeti
9310		Sementasyon	Sertleştirme kabiliyeti

NOT:Komple sertleştirme işleminde, sertliğin 40HRC’yi geçmesi durumunda tokluk özellikleri kötüleşir.

Tablo 11. Dişli Çark Üretiminde En Çok kullanılan Plastik Malzemeler

Özellik	Poliamid (Ektrüzyonla üretimiş Nylon 6)	Kestamid (Dökümle üretimiş Nylon 6)	Nylon 6.6 (Ektrüzyonla üretimiş)	Derlin (Asetal) (Ektrüzyonla üretimiş)
Akma dayanımı, MPa	62-90	76-79	76-83	62-69
Çekme modülü, GPa	1,4-2,8	2,4-3,7	2,6-3,2	2,8-3,6
Kopma Uzaması, %	100-320	20-60	60-300	25-40
Basma dayanımı, MPa	69-90	62-105	105	36
Eğme akma dayanımı MPa	34-97	34-110	41-110	90-97
Eğme modülü GPa	2,8	1,4-3,4	1,4-3,1	2,8
İzot darbe dayanımı (oda sıcaklığında). J/cm *	0,53-1,6	0,53-1,6	0,53-1,1	0,53-0,80
Kırılma tokluğu, Kıç MPa m ^{1/2}	2,5-3	2,5-3	2,5-3	4
Poisson oranı	-	-	0,39	0,35
Çelik üstünde sürtünme katsayısı, μ (0,28MPa basınç, dinamik)			0,28	0,21
Yorulma dayanımı (N=10 ⁴), MPa	48 (%30 cam yünü takviyeli)		45	62(%30 cam yünü
Yorulma dayanımı (N=10 ⁷), MPa	40 (%30 cam yünü takviyeli)		36	48(%30 cam yünü
Rockwell sertliği	R90-120	R95-120	R120	M80-90
Isıl iletim katsayısı W/mK	0,17	0,17	0,26	
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶)/°C	9-14	9-16	14	15,3-18
Özgül ısısı. kJ/kg	1,7	1,7	1,7	1,7
Çalışma sıcaklığı, °Ç	79-120	79-120	79-150	91
Üretim sıcaklığı, °O	225-270	-	270-325	170-230
Yumuşama sıcaklığı. °C	50	50	50	
Ergime sıcaklığı, °C	215	215	265	175
Yanma sıcaklığı, °C	450	450	530	
Yoğunluk, g/cm ³	1,12-1,14	1,15	1,13-1,15	1,42
24 saatte su emme oranı %	1,7-1,8	0,6	1,5	0,3

Tablo 12. Alaşımsız ıslah çeliklerinin ıslah edilmiş durumdaki Mekanik Özellikleri

Islah Çelikleri					
Çelik	Mal. No	çap < 16mm veya kalınlık < 8mm		16mm < çap < 16mm veya 8mm < kalınlık < 20 mm	
		Re (akma dayanımı) en az	Rm (çekme dayanımı)	Re (akma dayanımı) en az	Rm (çekme dayanımı)
		N/mm ²		N/mm ²	
C22	1.0402	340	500	290	470
C22E	1.1151		-		-
C22R	1.1149		650		620
C25	1.0406	370	550	320	500
C25E	1.1168		-		-
C25R	1.1163		700		650
C30	1.0528	400	600	350	550
C30E	1.1178		-		-
C30R	1.1179		750		700
C35	1.051	430	630	380	600
C35E	1.1181		-		-
C35R	1.1180		780		750
C40	1.0511	460	650	400	630
C40E	1.1186		-		-
C40R	1.1189		800		780
C45	1.053	490	700	430	650
C45E	1.1191		-		-
C45R	1.1201		850		800
C50	1.0540	520	750	460	700
C50E	1.1206		-		-
C50R	1.1241		900		850
C55	1.0535	550	800	490	750
C55E	1.1203		-		-
C55R	1.1209		900		900
C60	10601	580	850-1000	520	800-950

Tablo 13. Alaşımlı ıslah çeliklerinin ıslah edilmiş durumdaki mekanik özellikleri

Islah Çelikleri					
Çelik	Mal. No	çap < 16mm veya kalınlık < 8mm		16mm < çap < 16mm veya 8mm < kalınlık < 20 mm	
		Re (akma dayanımı) en az	Rm (çekme dayanımı)	Re (akma dayanımı) en az	Rm (çekme dayanımı)
		N/mm ²		N/mm ²	
28Mn6	-	590	800-950	490	700-850
38Cr2	-	550	800	450	700
38CrS2	-		950		850
46Cr2	-	650	900	550	800
46CrS2	-		1100		950
34Cr4	-	700	900	590	800
34CrS4	-		1100		950
37Cr4	-	750	950	630	850
37CrS4	-		1150		1000
41Cr4	-	800	1000	660	900
41CrS4	-		1200		1100
25CrMo4	-	700	900	600	900
25CrMoS4	-		1100		1100
34CrMo4	-	800	1000	650	900
34CrMoS4	-		1200		1100
42CrMo4	-	900	1100	750	1000
42CrMoS4	-		1300		1200
50CrMo4	-	900	1100	780	1000
50CrNiMo4	-		1300		1200
36CrNiMo4	-	900	1100-1300	800	1000-1200
34CrNiMo6	-	1000	1200-1400	900	1100-1300
30CrNiMo8	-	1050	1250-1450	1050	1250-1450
36CrCrMo16	-	1050	1250-1450	1050	1250-1450
NiCrV4	-	900	1100-1300	800	1000-1200

Tablo 14. Nitrürlenebilir çeliklerin ıslah edilmiş haldeki mekanik özellikleri

Nitrürlenebilir çelikler				
Çelik	t<100		100<t<250	
	Re en az	Rm	Re en az	Rm
	N/mm ²		N/mm ²	
31CrMo12	800	1000	700	900
31CrMoV9	800	1000	700	900
15CrMoV5-9	750	900	700	850

34CrAlMo5	600	800	-	-
34CrAlNi7	650	850	600	800

Tablo 15. Semantasyon çeliklerinin sertleştirilmeden sonraki durumdaki mekanik özellikleri

Sementasyon ve Nitrür Çelikleri						
Çelik	çap=11mm		çap=30mm		çap=63mm	
	Re en az	Rm	Re en az	Rm	Re en az	Rm
	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	
C10	380	650	300	500	-	-
C10E		800		650		
C15	430	750	350	600	-	-
C15E		-		-		
C15R		900		800		
17Cr3	750	1050-1400	450	750-1050	-	-
20Cr4	630	900	500	700	400	550
20CrS4		1200		950		800
16MnCr5	630	900	600	800	450	650
16MnCrS5		1200		1100		950
20MnCr5	730	1100	680	1000	550	800
20MnCrS5		1400		1300		1100
20MoCr5	630	900	600	800	-	-
20MoCrS5		1200		1100		
22CrMoS3-5	730	1100-1400	680	1000-1300	-	-
21NiCrMo2	630	900	500	700	400	550
21NiCrMoS2		1200		950		800
15CrNi6	680	1000-1300	630	900-1200	550	800-1100
17CrNiMo6	830	1150-1450	780	1050-1350	680	950-1250

Tablo 16. Bazı Dökme demirlerin mekanik özellikleri

DÖKME DEMİRLER					
Çizelge .1.1 : Dökme demirlerin kısa gösteriliş kuralları (prEN 1560)					
POZİSYONLAR					
1	2	3	4	5	6
EN	GJ	Grafit Yapısı (zorunlu değil)	Mikro / Makro Yapı (zorunlu değil)	Mekanik Özellik veya Kimyasal Bileşim	Ek Semboller (zorunlu değil)
		L lamel grafitli	A östenitik	-xxx enaz R_m (N/mm ²)	A Döküm iç yapısı
		S küresel grafit	F ferritik	ve / veya	H Isıl işlem görmüş
		M temper grafit	P perlitik	- xx enaz A (%)	W Kaynak edilebilir
		V vermiküler	M martenzitik	ve	X Özel iç yapıda
		H grafitli led	L ledeburitik	S Ayn dökülmüş test numunesi	
		X özel yapı	Q su verimisi	A Bitişik dök. num.	
			T ıslah edilmiş	C Parçadan kes. nü.	
			B siyah temper dd	veya	
			W beyaz temper dd	-RT Test sic. + 20 °C	
				-LT Test sic. < -20 °C	
				-Hxx Sertlik (HBS30)	
				veya Kimyasal bileşim	

Yukarıdaki çizelgede verilen 1 - 6 pozisyonlarıyla ilgili açıklamalar

Kısa gösterimin başında zorunlu olarak EN- yazılarak, bu kısa gösterimin Avrupa Standartlarına göre yapılmış olduğu baştan belirtilmiş olur.

Örnek: EN-GJL-10016.2

DÖKME DEMİRLERİN MALZEME NUMARALARI

Çizelge 1.2 : Dökme demirlerin malzeme numaraları kuralları: (prEN 1560)

POZİSYONLAR				
0000	5	6	7	8
EN-J	Grafit Yapısı	Ana Özellik	sınıflandırma	Özel Şartlar
	L lamelli	0. yedek rakam	00 - 09	0. şartları belirlenmemiş
	S küresel	1. çekme dayanımı	10 - 19	1. numune ayrı dökülmüş
	M temper	2. sertlik değeri	20 - 29	2. num. bitişik dökülmüş
	V vermiküler	3. kimyasal bileşimi	30 - 39	3. numune iş parçasından
	H ledeburitik	4. yedek rakam	40 - 49	4. oda sıcaklığı özellikleri
	X özel iç yapı	5. yedek rakam	50 - 59	5. ekşi sıcaklık özellikleri
		6. yedek rakam	60 - 69	6. kaynak kabiliyeti var
		7. yedek rakam	70 - 79	7. döküm iç yapısı
		8. yedek rakam	80 - 89	8. ıslı işlem görmüş
		9 standart dışı malz.	90 - 99	9 önceden belirl. şartlar

LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER (EN 1561)

Çizelge 1.3: Lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları

DÖKME DEMİRLER		Kalınlıklar mm	Çekme Dayanımı R_m		Çekme Dayanımı R_m Mukavemet hesabına esas alınan değer
Kısa Göst.	Malz. No		Numune ayrı döküm	Numune bitişik döküm	
			N/mm ²	N/mm ² , enaz	N/mm ² , enaz
EN-GJL-100	EN-JL1010	> 5 ≤ 40	100 - 200	-	-
EN-GJL-150	EN-JL1020	> 2,5 ≤ 5	150 - 250	-	180
		> 5 ≤ 10		-	155
		> 10 ≤ 20		-	130
		> 20 ≤ 40		120	110
		> 40 ≤ 80		110	95
EN-GJL-200	EN-JL1030	> 80 ≤ 150		100	80
		> 2,5 ≤ 5	200 - 300	-	230
		> 5 ≤ 10		-	205
		> 10 ≤ 20		-	180
		> 20 ≤ 40		179	155
EN-GJL-250	EN-JL1040	> 40 ≤ 80		150	130
		> 80 ≤ 150		140	115
		> 5 ≤ 10	250 - 350	-	250
		> 10 ≤ 20		-	225
		> 20 ≤ 40		210	195
		> 40 ≤ 80		190	170
		> 80 ≤ 150		170	155

Çizelge 1.3: Lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları (devamı)

EN-GJL-300	EN-JL1050	> 10 ≤ 20 > 20 ≤ 40 > 40 ≤ 80 > 80 ≤ 150	300 - 400	250 220 210	270 240 210 195
EN-GJL-350	EN-JL1060	> 10 ≤ 20 > 20 ≤ 40 > 40 ≤ 80 > 80 ≤ 150	350 - 450	290 260 230	315 280 250 225

Çizelge 1.4: Lamel grafitli dökme demirlerin fiziksel özellikleri

(döküm iç yapısı halinde ve ayrı dökülmüş 30 mm çapındaki numune)

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	Birimi	DÖKME DEMİRLERİN KISA GÖSTERİLİŞİ VE MALZ. NUMARALARI				
		EN-GJL- 150 EN-JL1020	EN-GJL- 200 EN-JL1030	EN-GJL- 250 EN-JL1040	EN-GJL- 300 EN-JL1050	EN-GJL-350 EN-JL1060
Yoğunluk ρ	g/cm ³	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Isı Kapasitesi c (20-200 °C) arası (20-600 °C) arası	J/(kg K)				460 535	
Lineer Genleşme Katsayısı α -100 °C ile +20 °C arası 20 °C ile 200 °C arası 20 °C ile 400 °C arası	$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$				10,0 11,7 13,0	
Isı İletim Katsayısı λ (100 °C) de (200 °C) de (300 °C) de (400 °C) de (500 °C) de	W/(m K)	52,5 51,0 50,0 49,0 48,5	50,0 49,0 48,0 47,0 46,0	48,5 47,5 46,5 45,0 44,5	47,5 46,0 45,0 44,* 43,0	45,5 44,5 43,5 42 41,5
Özgül Elektrik Direnci ρ	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	0,80	0,77	0,73	0,70	0,67
Manyetik Akı H_c Enbüyük Manyetik Geçirgenlik μ B=1 T' da Histeriz Kaybı	A/m $\mu\text{H}/\text{m}$ J/m ³				560 - 720 220 - 330 2 500 - 3 000	

Çizelge 1.5: Lamel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları

DÖKME DEMİRLER		Malzeme No	Kalınlık Aralığı mm	Sertlik Değeri
Kısa Gösterilişi				HB30
EN-GJL-H155	EN-JL2010	> 40 ≤ 80	≤155	
		> 20 ≤ 40	≤160	
		> 10 ≤ 20	≤170	
		> 5 ≤ 10	≤185	
		> 2.5 ≤ 5	≤210	
EN-GJL-H175	EN-JL2020	> 40 ≤ 80	100 - 175	
		> 20 ≤ 40	110 - 185	
		> 10 ≤ 20	125 - 205	
		> 5 ≤ 10	140 - 225	
		> 2.5 ≤ 5	170 - 260	
EN-GJL-H195	EN-JL2030	> 40 ≤ 80	120 - 195	
		> 20 ≤ 40	135 - 210	
		> 10 ≤ 20	150 - 230	
		> 5 ≤ 10	170 - 260	
		> 4 ≤ 5	190 - 275	
EN-GJL-H215	EN-JL2040	> 40 ≤ 80	145 - 215	
		> 20 ≤ 40	160 - 235	
		> 10 ≤ 20	180 - 255	
		> 5 ≤ 10	200 - 275	
EN-GJL-H235	EN-JL2050	> 40 ≤ 80	165 - 235	
		> 20 ≤ 40	180 - 255	
		> 10 ≤ 20	200 - 275	
EN-GJL-H255	EN-JL2060	> 40 ≤ 80	185 - 255	
		> 20 ≤ 40	200 - 275	

Çizelge 1.6: Lamel grafitli dökme demirlerin mukavemet değerleri (döküm iç yapısı halinde ve ayrı dökülmüş 30 mm çapındaki numune)

MUKAVEMET DEĞERLERİ	Birimi	DÖKME DEMİRLERİN KISA GÖSTERİLİŞİ VE MALZ. NUMARALARI				
		EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
		Grafitlerin Çevresindeki Mikro Yapı				
		perlit				
Çekme Dayanımı R_m	N/mm ²	150 - 250	200 - 300	250 - 350	300 - 400	350 - 450
% 0,1 Çekme Akma Sınırı $R_{p0.1}$	N/mm ²	98 - 165	130 - 195	165 - 228	195 - 260	228 - 285
Kopma Uzunluğu A	%	0,8 - 0,3	0,8 - 0,3	0,8 - 0,3	0,8 - 0,3	0,8 - 0,3
Basma Dayanımı σ_{BS}	N/mm ²	600	720	840	960	1080
% 0,1 Basma Akma Sınırı $\sigma_{p0.1}$	N/mm ²	195	260	325	390	455
Eğme Dayanımı σ_{eB}	N/mm ²	250	290	340	390	490
Kesme Dayanımı σ_{aB}	N/mm ²	170	230	290	345	400
Burma Dayanımı τ_{iB}	N/mm ²	170	230	290	345	400
Elastisite Modülü E	kN/mm ²	78 - 103	88 - 113	103 - 118	108 - 137	123 - 143
Poisson Sayısı ν		0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Eğmede Tam Değişken Yorulma Dayanımı σ_{SW}	N/mm ²	70	90	120	140	145
Çeki-Basıda Tam Değişken Yorulma Dayanımı σ_{SW}	N/mm ²	40	50	60	75	85
Burulamada Tam Değişken Yorulma Dayanımı τ_{SW}	N/mm ²	70	100	120	145	170
Kırılma Tokluğu K_{IC}	N/mm ^{3/2}	320	400	480	560	650

Bu mukavemet değerleri listesine EN-GJL-100 alınmamıştır. Liste değerleri bulunmadığı zaman aşağıdaki yaklaşımlar alınabilir: $\tau_{SW} \approx 0,42 \tau_{iB}$, $\sigma_{SW} \approx (0,35 - 0,50) R_m$, $\sigma_{eB} \approx 0,53 \sigma_{eW}$, $\sigma_{aB} \approx 0,26 R_m$

TEMPER DÖKME DEMİRLER (EN 1562)

Çizelge 1.7: Beyaz ve siyah temper dökme demirlerin mekanik özellikleri

BEYAZ TEMPER DÖKME DEMİRLER		Numune Çapı d	Enaz Çekme Dayanımı R _m	Enaz % 0,2 Sınırı R _{p0.2}	Enaz Kopma Uzaması A	Brinell Sertlik Değeri
SEMBOL	Malz. No	mm	N / mm ²	N / mm ²	%	HBS30
EN-GJMW-350-4	EN-JM1010	6	300	-	10	230
		9	340	-	5	
		12	350	-	4	
		15	360	-	3	
EN-GJMW-360-12W	EN-JM1026	6	290	-	16	200
		9	320	170	15	
		12	360	190	12	
		15	370	200	8	
EN-GJMW-400-5	EN-JM1030	6	300	-	12	220
		9	360	200	8	
		12	400	220	5	
		15	420	230	4	
EN-GJMW-450-7	EN-JM1040	6	330	-	12	220
		9	400	230	10	
		12	450	260	7	
		15	480	280	4	
SİYAH TEMPER DÖKME DEMİRLER						
EN-GJMB-300-6	EN-JM1110	12 veya 15	300	-	6	≤ 150
EN-GJMB-320-2	EN-JM1120	12 veya 15	320	190	12	≤ 150
EN-GJMB-350-10	EN-JM1130	12 veya 15	350	200	10	≤ 150
EN-GJMB-450-6	EN-JM1140	12 veya 15	450	270	6	150-200
EN-GJMB-500-5	EN-JM1150	12 veya 15	500	300	5	165-215
EN-GJMB-550-4	EN-JM1160	12 veya 15	550	340	4	180-230
EN-GJMB-600-3	EN-JM1170	12 veya 15	600	390	3	195-245
EN-GJMB-650-2	EN-JM1180	12 veya 15	650	430	2	210-260
EN-GJMB-700-2	EN-JM1190	12 veya 15	700	530	2	240-290
EN-GJMB-800-1	EN-JM1200	12 veya 15	800	600	1	270-310

Tablo 17. Genel yapı çeliklerinin mekanik özellikleri

Çizelge 1.4 : Genel yapı çeliklerinin ayrıntılı akma sınırları ve çekme dayanımları (EN 10025)

ÇELİKLER	AKMA SINIRI $R_{eH}^{1)}$ (N/mm ²), enaz								ÇEKME DAYANIMI $R_m^{1)}$ (N/mm ²)			
	Anma Kalınlıkları (mm)								Anma Kalınlıkları (mm)			
	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250	<3	≥3 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤250
S185 ²⁾	185	175	-	-	-	-	-	-	310-540	290-510	-	-
S235JR ²⁾ S235JRG2 ²⁾ S235J0 S235J2G3 S235J2G4	235	225	215	215	215	195	185	175	360-510	340-470	340-470	320-470
S275JR S275J0 S275J2G3 S275J2G4	275	265	255	245	235	225	215	205	430-580	410-560	400-540	380-540
S355JR S355J0 S355J2G3 S355J2G4 S355K2G3 S355K2G4	355	345	335	325	315	295	285	275	510-680	490-630	470-630	450-630
E295 ³⁾	295	285	275	265	255	245	235	225	490-660	470-610	450-610	440-610
E335 ³⁾	335	325	315	305	295	275	265	255	590-770	570-710	550-710	540-710
E360 ³⁾	360	355	345	335	325	305	295	285	690-900	670-830	650-830	640-830

¹⁾ Çizelgedeki çekme dayanımı ve akma sınırı değerleri, hadde yönündeki (l) numuneler için, genişliği ≥ 600 mm olan band, sac ve geniş lamalar için ise hadde yönüne dik (t) numuneler için de geçerlidir.
²⁾ Sadece anma kalınlığı ≤25 mm imal edilir.
³⁾ Normal olarak bu çeliklerden kaynak profilleri (I, U, T, L gibi) üretilmez.

Çizelge 1.5 : Genel yapı çeliklerinin tokluk değerleri (uzun ve yassı mamuller, (EN 10025 : 1993)

ÇELİKLER	MALZEME NO	DEOKSİDASYON TÜRÜ ¹⁾	ÇELİK KALİTE TÜRÜ ²⁾	SICAKLIK °C	ÇENTİK DARBE İŞİ KV (J), enaz Anma Kalınlıkları (mm)
					>10 ≤150 >150 ≤250
S185 ³⁾	1.0035	serbest	BS	-	-
S235JR ³⁾	1.0037	serbest	BS	+20	27
S235JRG1 ³⁾	1.0036	FU	BS	+20	27
S235JRG2	1.0038	FN	BS	+20	27
S235J0	1.0114	FN	QS	0	27
S235J2G3	1.0116	FF	QS	-20	27
S235J2G4	1.0117	FF	QS	-20	27
S275JR	1.0044	FN	BS	+20	27
S275J0	1.0143	FN	QS	0	27
S275J2G3	1.0144	FF	QS	-20	27
S275J2G4	1.0145	FF	QS	-20	27
S355JR	1.0045	FN	BS	+20	27
S355J0	1.0553	FN	QS	0	27
S355J2G3	1.0570	FF	QS	-20	27
S355J2G4	1.0577	FF	QS	-20	27
S355K2G3	1.0595	FF	QS	-20	40
S355K2G4	1.0596	FF	QS	-20	40
E295 ⁴⁾	1.0050	FN	BS	-	-
E335 ⁴⁾	1.0060	FN	BS	-	-
E360 ⁴⁾	1.0070	FN	BS	-	-

¹⁾ Deoksidasyon Türü: FU = Kaynar dökülmüş, FN = Sakın dökülmüş, FF = Çok sakın dökülmüş
²⁾ Kalite Grubu: BS = Temel çelik, QS = Kalite çelik
³⁾ Sadece anma kalınlığı ≤25 mm imal edilir.
⁴⁾ Normal olarak, özel sipariş olmadan bu çeliklerden I, U, T, L gibi kaynak profilleri üretilmez.

Çizelge 1.6 : Genel yapı çeliklerinin kopma uzaması değerleri (uzun ve yassı mamuller)

ÇELİKLER	Deoksidasyon Türü ve Kalite Grubu ¹⁾		Numune Yeri	KOPMA UZAMASI A ₅₀ veya A (%) , enaz							L ₀ = 5,65 √S ₀			
				L ₀ = 80 mm							L ₀ = 5,65 √S ₀			
				Anma Kalınlıkları (mm)							Anma Kalınlıkları (mm)			
				≤ 1	> 1 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2	> 2 ≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3	≥ 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	
S185 ²⁾	sb.	BS	l t	10 8	11 9	12 10	13 11	14 12	18 16	- -	- -	- -	- -	
S235JR ³⁾ S235JRG1 ³⁾	sb. FU	BS BS												
S235JRG2 S235J0 S235J2G3 S235J2G4	FN FN FF FF	BS QS QS QS	l t	17 15	18 16	19 17	20 18	21 19	26 24	25 23	24 22	22 22	21 21	
S275JR S275J0 S275J2G3 S275J2G4	FN FN FF FF	BS QS QS QS	l t	14 12	15 13	16 14	17 15	18 16	22 20	21 19	20 18	18 18	17 17	
S355JR S355J0 S355J2G3 S355J2G4 S355K2G3 S355K2G4	FN FN FF FF FF FF	BS QS QS QS QS QS	l t	14 12	15 13	16 14	17 15	18 16	22 20	21 19	20 18	18 18	17 17	
E295 ³⁾	FN	BS	l t	12 10	13 11	14 12	15 13	16 14	20 18	19 17	18 16	16 15	15 14	
E335 ³⁾	FN	BS	l t	8 6	9 7	10 8	11 9	12 10	16 14	15 13	14 12	12 11	11 10	
E360 ³⁾	FN	BS	l t	4 3	5 4	6 5	7 6	8 7	11 10	10 9	9 8	8 7	7 6	

¹⁾ Çizelgedeki çekme dayanımı ve akma sınırı değerleri, hadde yönündeki (l) numuneler için, genişliği ≥ 600 mm olan band, sac ve geniş lamalar için ise hadde yönüne dik (t) numuneler için de geçerlidir. ²⁾ Sadece anma kalınlığı ≤ 25 mm imal edilir.

³⁾ Normal olarak bu çeliklerden kaynak profilleri (l, U, T, L gibi) üretilmez ⁴⁾ Deoksidasyon Türü: sb = serbest, FU = Kaynar dökülmüş, FN = Sakin dökülmüş, FF = Çok sakın dökülmüş, Kalite Grubu: BS = Temel çelik, QS = Kalite çelik

Çizelge 1.7 : Genel yapı çeliklerinin ençok karbon eşdeğerlikleri (özel teslim koşulu, madde 5)

ÇELİK		Deoksi-dasyon Türü ¹⁾	Kalite Grubu ²⁾	KARBON EŞDEĞERLİLİĞİ CEV (%), ençok ¹⁾		
				Anma Kalınlıkları (mm)		
Kısa Gösterilişi	Malzeme No			≤ 40	> 40 ≤ 150	> 150 ≤ 250
S235JR ³⁾ S235JRG1 ³⁾ S235JRG2 S235J0 S235J2G3 S235J2G4	1.0037 1.0036 1.0038 1.0114 1.0116 1.0117	serbest FU FN FN FF FF	BS BS BS QS QS QS	0,35 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35	- - 0,38 0,38 0,38 0,38	- - 0,40 0,40 0,40 0,40
S275JR S275J0 S275J2G3 S275J2G4	1.0044 1.0143 1.0144 1.0145	FN FN FF FF	BS QS QS QS	0,40 0,40 0,40 0,40	0,42 0,42 0,42 0,42	0,44 0,44 0,44 0,44
S355JR S355J0 S355J2G3 S355J2G4 S355K2G3 S355K2G4	1.0045 1.0553 1.0570 1.0577 1.0595 1.0596	FN FN FF FF FF FF	BS QS QS QS QS QS	0,45 0,45 0,45 0,45 0,45 0,45	0,47 0,47 0,47 0,47 0,47 0,47	0,49 0,49 0,49 0,49 0,49 0,49

¹⁾ Karbon Eşdeğerliliği (Carbon Equivalent) CEV = %C + %Mn / 6 + (%Cr+%Mo+%V) / 5 + (%Ni+%Cu) / 15

²⁾ FU: Kaynar Dökülmüş, FN: Sakin Dökülmüş, FF: Çok Sakin Dökülmüş, BS: Temel Çelikler, QS: Kalite Çelikler

³⁾ Sadece anma kalınlığı ≤ 25 mm imal edilir.

Tablo 18. Alüminyum Alaşımlarına örnekler, Özellikleri ve Kullanım Yerleri

Amerikan alüminyum Birliği (AA) No	Kimyasal kompozisyonu ve üretim şekli	Mekanik özellikleri	Kullanıldığı yerler
1100 Çökeltme Isıl işlemi yapılmayan Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%0,12Cu Tavllanmış	R _m =90 (MPa) R _e =35 (MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=35(MPa) Sertlik=23HB A= 35-45 (%) E=69 (GPa)	Kimyasallara ve atmosfere dayanıklı saf ticari alüminyum. Derin çekmeye uygun, ucuz ve kaynaklanabilir. Depolama tankları, ısı eşanjörleri, reflektörler, kimyasal proseslerde borular vs.
2024 Çökeltme Isıl işlemi yapılabilen Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%4,4Cu +%1,5Mg +%0,6Mn Tabii yaşlandırma yapılmış	R _m =470 (MPa) R _e =325 (MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=140MPa Serlik=120HB A=19-20 (%) E=73 (GPa)	Yüksek dayanım gerektiren yapı elemanları. Korozyona dayanıklı. Uçak parçaları, perçin, araba cantı, dişliler otomobil parçaları, silindirler, pistonlar, bağlama elemanları
3003 Çökeltme Isıl işlemi yapılmayan Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%0,12Cu +%1,2Mn +%0,1Zn Tavllanmış	R _m =110(MPa) R _e =40 (MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=50(MPa) Serlik=28HB A=30-40 (%) E=69 (GPa)	Genel amaçlar için çok uygun, iyi şekillendirilebilir ve kaynaklanabilir. Yakıt tankları, soğutucu borular, zirai ve mimari uygulamalar, Pişirme kapları, basınçlı kaplar, borular,
5052 Çökeltme Isıl işlemi yapılmayan Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%2,5Mg +%0,25Cr Tavllanmış	R _m =195(MPa) R _e =90 (MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=110MPa Serlik=47HB A=25-30 (%) E=70 (GPa)	iyi, kaynak edilebilir ve korozyona dayanıklıdır.deniz ortamında çalışacak depolar, uçak yakıt ve yağ boruları, basınçlı kaplar, fan kanatları, bağlantı elemanları, hastane ve medikal ekipmanlar, pişirme kapları.
6061 Çökeltme Isıl işlemi yapılabilen Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%0,1Mg +%0,6Si +%0,3Cu +%0,2Cr Tabii yaşlandırma yapılmış	R _m =240 (MPa) R _e =145(MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=110MPa Sertlik=65HB A=22-25 (%) E=69 (GPa)	İyi şekillendirilebilir, kaynaklanabilir, korozyona dayanıklı ve ısıtım işlem görmüş durumda dayanımı iyi. Karayolu, demir yolu ve deniz yolu araçlarında, mimaride ziraat aletlerinde uçaklarda, korkuluk, tel,fan kanatları, bağlantı elemanları, mutfak ekipmanları, depolama tankları.
7075 Çökeltme Isıl işlemi yapılabilen Dövme Alüminyum alaşımı	Al+%5,6Zn +%2,5Mg +%1,6Cu +%0,23Cr Suni yaşlandırma yapılmış	R _m =570 (MPa) R _e =505 (MPa) R _{IN} (5x10 ⁸) = 160(MPa) Sertlik=150HB A=11 (%) E=72 (GPa)	Yüksek dayanım isteyen uçak parçaları, makine parçaları ve silah sanayi
295.0 Çökeltme Isıl işlemi yapılabilen Dökme Alüminyum alaşımı	Al+%4,5Cu +%1,1Si Suni yaşlandırma yapılmış	R _m =250 (MPa) R _e =165(MPa) R _{IN} (5x10 ⁸)=52(MPa) Serlik=75HB A=5 (%) E=69 (GPa)	Dişli kutuları, uçak bağlantı elemanları, demiryolu araçları koltuk çerçeveleri, araba cantları

Tablo 19. Bakır Alaşımlarına Örnekler, özellikleri ve kullanım yerleri

Sembol	Bileşimi %	Mekanik Özellikleri				Kullanım yerleri
		Rm MPa	Re MPa	Kopma uza. %	Sertlik HB	
E Elektrolitik bakır	Cu100	Tav.220	Tav.69	Tav.45	Tav.42	Elektrik iletiminde kullanılan teller, perçin, çatı kaplaması, conta
CuZn5	Cu95 Zn5	Sç.390	Sç.350	Sç.5	Sç.114	Bozuk para, mermi kovanı, altın kaplanacak parçalar
Cuzn30	Cu70 Zn30	Tav.300 Sç.525	Tav.75 Sç.435	Tav.68 Sç.8	Sç155	Otomobil radyatörleri, mermi kovanları, avizeler, elektroteknikte kullanılan yaylar
CuZn35 San piriç	Cu65 Zn35	Tav335 Sç520	Tav125 Sç385.	Tav60 Sç15.	Tav55 Sç115	İyi korozyon direnci istenen yerlerde, mimari yapılarda, sıhhi tesisat aksesuarları, elektroteknikte kullanılan yaylar
CuZn35Pb3 Otomat piriçi	Cu62 Zn35,5 Pb2.5	Sç.500	Sç.300	Sç.18	SÇ.80RB	Cıvatalar, somunlar, dişliler, kamalar.
CuBe2 Berilyum bronzu	Cu97, Be1,9 CoO.2	Çs. 1140-1340	Çs. 690-860	Çs.4-10	Çs. 320-400	Yay. kaymalı yatak, valfler. Talaşlı üretim yapılması zor, az miktarda plastik şekil verilebilir.
D-CuSn10 Kalay bronzu	Cu 90 Sn 10	Tav.250	Tav. 130	Tav. 18	Tav.70	Deniz suyu korozyonuna dayanıklı Çok ağır yük altında ve düşük dönme hızındaki yataklar ve burçlar, soğuk hadde yatakları yavaş çalışan ve yüksek dayanım isteyen sonsuz vida çarkı. Vana ve armatür.
D-CuSn12 Kalay bronzu	Cu88 Sn12	Dö.260	DÖ140	Do.7	Dö.80	Çok iyi aşınma mukavemeti, deniz suykorozyonuna dayanıklı. Aşın yüklere dayanıklı yataklar, kızaklar, sonsuz vida karşılık dişlisi, transmisyon cıvatası somunları Vana ve armatür.
D-CuSn5Zn5Pb5 (Kızıl döküm)	Cu85 Sn 5 Zn5 Pb5	Dö.245	Dö.120 I	Do.25	Do.60	Deniz suyu korozyonuna dayanıklı, su buharı armatürleri, pompa çarkları, kaymalı yataklar burçlar
CuNi18Zn17 J Nikel gümüşü	Cu65 Ni18 Pb17	Tav.400 SçSOO	Tav.175 Sç.480	Tav.40 Sç.4	Tav.70 Sç.170	Optik eşyalar, ameliyat ve dişçilik aletleri, fotoğraf makinesi parçaları, madeni süs eşyaları.
CuZn20Ni13Pb 9Sn2 Döküm nikel gümüşü	Cu56,5 Zn20 Pb9 Sn2	Dö.250	Dö.125	Do. 15	Dö.55	Döküm süs eşyaları,
D-CuSn7Pb15 Kurşun bronzu	Cu 88 Pb 15 Sn7	Do. 170	Dö.80	8	60	Yumuşak olup yüksek kaydırma özelliğine sahip, sülfirik aside dayanıklı, yağsız kalma durumlarında ve su ile yağlama yapılabilir.
D-CuAl8 Alüminyum bronzu	Cu92 Aia	Tav.500 Sert735	Tav.175 Ser1450	Tav. 60 Sert7	Tav.80 Sert210	Deniz suyuna, korozyona dayanıklı. Kimya ve gıda sanayisinde kullanılan muhtelif döküm parçaları, bilhassa yüksek mukavemetli aside dayanıklı armatürler

Tablo 20. Çeşitli malzemeler için kritik kırılma tokluğu değerleri

Metaller	K_c (MPa·m ^{1/2})	Akma Dayanımı (MPa)
Alüminum Alaşımı		
2014	18-31	380-470
2020	19-27	525-240
2024	21-37	305-455
2124	21-36	440-460
2219	28-41	340-345
7049	21-38	460-510
7050	25-41	430-510
7075	16-41	395-560
7475	33-44	395-515
7079	24-33	505-540
7178	17-30	470-540
Demirli alaşımlar		
Dökme Demir	6-20	120-290
Roter Çeliği (A533)	204-214	-
Basıncılı Kap Çeliği (HY130)	170	-
Yüksek Mukavemetli çelik	50-154	-
Yumuşak Çelik	140	-
Orta karbonlu Çelik	51	-
4330V	86-110	1315-1400
4340	44-91	1360-1660
D6AC	62-102	1495-1570
9-4-20	132-154	1280-1310
18Ni	50-110	1450-1905
AFC77	79	1530
Titanium Alaşımı Ti ₆ Al ₄ V	77-116	815-875
Beryllium (Be)	4	

Polimerler		Seramikler		Kompozitler	
Malzeme	K_c (MPa·m ^{1/2})	Malzeme	K_c (MPa·m ^{1/2})	Malzeme	K_c (MPa·m ^{1/2})
ABS	4	Electric Porcelain	1	GFRP	20-60
Epoxy	0.3-0.5	Soda Glass	0.7-0.8	CFRP	23-45
Nylon	3	Alumina (Al ₂ O ₃)	3-5	Boron Fiber-Epoxy	46
Polycarbonate	1-2.6			Wood (along grain)	0.5-1
Polyester	0.5	Mineraller		Sentetik malzemeler	
Polyethylene	1-2	Shale	0.6	Cement/Concrete	0.2
Polypropylene	3	Soda Glass	0.7-0.8	Silicon Nitride (Si ₃ N ₄)	4-5
Polystyrene	2	Cement/Concrete	0.2	Cobalt Carbide	14-16
PMMA	0.5-1.75	Granite	3	Tungsten Carbide	14-16

Tablo 21. Sertlik değerlerinin yaklaşık dönüşüm tablosu

Rockwell B	Rockwell C	Vickers	Brinell	Rm (MPa)
		90	86	285
56.2		100	95	320
62.3		110	95	320
66.7		120	114	385
71.2		130	124	415
75		140	133	450
78.7		150	143	480
81.7		160	152	510
85		170	162	545
87.1		180	171	575
89.5		190	181	610
91.5		200	190	640
93.5		210	199	675
95		220	209	705
96.7		230	219	740
98.1		240	228	770
115.1		250	238	800
	23.1	255	242	820
	24.8	265	252	850
	26.4	275	261	880
	27.1	280	266	900
	28.5	290	276	930
	29.2	295	280	950
	31	310	295	995
	32.2	320	304	1030
	33.3	330	314	1060
	34.4	340	323	1095
	35.5	350	333	1125
	36.6	360	342	1155
	37.7	370	352	1190
	38.8	380	361	1220
	39.8	390	371	1255
	40.8	400	380	1290
	41.8	410	390	1320
	42.7	420	399	1350

	43.6	430	409	1385
	44.5	440	418	1420
	45.3	450	428	1455
	46.1	460	437	1485
	46.9	470	447	1520
	47.7	480	456	1555
	48.4	490	466	1595
	49.1	500	475	1630
	49.8	510	485	1665
	50.5	520	494	1700
	51.1	530	504	1740
	51.7	540	513	1775
	52.3	550	523	1810
	53	560	532	1845
	53.6	570	542	1880
	54.1	580	551	1920
	54.7	590	561	1955
	55.2	600	570	1995
	55.7	610	580	2030
	56.3	620	589	2070
	56.8	630	599	2105
	57.3	640	608	2145
	57.8	650	618	2180

4. MAKİNA ELEMANLARINDA MUKAVEMET HESABI

Makine elemanlarında mukavemet hesaplamasının iki amacı vardır.

- ❖ Bir konstrüksiyonda öngörülen elemanın taşıması, iletmesi gereken kuvveti veya momenti, istenilen süre boyunca, emniyetli bir şekilde taşıyabilmesi için hangi malzemeden ve hangi boyutlarda imal edilmesi gerektiğinin bilinmesi
- ❖ İmal edilmiş bir elemanın düşünülen işleme şartları altında hangi kuvvet veya momenti emniyet sınırını aşmadan ne kadar süre taşıyabileceğinin belirlenmesi (maksimum zorlamanın belirlenmesi)'dir.

Makine elemanlarının hesabı genel mukavemet bilgisi ile yapılır. **Mukavemet hesabının amacı;** bir elemanda dış kuvvetlerin doğurduğu zorlamaları hesap yoluyla bulmak ve bunu eleman sınır değerleriyle karşılaştırmaktır.

Bir elemanın mukavemet değerleri, malzemenin mekanik özelliklerine, şekline ve boyutlarına bağlıdır. Emniyetli bir çalışma için bu değerler dış zorlamaların oluşturduğu gerilmelerden belli bir emniyet sağlayacak kadar büyük olmalıdır. Boyutlandırma yapılırken genelde aşağıdaki hususlara dikkat edilir.

- ❖ Sistem yükler altında taşıyıcı özelliği bozmamalı
- ❖ Boyutlandırma ekonomik olmalı
- ❖ Estetik veya ergonomiklik kavramı değerlendirilmeli
- ❖ Emniyetli şekilde boyutlandırılmalı

4.1 MAKİNE ELEMANLARINDA HASARLAR

Makine tasarımı belirli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, belirli bir malzemeden belirli bir şekle sahip bir makinenin gerçekleştirmesi için yapılan işlemleri içerir. Elemanın malzemesi ve şekli gerçekleştirilecek fonksiyonun özelliğine göre belirlenmelidir. Dolayısıyla bir makine elemanı, kendinden beklenen fonksiyonu yerine getiremiyorsa hasara uğramış demektir. Bunun sonucu olarak hasar, makine elemanını tamamen parçalanıp dağılması şeklinde olabileceği gibi hassas bir yüzeydeki küçük bir çizik şeklinde de ortaya çıkabilir.

Makine elemanları bilimi, makine elemanının kullanım süresi boyunca maruz kalacağı etkileri tahmin etmek ve tasarım aşamasında bu yöntemleri göz önüne almak üzere geliştirilmiştir. Yapılacak tahminler tasarımcının deneyimlerine bağlı olarak ne derece doğru olursa yapılan makine elemanı o derece sağlam ve ekonomik olarak elde edilir. Makine elemanları üzerinde çok çeşitli hasar türleri görülebilir.

4.2 EMNİYET KATSAYISI

Makine tasarımında kullanılan malzeme özelliklerine ait bilgiler istatistiksel olarak elde edilmiş bilgilerdir. Buna karşılık çevre şartlarını belirleyen ve gerilmenin hesaplanmasında kullanılan bilgiler de istatistiksel verilere dayanmaktadır. Dolayısıyla her iki bilgi de uygulamada bazı farklılıklar gösterebilecek özellik taşır.

Genel olarak elemene etki eden gerilme, elemanın yapıldığı malzemenin dayanımından küçük ise eleman bu gerilmeyi taşır denilebilir. Buradaki istatistiksel veriler kesin hesaplamaları engellemekte ve işlemlerin bir **emniyet payı içersinde yapılmasını zorunlu hale getirmektedir**. Bu amaçla kullanılan katsayı emniyet katsayısı olarak adlandırılır. Dizayndaki hedef; elemanda oluşacak gerilemeler belirlenen bir sınır değer altında kalmasıdır. Emniyet katsayısı, yük ile gerilmenin orantılı olduğu durumlarda uygulanan gerilme ile dayanım arasındaki ilişkiyi belirleyecek şekilde,

$$\sigma_{em} \leq \frac{Re}{EK} = \frac{\sigma_{AK}}{S}$$

denklemleri ile tanımlanır. Buradaki emniyet katsayısı malzeme bilgisi için gereken emniyet ve yük bilgileri için gereken emniyet paylarının çarpımı olarak toplam emniyet katsayısını belirtmektedir.

Emniyet gerilmesi, bir **yapı** elemanının yapıldığı malzemenin mekanik özelliklerine şekline ve boyutlarına bağlı olarak ve deneysel olarak belirlenen mukavemet değerlerinden hareketle seçilen söz konusu elemanın emniyetle dayanabileceği en üst **gerilme** sınırıdır.

Emniyet katsayısı (EK) veya (S) kendisini belirleyen yük ve malzeme özellikleri ile ilgili bilgilerin kesinlik durumuna ve hasar durumunda ortaya çıkacak olan can ve mal kaybına göre tasarımcının tecrübesine bağlı olarak hesaplanır. Malzeme özellikleri ve yükleme durumu çok iyi biliniyorsa ve hasar durumunda ortaya çıkacak mal kaybı ihmal edilebilir durum ise $EK=1,25$ alınabilir. En kötü durumda emniyet katsayısı 3 ile 4 arasında olabilir. Burkulma gibi durumlarda yük ile gerilme orantılı olmaz. Bu durumda emniyet katsayısının uygulaması daha detaylı analizler gerektirir. Aşağıdaki tabloda çalışma koşullarına bağlı olarak seçilmesi gereken emniyet katsayısı değerleri verilmiştir.

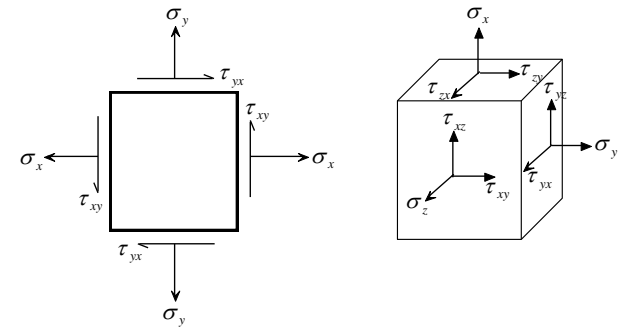
Tablo 22. Çalışma şartlarına bağlı emniyet katsayısı değerleri

Emniyet katsayısı (S)	Malzemelerin özellikleri ve çalışma şartları
1.25.....1.5	Kesinlikle tespit edilebilen kuvvetler ile gerilmelere maruz ve kontrol edilebilen şartlar altında çalışan çok güvenilir malzemeler
1.5.....2	Nispeten sabit çevre şartlarında çalışan, kolayca tespit edilebilen kuvvetler ile gerilmelere maruz ve özellikleri çok iyi bilinen malzemeler
2.....2.5	Normal çevre şartlarında çalışan ve tespit edilebilen kuvvetler ile gerilmelere maruz kalan orta kaliteli malzemeler
2.5.....3	Normal çevre, kuvvet ve gerilme şartları altında çalışan az denenmiş ve kırılğan malzemeler
3.....4	Normal çevre, kuvvet ve gerilme şartları altında çalışan denenmemiş malzemeler. Belirsiz çevre şartlarında çalışan veya belirsiz gerilmelere maruz tanınmış malzemeler için de uygulanır.
≥ 5	Burkulumaya zorlanan malzemeler

4.3 GERİLME İLE HASAR

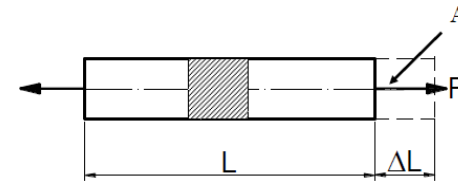
Makine elemanlarındaki en önemli hasar nedeni gerilmedir. Dolayısıyla elemanın tasarımı ilk olarak gerilmeye göre yapılmalıdır. Gerilmenin etki şekline göre farklı tiplerde hasarlar meydana gelir. Aşağıdaki şekilde iki ve üç boyutlu olmak üzere iki farklı gerilme elemanı gösterilmiştir. Üç boyutlu gerilme elemanında x, y ve z yönlerinde normal gerilmeler bulunmaktadır. Aynı zamanda her bir yüzeyde iki tane olmak üzere x, y ve z yönlerinde farklı kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. İki boyutlu elemanda ise, x-y yönünde

normal ve kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Elemanın her bir yüzeyinde x ve y ye bağlı olarak tek kayma gerilmesi oluşmaktadır. Bir çok durumda üçüncü boyuttaki gerilmeler ihmal edilerek sadece 2 boyutlu gerilmelerin incelenmesi yeterli olmaktadır. 2 boyutlu durumda z doğrultusundaki durum ya gerilmelerin sıfıra eşit olduğu bir durumdur, ya da şekil değiştirmelerin sıfıra eşit olduğu bir durumdur. Birinci durum düzlemsel gerilme durumu olarak adlandırılır. İkinci durum ise düzlemsel şekil değiştirme durumu olarak adlandırılır. Düzlemsel şekil değiştirme durumunda z doğrultusundaki normal gerilmeler diğer düzlemdeki normal gerilmelere bağlı olarak hesaplanır.



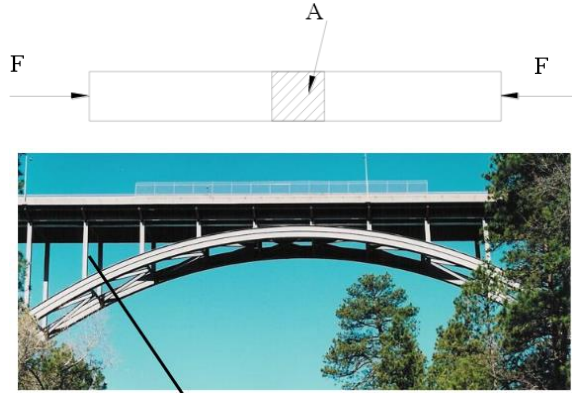
İki ve Üç Boyutlu Gerilme Elemanı

Çekme gerilmesi; Bir elemana aynı eksen doğrultusunda ve ters yönde kuvvet etkimesinde elemanın kritik kesitinde meydana gelen normal gerilmedir.



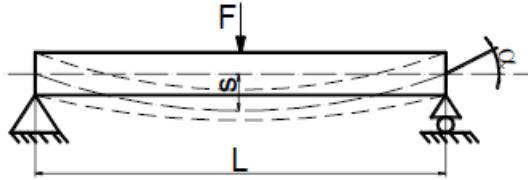
$$\sigma_{\epsilon} = \frac{F}{A} \leq \sigma_{\epsilon(em)}$$

Basma gerilmesi, bir elemana aynı eksen doğrultusunda ve aynı yönde kuvvet etkimesinde elemanın kritik kesitinde meydana gelen normal gerilmedir.



$$\sigma_b = \frac{F}{A} \leq \sigma_{b(em)}$$

Eğilme gerilmesi, iki ucu serbest mesnetli veya bir ucu ankastre kirişler bir kuvvete maruz kaldığında eğilme momenti etkisi altında eğilme gerilmesine maruz kalmaktadır.

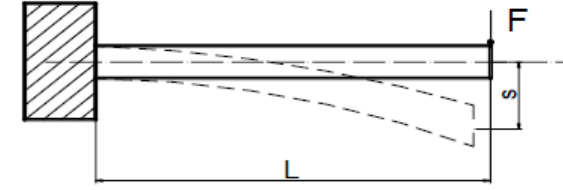


$$\sigma_e = \frac{M_e}{W_e} = \frac{F.l}{W_e} \leq \sigma_{e(em)}$$

$$\text{Yapıda meydana gelen sehım veya çökme; } s = \frac{Fl^3}{48EI}$$

$$\text{Açısal şekil değıştirme; } \alpha = \frac{Fl^2}{16EI}$$

Ankastre kiriş şeklinde bir yapıda ise;

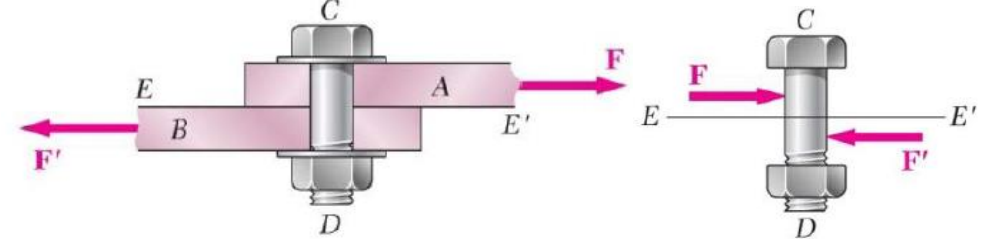


$$\text{Eğilmeyle birlikte oluşan gerilme değeri; } \sigma_e = \frac{M_e}{W_e} = \frac{F.l}{W_e} \leq \sigma_{e(em)}$$

$$\text{Yapıda meydana gelen sehım veya çökme; } s = \frac{Fl^3}{3EI}$$

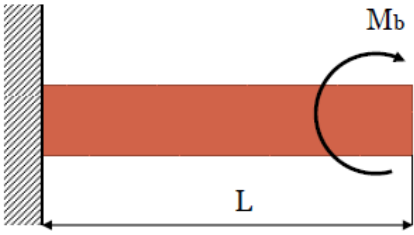
$$\text{Açısal şekil değıştirme; } \alpha = \frac{Fl^2}{2EI}$$

Makaslama (kesme) gerilmesi



$$\tau_k = \frac{F}{A} \leq \tau_{k(em)}$$

Burulma gerilmesi, dönen eleman, dönme eksenı boyunca döndürme momenti etkisinde burulmaya maruz kalarak kayma gerilmesi ile yüklenmektedir.



Oluşan gerilme değeri; $\tau_b = \frac{M_b}{W_e} \leq \tau_{b(em)}$ burulma açısı; $\theta = \frac{M_b l}{GI_p}$

4.3.1 Statik Olarak Etki Eden Gerilme

Makine elemanına yavaşça uygulanan ve makine elemanının kullanma süresi boyunca üzerine etki eden gerilmenin büyüklüğü 1000 defadan fazla değişmeyen yükleme durumları statik olarak adlandırılır. Bu gerilme altında şu hasarlar meydana gelir.

- ❖ Kırılma veya plastik şekil değiştirme
- ❖ Gevrek kırılma
- ❖ Sünme veya sürünme
- ❖ Elastik kararlılığın (stabilite) bozulması
- ❖ Elastik çökme
- ❖ Rezonans

4.3.2 Tekrarlı Yükleme Durumu

Elemanın üzerine etki eden gerilmeler kullanım süresi boyunca 1000 kereden fazla değişiyorsa buna tekrarlı yükleme durumu denir. Bu gerilme altında iki farklı hasar tipi ortaya çıkar.

- ❖ Yorulma
- ❖ Aşınma

4.3.3 Darbeli Yükleme Durumu

Darbeli yükleme gerek statik gerekse tekrarlı olarak etki eden gerilmelerin şiddetini artıran yönde etki eder. Örneğin yavaşça etki ettirilen bir statik yük aynı eleman üzerine çok düşük bir mesafeden serbest düşme ile çarpışacak şekilde etki ettirilirse eleman üzerinde iki katı büyüklüğünde gerilmenin oluşmasına neden olur. Tekrarlı yüklemede de benzeri bir konu söz konusudur.

4.3.4 Diğer Hasarlar

Korozyon, aşınma ve yüzey ezilmesi gibi hasarlardır.

4.4 KIRILMA VEYA PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRMEYLE MEYDANA GELEN HASAR

Gevrek malzemeler kırılarak, sünek malzemeler ise plastik şekil değiştirerek (Akma) hasara uğrarlar. Malzemelerin sünek veya gevrek oluşu çekme deneyinden yaklaşık olarak belirlenebilir. Toplam şekil değiştirme %5 e kadar olan malzemeler gevrek daha fazla olan malzemeler ise sünek sayılır. Genel gerilme durumunda malzemelerin hangi şartlarda hasara uğrayacağı konusunda bir çok teori ortaya atılmıştır.

4.4.1 Maksimum Normal Gerilme (Rankine) Teorisi

Bu teoriye göre bir makine elemanında meydana gelen mutlak değerce maksimum gerilme değeri çekme veya basma deneyinden elde edilen, hasar anındaki gerilme değerine ulaştığında makine elemanında hasar başlar. Bu teorinin çekmedeki ve basmadaki maksimum gerilme değeri eşit olan gevrek malzemeler için doğru sonuçlar verdiği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Maksimum normal gerilmesi teorisini aşağıdaki biçimde yazabiliriz.

$$\max|\sigma_1 \text{ veya } \sigma_3| \leq \frac{Rm}{EK}$$

burada iki boyutlu yükleme durumu için $\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$ ile hesaplanır.

4.4.2. Mohr Teorisi

Çekme ve basmadaki maksimum gerilme değerleri, önemli ölçüde fark gösteren malzemeler için ortaya atılmış bir teoridir. Genellikle gevrek malzemeler için uygulanan bu teorideki gerilme durumları,

$$\begin{aligned} \text{a) } \sigma_2 > 0 \text{ ise } \sigma_1 &\leq \frac{R_{m\sigma}}{EK} \\ \text{b) } \sigma_2 = 0 \text{ ise } \frac{\sigma_1}{R_{m\sigma}} + \frac{\sigma_3}{R_{mb}} &\leq \frac{1}{EK} \\ \text{c) } \sigma_2 < 0 \text{ ise } |\sigma_3| &\leq \frac{|R_{mb}|}{EK} \end{aligned}$$

şeklinde yazılabilir. σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmeler olarak adlandırılır. Bu gerilmelerin bulunduğu düzlemlerde kayma gerilmesi bulunmamaktadır. Asal gerilmeler düzlemsel gerilme durumu için maksimum normal gerilme teorisinde verilmiş olan maksimum ve minimum gerilmelerin hesaplandığı formül sonuçlarına göre aşağıdaki tablodan belirlenir.

$\sigma_{\max} > \sigma_{\min} > 0$	$\sigma_1 = \sigma_{\max}, \sigma_2 = \sigma_{\min}, \sigma_3 = 0$
$\sigma_{\max} > 0 > \sigma_{\min}$	$\sigma_1 = \sigma_{\max}, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \sigma_{\min}$
$0 > \sigma_{\max} > \sigma_{\min}$	$\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_{\max}, \sigma_3 = \sigma_{\min}$

4.4.3 Maksimum Kayma Gerilmesi (Tresca) Teorisi

Bu teoriye göre makine elemanı üzerindeki bulunan en büyük kayma gerilmesi değeri, malzemenin çekme deneyindeki hasara uğradığı anda üzerinde bulunan kayma gerilmesi değerine ulaştığında hasar meydana gelir. Başka bir ifadeyle Tresca'ya göre, genel çok boyutlu gerilme durumlarında, akmanın meydana gelmesi için maksimum kayma gerilmesinin kritik bir değere ulaşması gerekmektedir. Deneyler bu teorenin bir çok sünek malzeme için uygun sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu teorenin bir diğer ismi Tresca teorisi olarak bilinmektedir. Bu teori aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \frac{R_e}{EK}$$

yukarıdaki ifadede eğer gerilmelerden herhangi birisi sıfır olursa maksimum normal gerilme teorisi elde edilmiş olur. Asal gerilmeler yerine iki boyutlu durum için gerilmeler yazıldığında,

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq \frac{R_e}{EK}$$

elde edilir.

2.3.4. Biçim Değiştirme Enerjisi (Von Mises) Teorisi

Bu teoriye göre makine elemanı üzerindeki gerilmelerin neden olduğu biçim değiştirme enerjisinin büyüklüğü çekme deneyinde akma noktasında meydana gelen biçim değiştirme enerjisine ulaştığında hasar gerçekleşir. Deneysel çalışmalar sünek malzemeler için daha düşük bir güvenlik sağlamasına rağmen daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu teori Von Mises Teorisi olarak da adlandırılmaktadır. 3 boyutlu durum için matematiksel ifadesi,

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \leq \frac{R_e}{EK}$$

şeklindedir. Asal gerilmelerden bir tanesi örneğin $\sigma_3 = 0$ ise, Von-Mises teorisini aşağıdaki biçimde yazabiliriz.

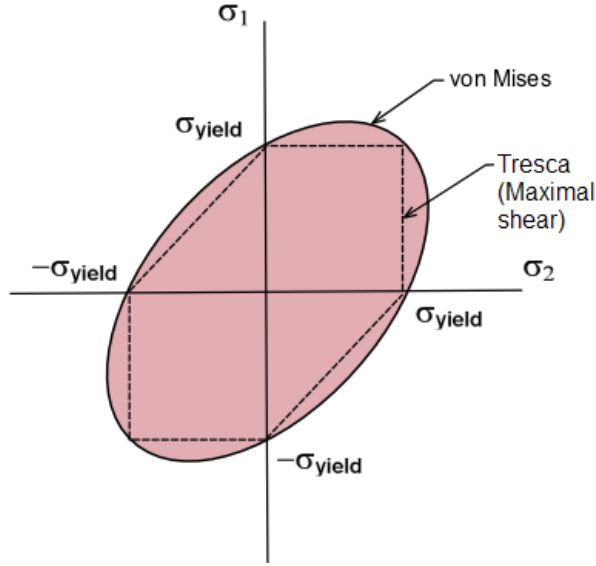
$$\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)} \leq \frac{R_e}{EK}$$

bu formülde, asal gerilmeler yerine iki boyutlu durumdaki normal gerilmeler yazılırsa,

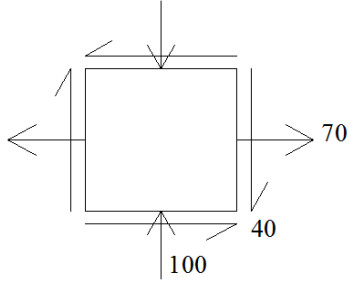
$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq \frac{R_e}{EK}$$

elde edilir. Von Mises teorisi genellikle sünek malzemeler için kullanılan bir teoridir.

Tresca ve Von Mises teorilerinin grafiksel olarak yorumlanması ise aşağıda verilmiştir.



Çözümlü Soru 1;



Şekilde verilen gerilme elemanı bir makine parçasından çıkarılmıştır. Aşağıdaki durumlar için emniyet katsayısını hesaplayarak makine elemanında hasarın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini EK=2 için belirleyiniz.

$$\sigma_x = 70 \text{ MPa} \quad \sigma_y = 100 \text{ MPa} \quad \tau_{xy} = 40 \text{ MPa}$$

- Çekme ve basmadaki maksimum gerilme değeri 300 MPa olan gevrek bir malzeme ;
- Çekmedeki maksimum gerilme değeri 200 MPa, basmadaki maksimum gerilme değeri 400 MPa olan gevrek malzeme;
- Akma dayanımı 300 MPa olan sünek malzeme ; durumlarını bulunuz.

Problem iki boyutlu bir yükleme durumunu temsil etmektedir. İlk olarak yapıda oluşacak maksimum ve minimum gerilme değerleri hesaplanır.

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{70 + (-100)}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{70 + 100}{2}\right)^2 + 40^2}$$

$$\sigma_{\max} = 78,94 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_1 \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_{\min} = -108,94 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_3$$

a) Çekme ve basma anında maksimum gerilme değeri eşit olduğundan Rankine teorisi kullanılabilir.

$$\max|\sigma_1 \text{ veya } \sigma_3| \leq \frac{R_m}{EK} ; 108,94 \leq \frac{300}{EK} \Rightarrow EK = 2,75 \text{ Parça hasara uğramaz.}$$

b) Gevrek malzeme için çekme ve basmada gerilme farklı olduğundan Mohr Teorisi kullanılabilir.

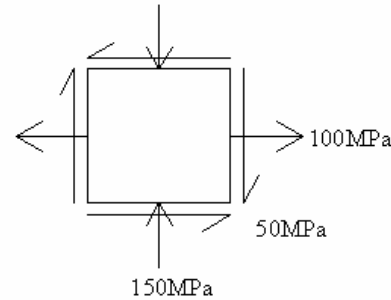
$$\frac{\sigma_1}{R_{mç}} + \frac{\sigma_3}{R_{mb}} \leq \frac{1}{EK} \quad \frac{78,94}{200} + \frac{-108,94}{-400} \leq \frac{1}{EK}$$

$$EK \geq 1,49 \text{ Hasar gerçekleşir.}$$

c) Sünek malzemeler için Tresca ile çözersek;

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \frac{R_e}{EK} \quad 78,94 - (-108,94) \leq \frac{300}{EK} \quad EK \geq 1,59 \text{ Hasar gerçekleşir.}$$

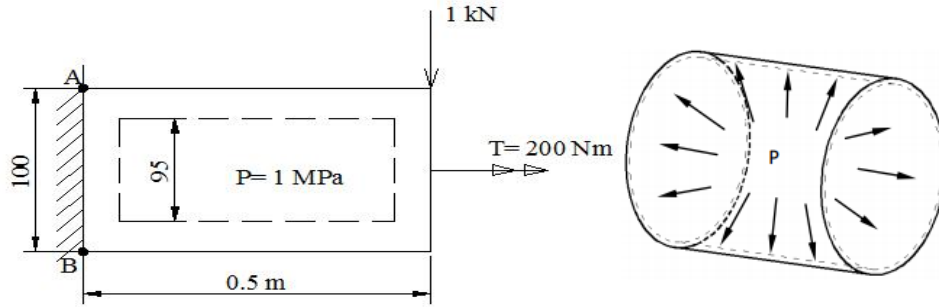
Örnek;



Bir makine parçasının kritik bir noktasında şekildeki gibi bir gerilme elemanı çıkarılmıştır. Emniyet katsayısı EK=2 için aşağıdaki durumları araştırınız.

- Makine elemanının malzemesi $R_m = 200MPa$ olan gevrek bir malzeme olması durumu için
- Makine elemanı malzemesinin $R_{m\sigma} = 200MPa, R_{mb} = 300MPa$ olan bir malzemeden yapılması durumu için;
- Akma dayanımı 200MPa olan sünek malzeme için tespit ediniz.

Örnek;



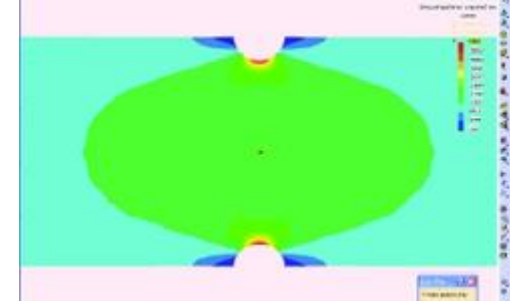
Şekilde verilen ankastre kiriş şeklindeki depo sünek bir malzemeden yapılacaktır. Emniyet katsayısı 2 olması istendiğine göre genel yapı çeliklerinden bir malzeme seçiniz. Depo ince cidarlıdır.

4.5 GERİLME KONSANTRASYONLARI

Gerilme ile ilgili temel formülasyon cisimlerin dayanımı dersinde gerilme hesabı yapılan kesitlerde geometrik süreksizlik bulunmaması şartına bağlı olarak elde edilmiştir. Kesitte süreksizlik bulunduğu zaman formüllerle elde edilen değerler hatalı sonuçlar verir. Yapılan deneysel ve bilgisayar modellemesine dayalı çalışmalar kesitteki gerilme dağılımının ortalama bir gerilme değerine göre belirli katsayılarla çarpılarak hesaplanabileceğini göstermiştir.

Hasarlar süreksizlik civarında başlamaktadır. Bu nedenle süreksizliklerin gerilme konsantrasyonuna (yığılma) neden olduğu belirlenmiştir. Makine elemanları açısından en

tehlikeli durum dikkate alındığı için yalnızca kesitteki maksimum gerilmenin bilinmesi yeterlidir. Bu değerleri elde etmek için gerekli katsayı grafikler halinde verilmiştir.



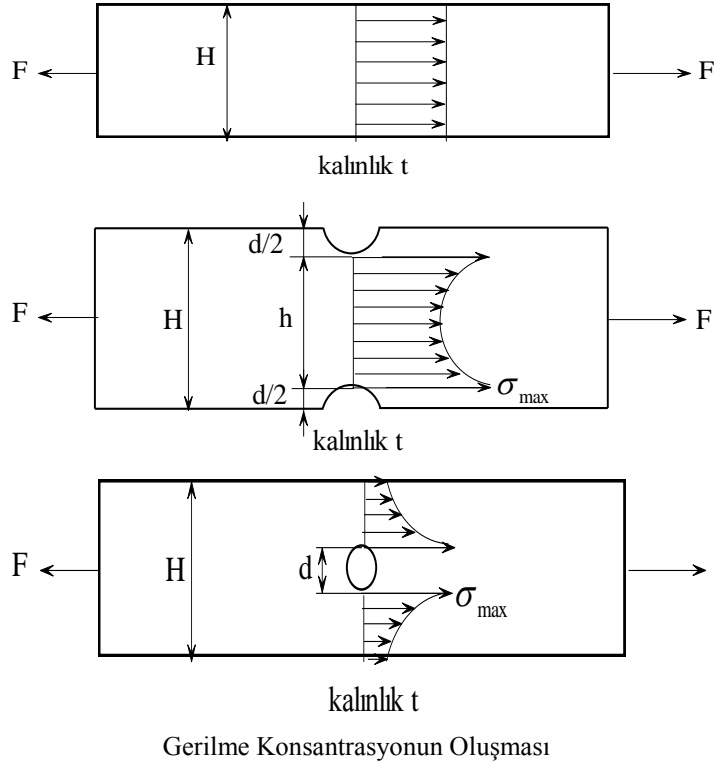
Gerilme konsantrasyonları yüklemenin statik ve tekrarlı olması durumuna göre ve malzemenin sünek ve gevrek olmasına göre farklı şekillerde kullanılır.

Statik yükleme durumunda, sünek malzemeler şekil değiştirme sertleşmesine uğrayarak mukavemetleri arttığı için K_t değeri dikkate alınmaz. Ayrıca meydana gelen şekil değiştirme süreksizlik civarında bası şeklinde artık gerilmelere neden olduğu için hasar oluşumu gecikir.

Gevrek malzemelerde ise genellikle malzeme yapısı içinde doğal olarak çentik ve çatlak etkisi gösteren kusurlar bulunur. Bu kusurların miktarına bağlı olarak her bir malzeme iç yapısından kaynaklanan süreksizliklere farklı tepki verir. Bu nedenle gevrek malzemeler için çentik hassasiyeti (q) tanımlaması yapılmıştır. Bu katsayı sonradan açılan çentiklerin malzemenin hasarında ne kadar etkili olduğu belirleyen ve gevrek malzemeler için 0,3-0,5 arasında değişen bir katsayıdır. Katsayı dikkate alındığında teorik gerilme yığılma katsayısı yerine çentik katsayısı (K_σ) kullanılır ve

$$K_\sigma = 1 + q(K_t - 1)$$

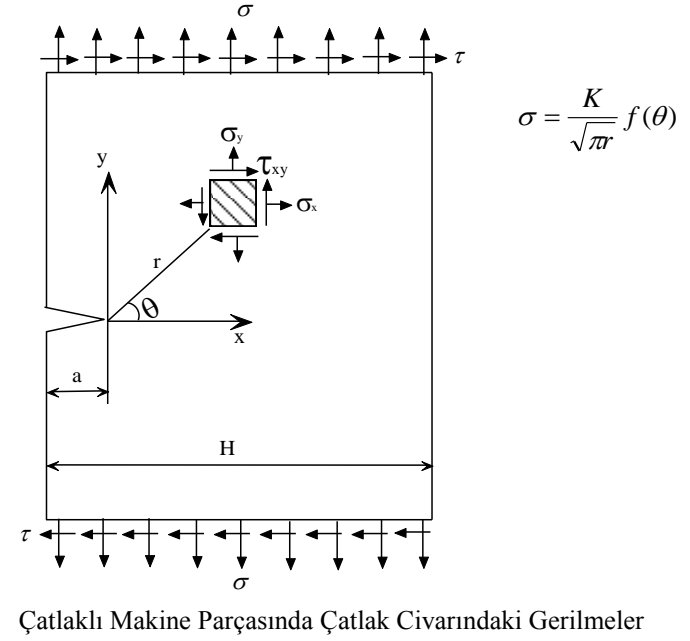
biçimde ifade edilir. Burada q çentik hassasiyeti, K_t ise teorik gerilme konsantrasyon katsayısı olarak tanımlanır.



$$\sigma_{anma} = \frac{F}{th}$$

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{anma}}$$

$$h = H - d$$



Formülde σ çatlak civarındaki gerilmelerdir ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$), K gerilim şiddet faktörü ve $f(\theta)$ ise, θ 'ya bağlı bir fonksiyondur.

Çatlak civarındaki gerilmeler gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılan geometriye ve yükleme durumuna bağlı olarak değişen bir katsayı ile doğru orantılıdır. Bu katsayı genel olarak;

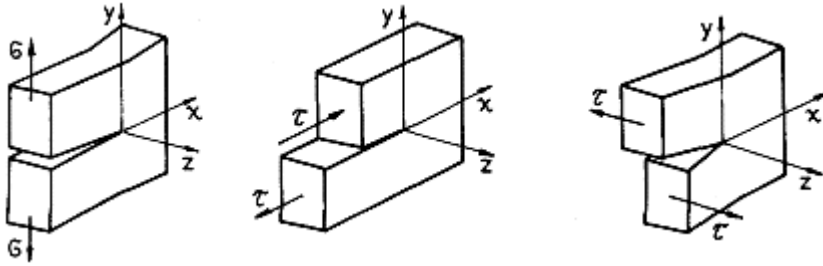
$$K = \sigma_f \left(\frac{a}{H} \right)$$

formülü ile hesaplanır. Çatlak boyu ve levha genişliğine bağlı olan fonksiyon bazen formül ile bazen tablodan seçilecek bir değer olarak bazen de grafiksel olarak literatürden elde edilebilir. Gerilme şiddet faktörü tasarım eşitliğinin bir tarafı olarak hesaplamalar ile elde edilir. Tasarımın doğruluğunu kontrol etmek için gerekli olan malzeme özelliği kırılma tokluğu olarak adlandırılır ve K_c ile gösterilir. K_c değeri deneysel olarak elde edilir. Çatlağın geometrisi ve yükleme durumuna göre analizde kolaylık sağlaması açısından kırılma mekanik problemi üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar mod olarak adlandırılır.

Mod I: Açılma modu olup yükleme etkisiyle çatlakın karşılıklı yüzeyleri birbirinden ayrılmaya çalışır. Genelde kırılma mekaniği problemleri bu moda uymaktadır.

Mod II: Kayma modu olup yüzeyler birbiri üzerinden kaymağa çalışır. Buda ikinci dereceden sık karşılaşılan bir problemdir. Bazı durumlarda Mod I durumu ile beraber bulunabilir.

Mod III: Yırtılma modudur. Şekil de bu üç türlü kırılma mod şekilleri gösterilmiştir.



Açılma, Kayma ve yırtılma Modları

Kırılma mekaniği problemlerinde probleme sebep olan mod belirlendikten sonra statik yükleme için iki soruya cevap aranır.

- ❖ Bu geometri ve yükleme durumu için bu elemanda bulunabilecek en büyük çatlak uzunluğu ne olabilir. Çatlak uzunluğu belirlendikten sonra çeşitli muayene yöntemleri kullanılarak elemanda daha büyük bir çatlakın bulunmaması sağlanır.
- ❖ Belirli bir geometri ve çatlak boyuna sahip olan bir makine elemanı en fazla hangi yükü taşıyabilir.

Sünek malzemeler çatlak bulundursalar bile bazen gevrek kırılmayla değil plastik şekil değiştirmeye hasara uğrayabilirler. Bu nedenle bu tip makine elemanlarını hem gevrek kırılma açısından hem de plastik şekil değiştirme açısından kontrol etmek gerekir.

Malzemelerin kırılma toklukları akma sınırları ile ters orantılıdır. Akma sınırı arttıkça kırılma tokluğu azalır.

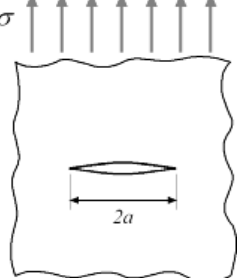
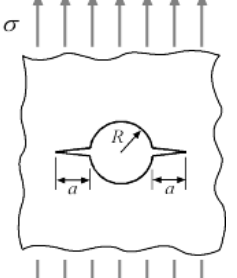
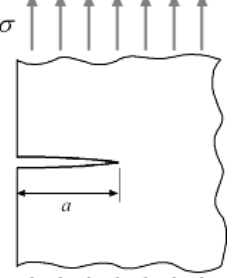
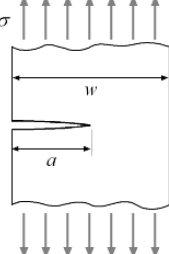
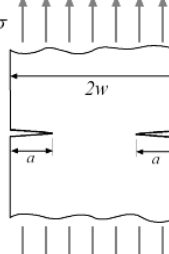
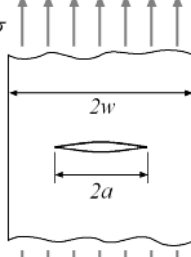
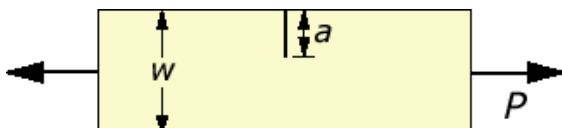
Tablo 23. Bazı Malzemelerin Kırılma Toklukları ve Akma Sınırları

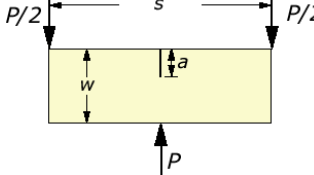
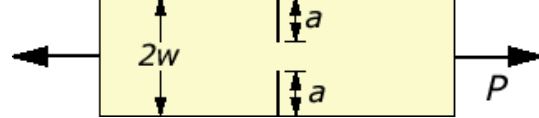
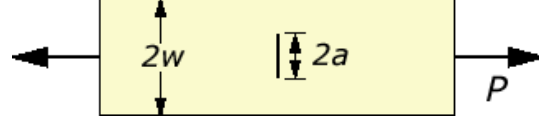
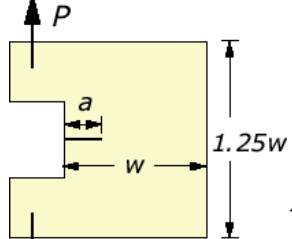
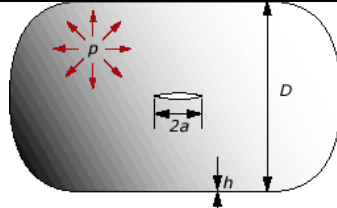
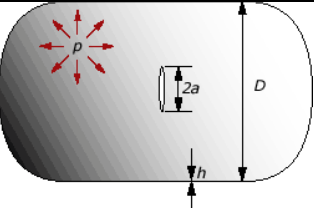
MALZEME	KIRILMA TOKLUĞU $K_{ic} [MPa\sqrt{m}]$	AKMA SINIRI $R_e [MPa]$
Saf demir	80	50
7075 alüminyum alaşım	24	495
Dökme demir EN GJS 700-2	15	420
Dökme demir EN GJS 400-18	30	240
4340 çeliği (425°C temperlenmiş)	87	1420
4340 çeliği (260°C temperlenmiş)	50	1640
Bakır	>100	75
Yüksek karbonlu çelik	50	350
Yumuşak çelik	140	220
Pirinçler	30-100	200

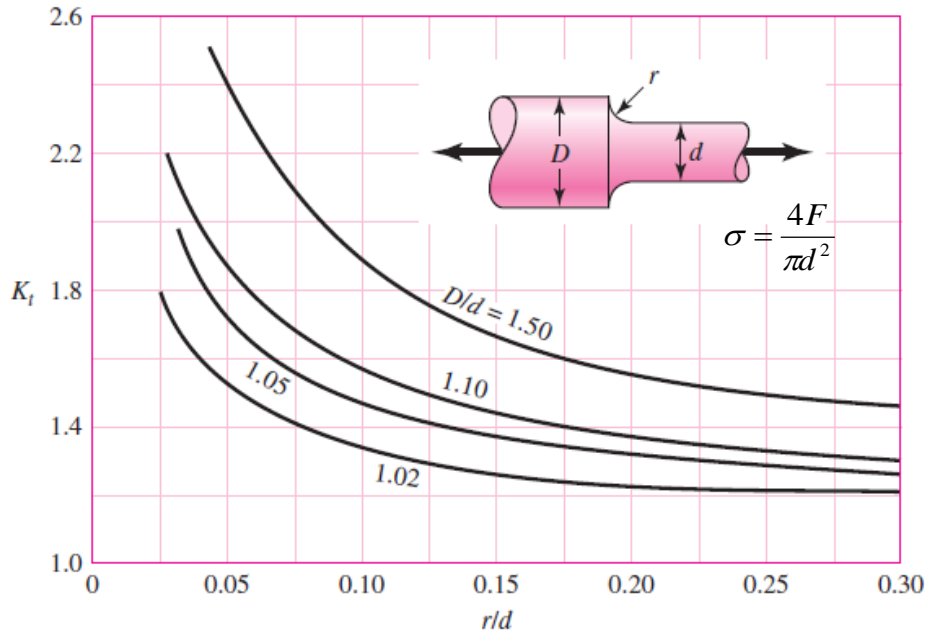
Kırılma tokluğu ve akma sınırına bağlı olarak numune kalınlığı $B \geq 2.5 \left(\frac{K_{ic}}{R_e} \right)^2$ eşitliğini

sağlamalıdır. Gevrek kırılma için hasar kriteri, $K_I \leq \frac{K_{ic}}{EK}$ şeklinde ifade edilebilir.

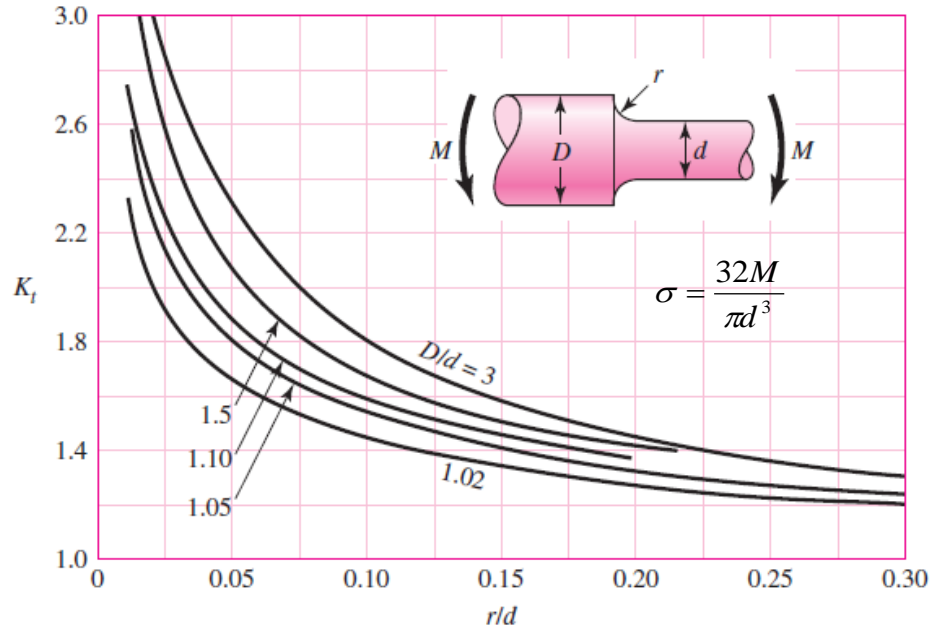
YÜKLEME DURUMLARINA GÖRE GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ FORMÜLLER

 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$	 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[1 + 2.365 \left(\frac{R}{R+a} \right)^{2.4} \right]$	 $K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a}$
 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2w}{\pi a} \tan \left(\frac{\pi a}{2w} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{0.752 + 2.02 \frac{a}{w} + 0.37 \left(1 - \sin \left(\frac{\pi a}{2w} \right) \right)}{\cos \left(\frac{\pi a}{2w} \right)} \right]$	 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2w}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\tan \left(\frac{\pi a}{2w} \right) + 0.1 \sin \left(\frac{\pi a}{w} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$	
 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\frac{2w}{\pi a} \tan \left(\frac{a}{2w} \right) \right]^{1/2}$	 $K_I = \frac{P}{B \sqrt{w}} \left[\frac{\sqrt{2 \tan \left(\frac{\pi a}{2w} \right)}}{\cos \left(\frac{\pi a}{2w} \right)} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{w} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \left(\frac{\pi a}{2w} \right) \right)^3 \right] \right]$	

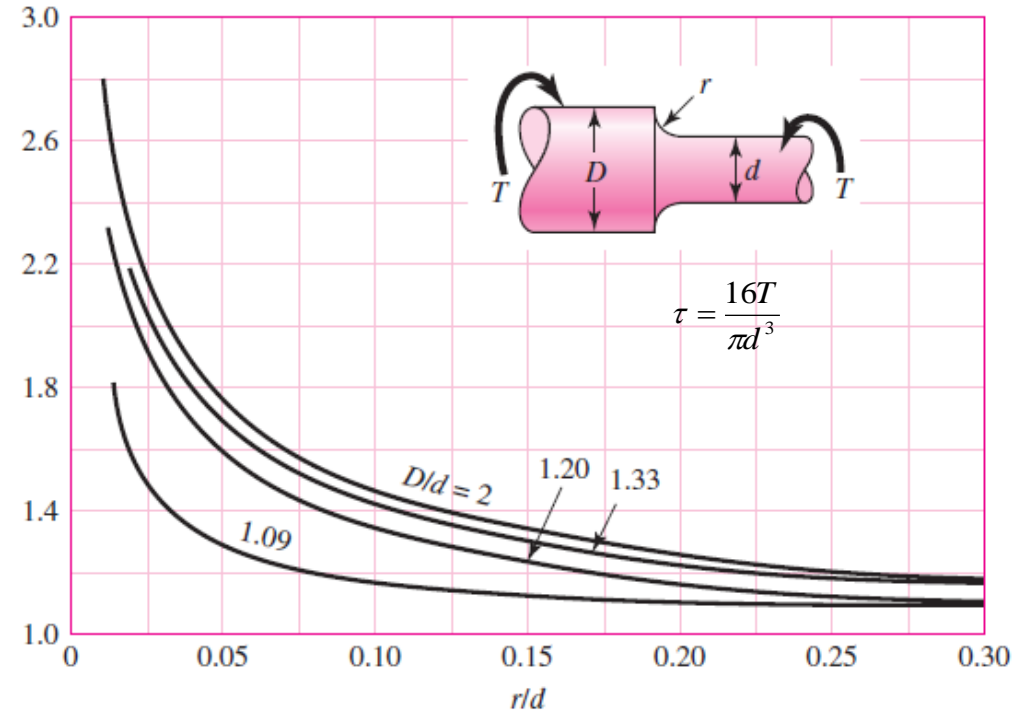
	$K_I = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left\{ \frac{3 \frac{s}{w} \sqrt{\frac{a}{w}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{w} \right) \left(1 - \frac{a}{w} \right)^{\frac{3}{2}}} \left[1.99 - \frac{a}{w} \left(1 - \frac{a}{w} \right) \left[2.15 - 3.93 \frac{a}{w} + 2.7 \left(\frac{a}{w} \right)^2 \right] \right] \right\}$
	$K_I = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left\{ \frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2w}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{w}}} \left[1.122 - 0.561 \frac{a}{w} - 0.205 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 0.471 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 0.190 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] \right\}$
	$K_I = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left\{ \sqrt{\frac{\pi a}{2w} \sec \left(\frac{\pi a}{2w} \right)} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] \right\}$
	$K_I = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left\{ \frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w} \right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.866 + 4.64 \frac{a}{w} - 13.32 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{w} \right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] \right\}$
	$K_I = \frac{pD}{2h} \sqrt{\pi a} \left[1 + 3.22 \frac{a^2}{Dh} \right]^{\frac{1}{2}}$
	$K_I = \frac{pD}{4h} \sqrt{\pi a} \left[1 + 1.12 \frac{a}{\sqrt{Dh}} \left(1 - e^{\left(-1.54 \frac{a}{\sqrt{Dh}} \right)} \right) \right]$



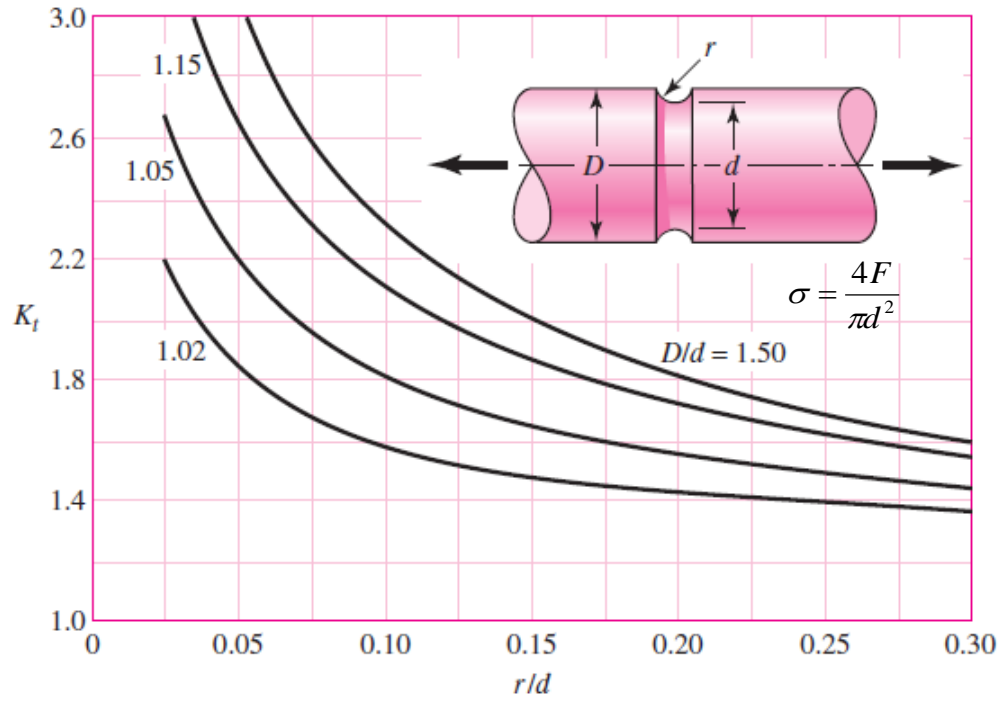
Şekil: Faturalı bir milde çekme zorlanmasında gerilme yığılma faktörü değerleri



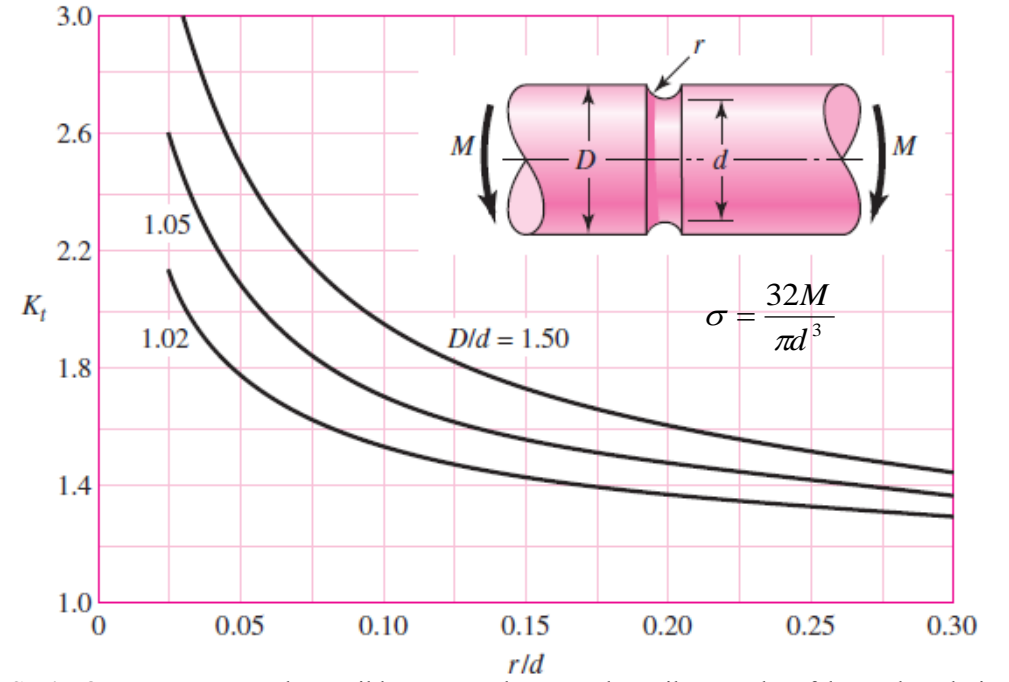
Şekil: Faturalı bir milde eğme zorlanmasında gerilme yığılma faktörleri



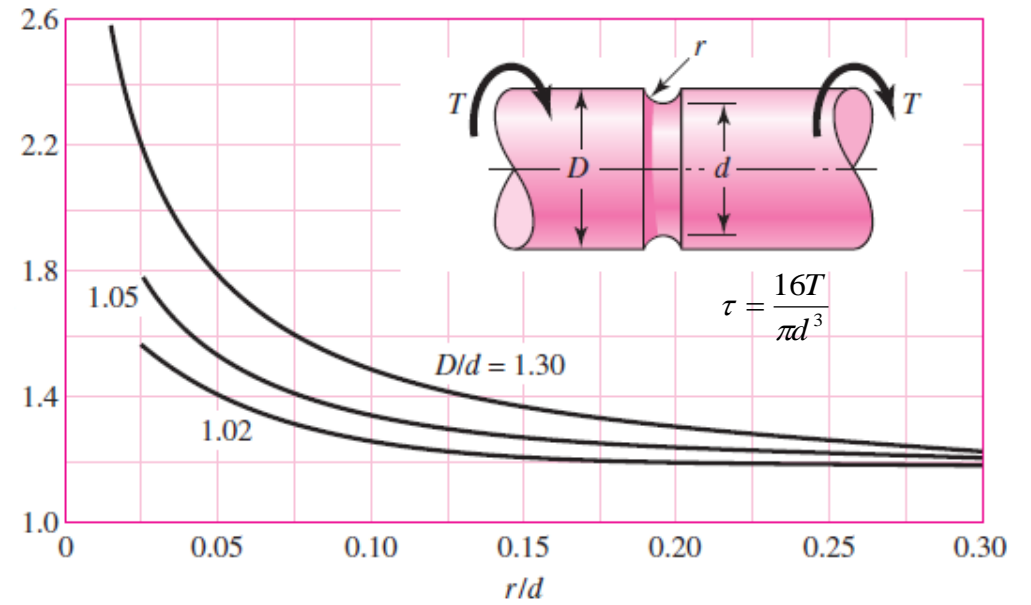
Şekil: Faturalı bir milde burma zorlanmasında gerilme yığılma faktörleri



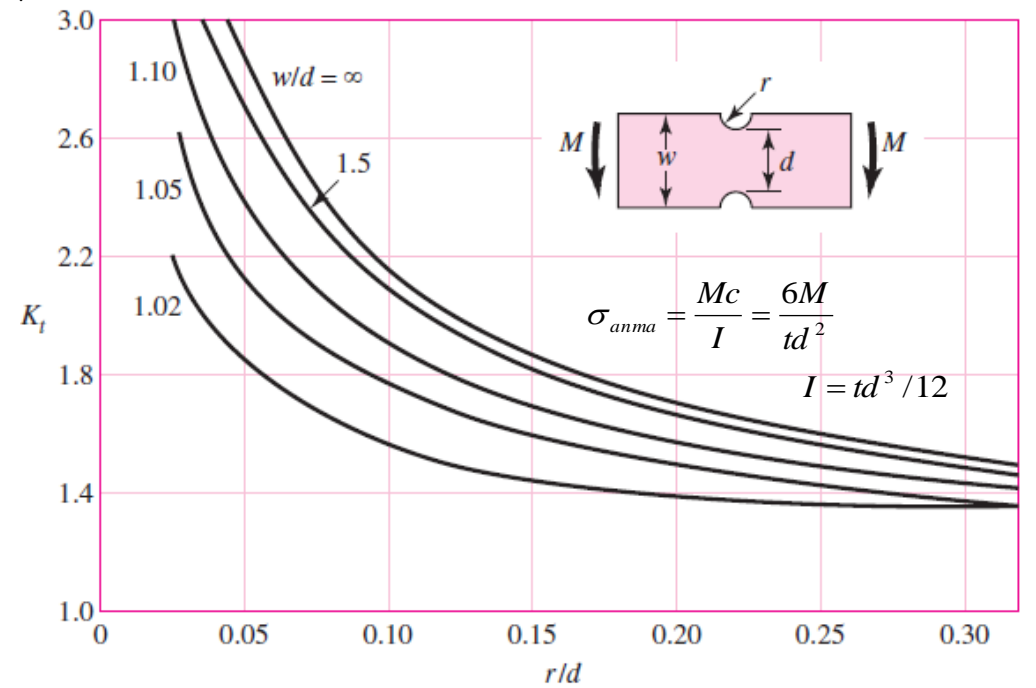
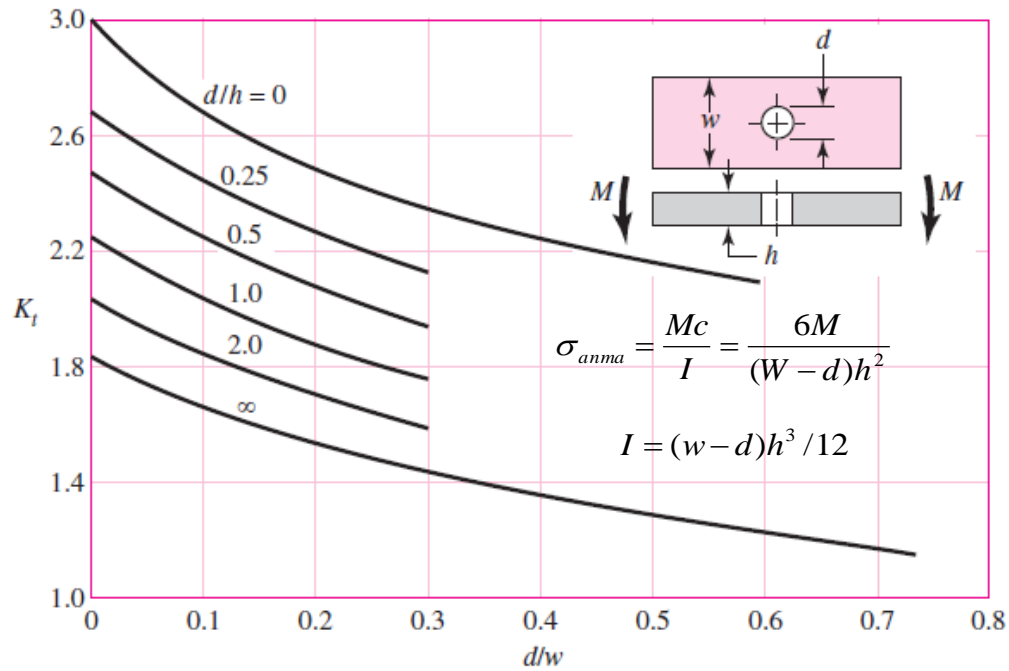
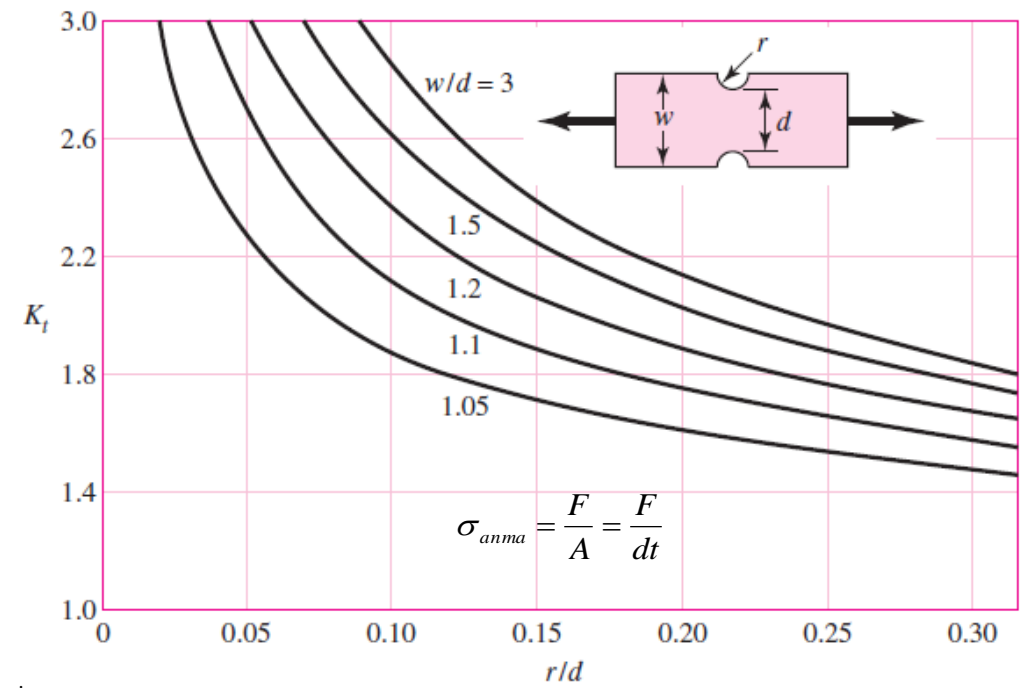
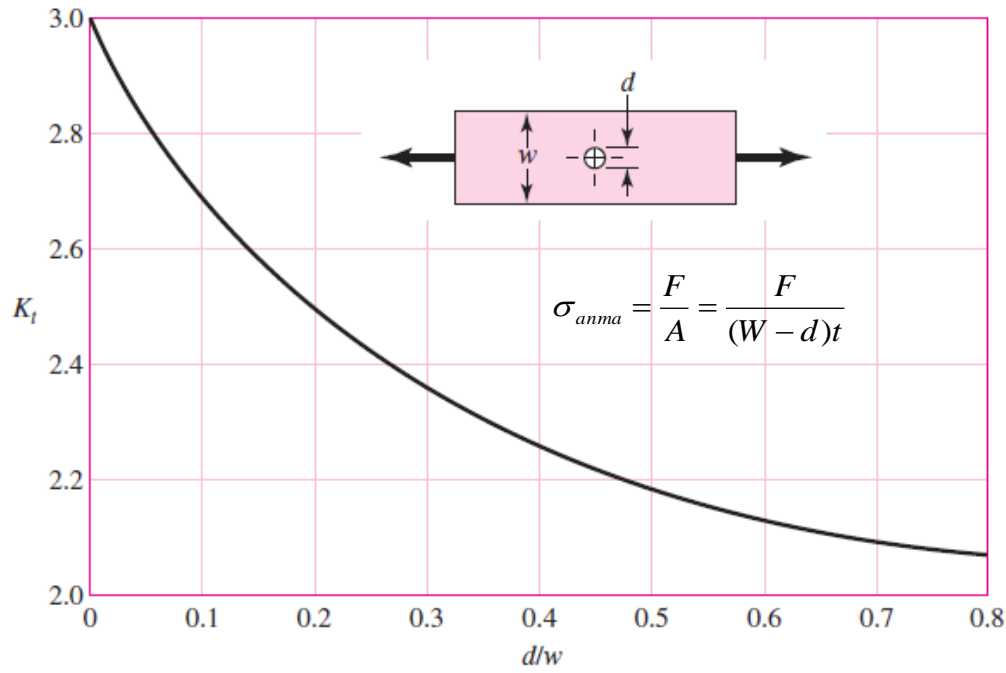
Şekil: Ortasına Fatura açılmış milde çekme zorlanmasında gerilme yığılma faktörü değerleri

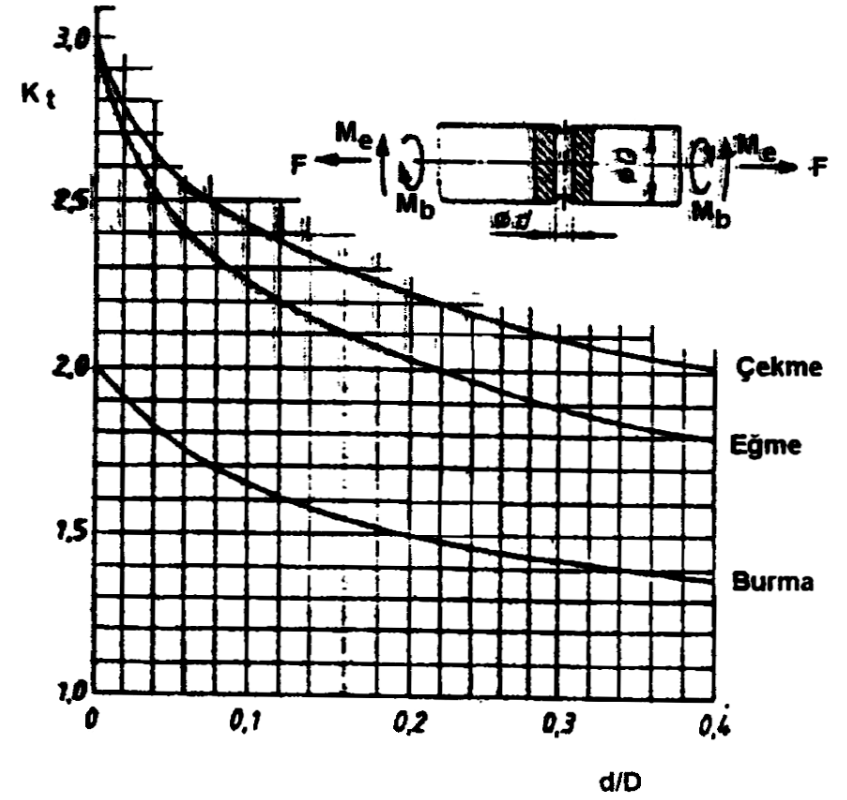
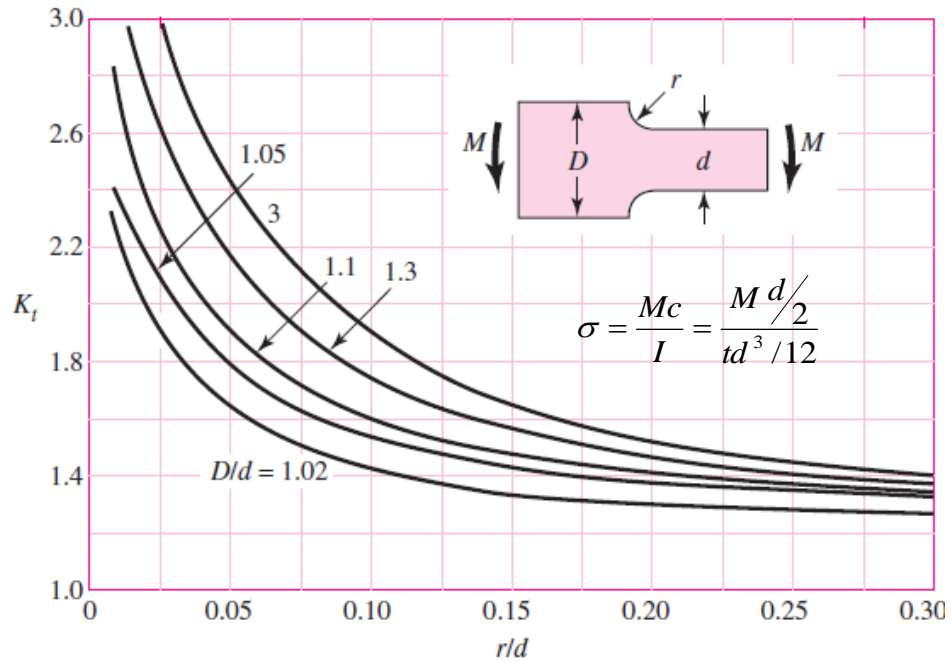
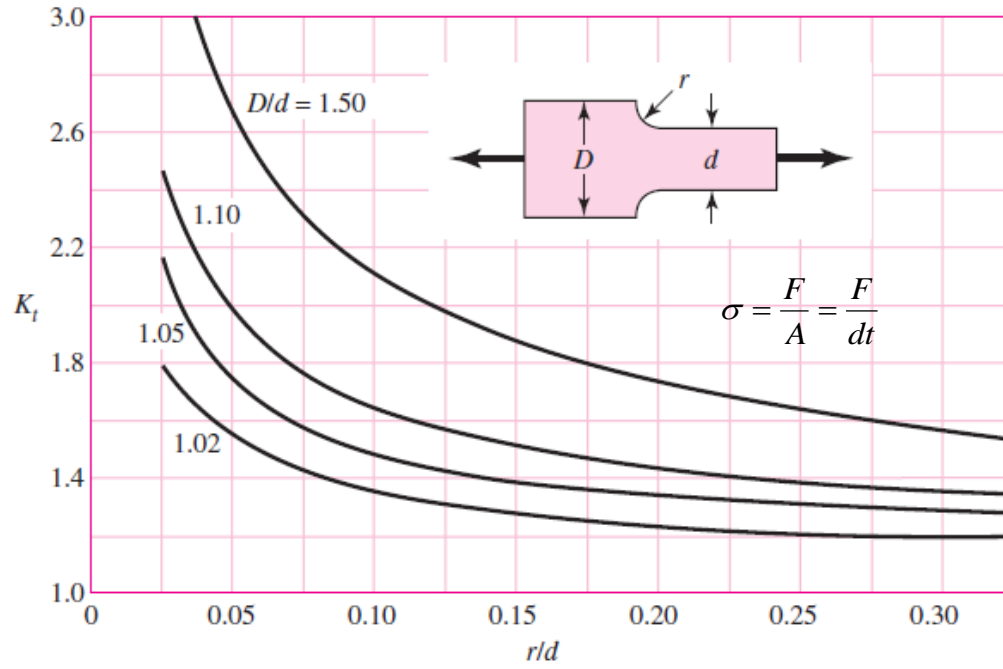


Şekil: Ortasına Fatura açılmış milde eğme zorlanmasında gerilme yığılma faktörü değerleri



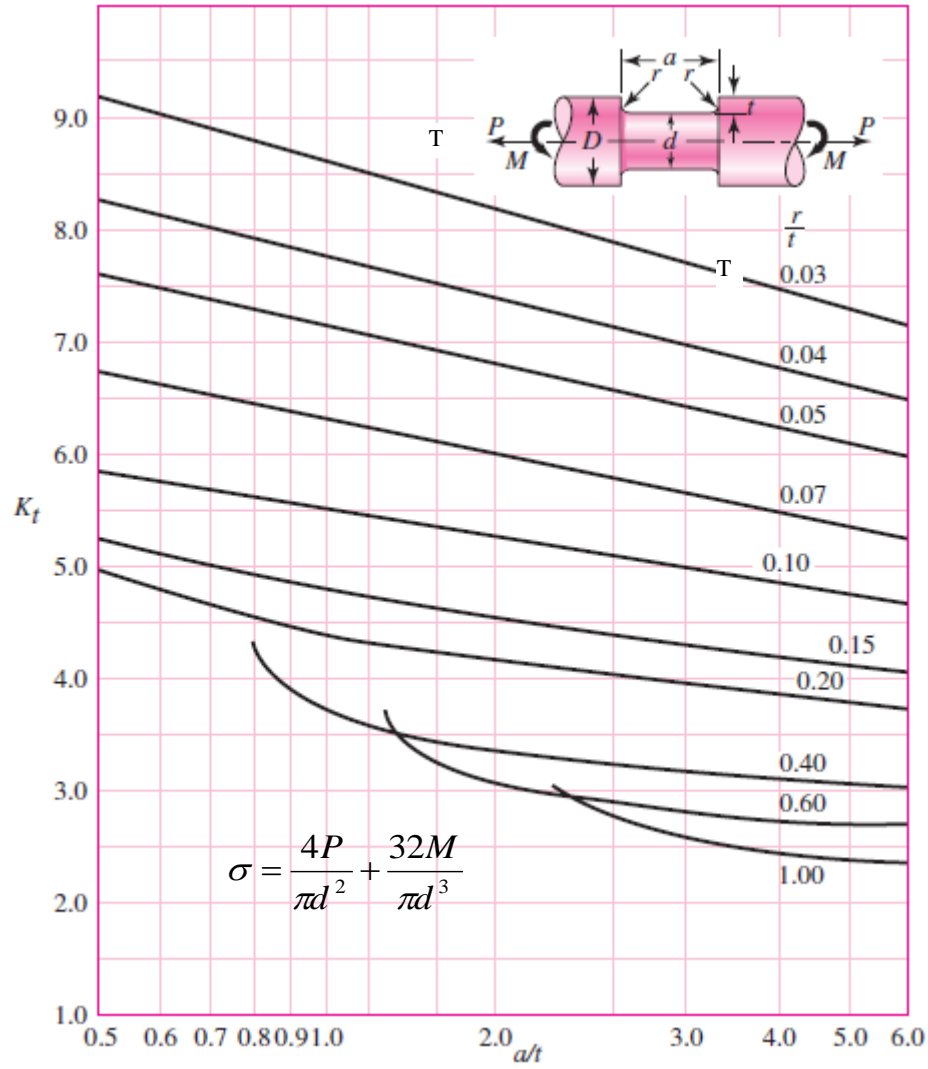
Şekil: Yivli milde burma zorlanmasında gerilme yığılma faktörü değerleri



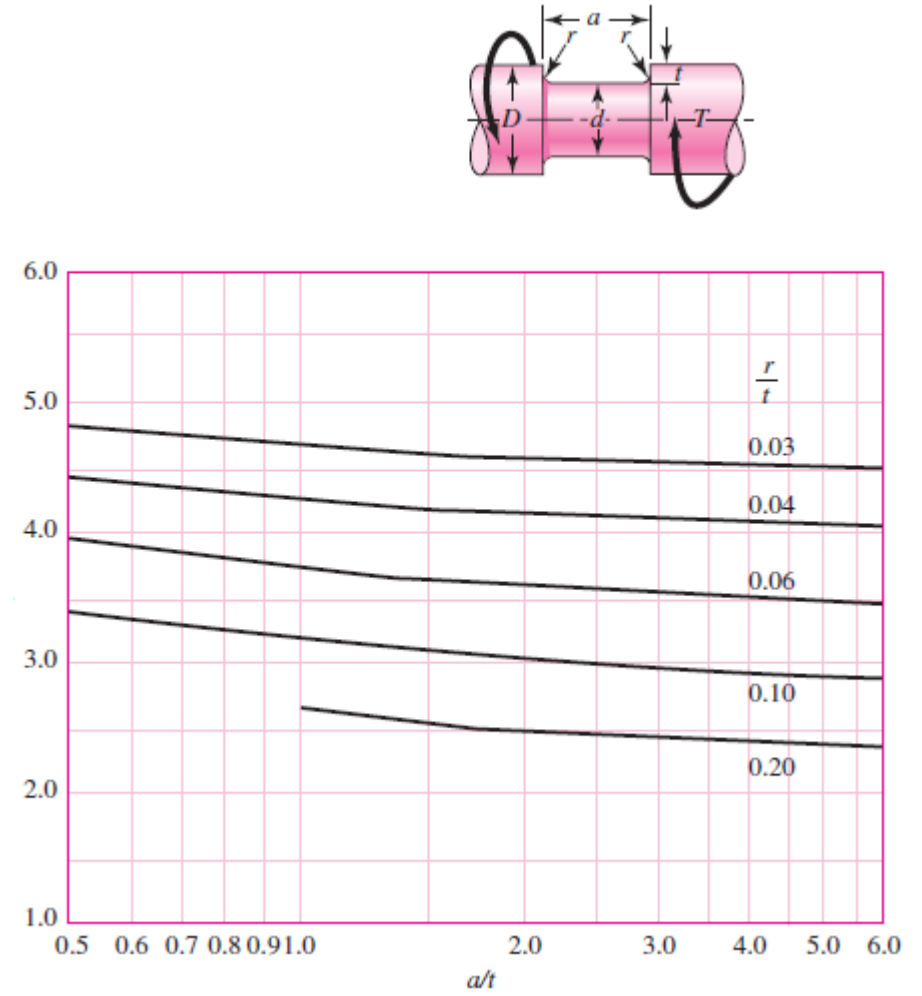


Şekil: Radyal delikli milde çekme, eğme, burma zorlanmasında gerilme yığılma faktörü

$$\sigma = \frac{F}{\left(\frac{\pi D^2}{4} - Dd\right)} \quad \sigma = \frac{32M}{(\pi D - 5.3d)D^2} \quad \tau = \frac{16T}{\pi D^3 - 2.7(dD^2 + d^3)}$$

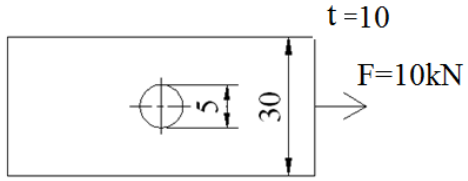


Birleşik durumda (Çekme ve eğme gerilmesi altında) gerilme yığılma faktörü değerleri



Burulma gerilmesi altında gerilme yığılma faktörü değerleri

Çözümlü Soru;



Şekildeki levha $q = 0,4$ gevrek bir malzemeden yapılacaktır. levhada meydana gelecek maksimum gerilmeyi hesaplayınız. Levha çekme kuvvetine maruz kalmaktadır.

Levhada oluşan maksimum gerilme değeri $\sigma_{\max} = K_{\zeta} \cdot \sigma_{anma}$ formülüyle hesaplanır. Syf:...

$$\sigma_{anma} = \frac{F}{(w-d)t} \Rightarrow m \sigma_{anma} = \frac{10 \cdot 10^3}{(30-5) \cdot 10} = 40 \text{ N/mm}^2$$

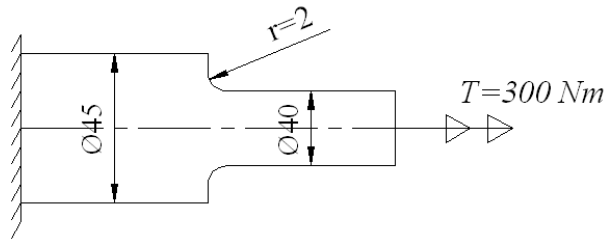
Çentik faktörü hesaplanır. $K_{\zeta} = 1 + q(K_T - 1) \Rightarrow K_T = ?$

$$\frac{d}{b} = \frac{5}{30} = 0,16 \quad K_T = 2,55 \text{ sayfa.....}$$

$$K_{\zeta} = 1 + q(K_T - 1) = 1 + 0,4(2,55 - 1) = 1,62$$

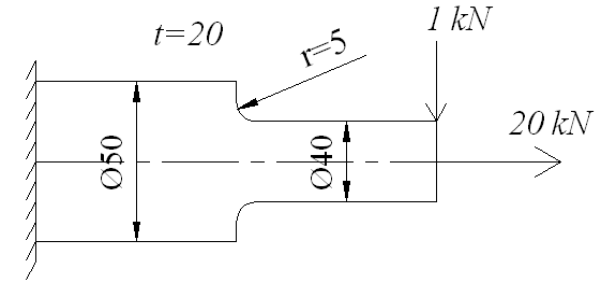
$$\sigma_{\max} = 1,62 \times 40 = 64,8 \text{ MPa}$$

Örnek;



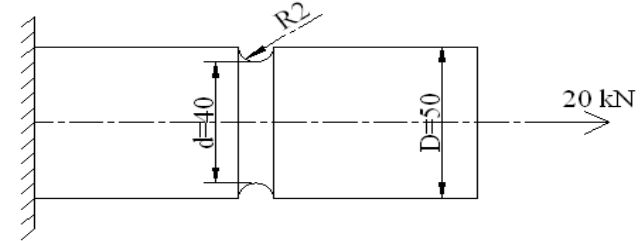
Şekildeki mil $R_m = 250 \text{ MPa}$ $q = 0,4$ olan bir malzemeden yapılmıştır. Milin hasara uğrayıp uğramadığını araştırın.

Örnek;



Şekildeki levha $q=0,5$ olan dökme demirden yapılıyor. EK=2,5 için uygun bir malzeme belirleyiniz?

Örnek;

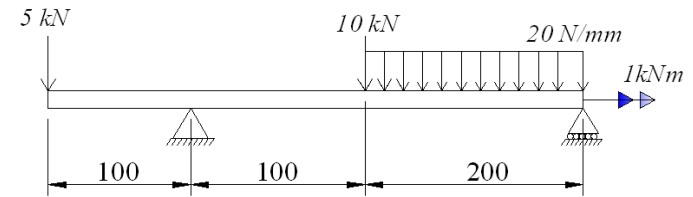


Şekildeki mil çekme dayanımı 100 MPa olan gevrek bir malzemeden yapılacaktır.

a) $q = 0,5$ olduğuna göre parçanın hasara uğrayıp uğramayacağını belirleyiniz.

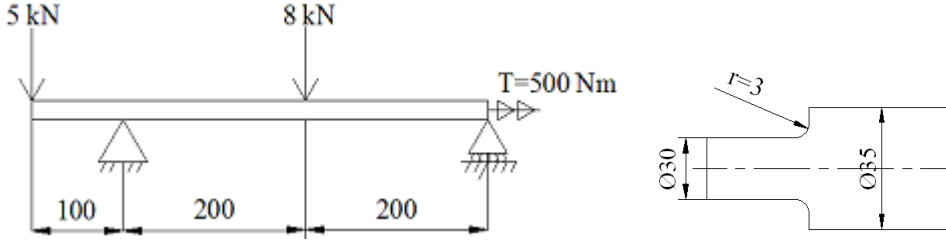
b) 200 Nm burulma kuvveti altında hasara uğrayıp uğramayacağını belirleyiniz.

Örnek;



Şekildeki kiriş sünek bir malzemeden yapılacaktır. Emniyet katsayısı 2,5 olması istenmektedir. Genel yapı çeliklerinden uygun bir malzeme seçiniz? (kirişin çapı 30 mm'dir.)

Örnek;



Şekildeki mil gevrek bir malzeme olan lamel grafitli dökme demirden yapılacaktır. $q=0,4$ kabul edilerek malzeme seçimini yapınız ? $EK=2$ alınacaktır.

4.7 SÜNME VE SÜRÜNME (SÜRÜNME DENEYİ)

Mühendislik uygulamalarında, oda sıcaklığında çalışan cihaz ve aletler için kullanılacak malzeme cinsinin seçimi genellikle çekme deneyi sonuçları göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin mukavemet hesaplarında malzemenin akma dayanımı belirli bir emniyet katsayısına bölünerek hesaplarda kullanılır. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda çalışan alet ve cihazlar için malzeme seçiminde malzemenin çalışma sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan makine ve makine parçalarına örnek olarak:

- a) Buhar türbinleri, kazanlar ve reaktör parçaları
- b) Jet motoru parçaları
- c) İçten yanmalı motorlar
- d) termokupullar
- e) Roket motorları ve balistik füze gövde parçaları gösterilebilir.

Metallerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri incelendiğinde, sıcaklık seviyesinin yanı sıra metallerin o sıcaklıkta tutulma süresinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, malzemenin yüksek sıcaklıklardaki dayanım, o malzemenin uğradığı birim şekil

değiştirme hızı ve o sıcaklıktaki tutuma süresiyle yakından ilgilidir. Metalik malzemelerin çoğu bu şartlar altında *viskoelastik* malzeme özelliği gösterirler. Bu özellik ise metallerin bir çekme gerilmesi altında Sürünme (Creep) mekanizmasıyla şekil değiştirmesine neden olur. Bu olay benzeş sıcaklığın çok kaba olarak 0.5 veya üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Malzemelerin yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışları sürünme deneyi adı verilen bir deneyle belirlenir.

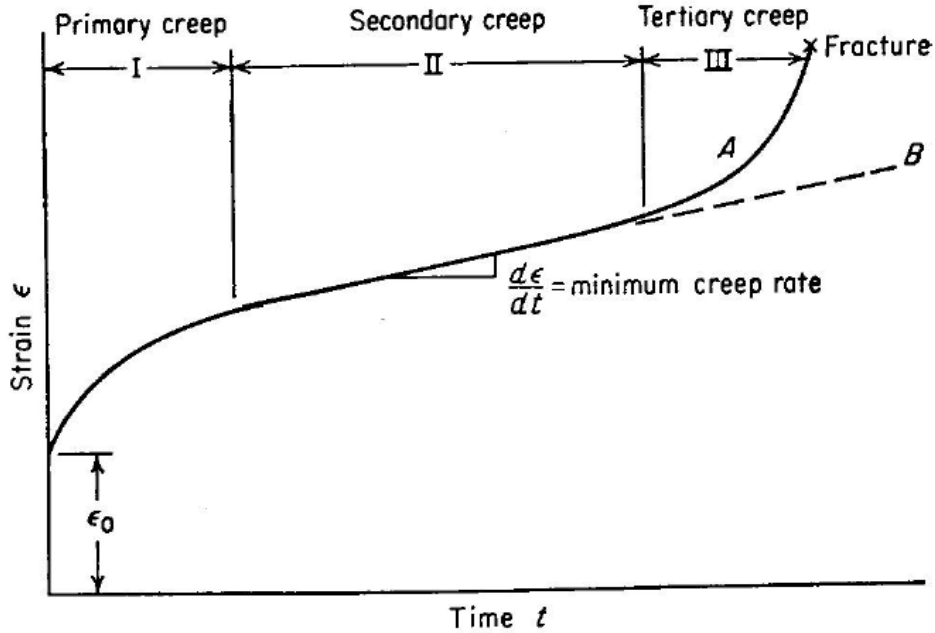
Sabit bir sıcaklık ve sabit bir gerilme (veya yük) altında, malzemede zamanla meydana gelen kalıcı deformasyona **sürünme (creep)** denir. Sürünme zamanla gelişen bir plastik deformasyon şeklidir. Sürünme deneyi için “sürekli uzama deneyi” terimi de kullanılmaktadır. Bu olay yüksek sıcaklıklarda daha hızlı meydana geldiği için, sürünme bir yüksek sıcaklık deformasyon mekanizması olarak da bilinir. Metalik malzemelerde atomların sıcaklıkla artan hareketliliği ile kristal kusurlarının sayı ve davranışına bağlı olan sürünmede, yayınma ağırlıklı ısı aktive yer değiştirmeler etkin rol oynar.

Yüksek sıcaklıklarda içyapıda ve malzeme özelliklerinde meydana gelen bazı değişimler aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- a) Boş nokta yoğunluğu artar ve yayınma kolaylaşır,
- b) Dislokasyonların tırmanması ve çapraz kayması gibi yeni kayma sistemleri aktif hale gelir,
- c) Mikroyapısal kararlılık azalır. Soğuk şekil değiştirmiş malzeme yeniden kristalleşir, çökeltme sertleşmesine uğramış malzeme aşırı yaşlanır,
- d) Parça yüzeyi sıcaklığın da etkisiyle ortamla daha kolay reaksiyona girer ve korozyon ve tufal sorunu ortaya çıkar.

Sürünme deneyinde, standart olarak hazırlanmış numune, sabit bir T sıcaklığındaki bir fırın içerisinde çekme veya basma gerilmesi altında deformasyona uğratılır. Deformasyon miktarı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir. Deney prensip itibarıyla basit görünmesine karşın önemli laboratuvar koşullarının sağlanmasını gerekli kıldığından oldukça zahmetli ve maliyetlidir. Örneğin, yük ve sıcaklığın çok uzun süreler boyunca sabit kalabilmesinin sağlanabilmesi gerekmektedir. Ayrıca deneyler birkaç ay veya senelerce sürebilir. Deney

süresini kısaltmak için deneyler hızlandırılmış koşullarda (yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme değerlerinde) yapılır ve elde edilen değerlerden elverişli diyagramlar çizilir. Bu diyagramlardan okunabileceği gibi, daha uzun sürelerdeki özellikler uygun uzatmalar yapılarak elde edilebilir. Sürünme deneyleri genellikle ASTM E139 standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki şekilde, sürünme deneyi sonucunda elde edilen tipik bir sürünme (uzama-zaman) eğrisi ile bu eğride yer alan bölgeler verilmiştir.



Şekilde görüldüğü gibi, düşük sıcaklıkta ($T < 0.3 < T_m$) malzemeye elastik sınır altında kalacak şekilde bir F çekme yükü uygulanacak olursa elastik uzama hemen meydana gelir ve yük artırılmadığı sürece uzama sabit kalır. Aynı F çekme yükü nispeten daha yüksek bir sıcaklıkta ($T < 0.3 < T_m$) uygulandığında, ϵ_0 uzaması meydana gelir. ϵ_0 'nin büyük olması, sıcaklığın artması ile akma sınırının düşmesine bağlıdır. ϵ_0 uzama miktarı tümüyle elastik olabileceği gibi, elastik-plastik de olabilir. Sıcaklığın ve uygulanan yükün etkisi ile zamana bağlı olarak uzama devamlı artış gösterir ve sürünme eğrisi olarak bilinen şekildeki eğri oluşur. Söz konusu eğrinin herhangi bir noktasındaki eğimi, sürünme hızını vermektedir.

Sürünme eğrisi incelendiğinde, üç değişik safha içerdiği görülür. Aşağıda bu bölgeler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

I. Sürünme Bölgesi: Bu bölgede sürünme hızı deney süresiyle birlikte azalır. Geçici (transient) sürünme safhası da denilen bu bölgede malzemenin sürünmeye karşı olan direnci artmaktadır. Bu bölgede malzeme yükün etkisi altındadır ve deformasyonla dislokasyonların yoğunluğu artar ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi meydana gelir. Fakat öte yandan, malzeme yüksek sıcaklıkta olduğundan, iç gerilmeleri de bir taraftan giderilmekte ve malzeme kendine gelme imkânını kazanmaktadır. Bu nedenle malzeme birinci bölgede, deformasyon nedeniyle deformasyon sertleşmesine ve aynı zamanda yüksek sıcaklık nedeniyle toparlanma (poliganizasyon ve çapraz kayma) etkisine maruz kalır. Ancak, bu bölgede dislokasyon yoğunluğunun artışına ve birbirlerini etkilemelerine bağlı olarak deformasyon sertleşmesi daha etkili olup sürünme hızı gittikçe düşer, yani malzemenin deformasyona karşı direnci artar. Bu aşamada yayınmanın etkisi önemsizdir.

II. Sürünme Bölgesi (kararlı sürünme bölgesi): Bu safha sürünme hızının sabit kaldığı devredir. Bunun nedeni, bu bölgede deformasyon sertleşmesi ile kendine gelme (toparlanma) hızlarının birbirine eşit olmasıdır. Bu nedenle bu bölgeye, “kararlı sürünme (steady state creep)” bölgesi veya “vizkoz sürünme (viscous creep)” denilmektedir. Bu devrede, deformasyonun sağladığı dayanım artışı (deformasyon sertleşmesi), yapıdaki toparlanma ve gevşeme mekanizmalarının devreye girmesiyle dengelenerek sürünme hızının sabit kalması sağlanmaktadır. Sürünme hızının kazandığı bu kararlı değer aynı zamanda deney sırasında ulaşılabilecek en düşük değer olduğundan bu bölgedeki sürünme hızı “en düşük sürünme hızı (minimum creep rate)” olarak isimlendirilir. Bu değer, sürünmenin esas alındığı tasarımlarda çok yararlanılan bir özelliktir. Teknik uygulamalarda kararlı sürünme bölgesi büyük önem taşır. Çünkü öngörülen işletme koşulları ve süresine göre I.bölgede kalınması ekonomik açıdan, III. bölgeye girilmesi de kırılmaya karşı güvenlik azalacağı için istenmez. Bu bölgede temel mekanizma olan dislokasyonların tırmanması yardımıyla engeller ve hareketsiz dizlokasyonlar aşılaraq şekil değiştirmenin devamı (sürünme) sağlanır.

III. Sürünme Bölgesi: Bu bölge numunenin boyun vermesiyle başlar ve kopuncaya kadar devam eder. Bu devrede giderek artan sürünme hızı kısa zamanda kırılmaya neden olur. Boş yer oluşumu ve tane sınırlarındaki şekil değişiminin kuvvetlenmesi (tane sınırı çatlakları) hız

artışının en önemli nedenidir. Bu safhada, parçanın tane sınırlarında çatlaklar ve boşluklar oluşmaya başlar ve bu da etkin yük taşıma kesitini azaltır. Parçanın bir yerinde büzülme başlar ve yük taşıyıcı gerçek kesit alanı azalır, sonra yumuşama olayı pekleşmeden daha yüksek bir hızla ilerlemeye başlar. Ayrıca bu safhada, yapıdaki çökeltilerin aşırı büyümesi, yeniden kristalleşme veya fazlar arası yayınma karakteristiğinin değişmesi gibi olayların varlığı da görülmektedir. Bu bölgenin sonunda, kesit öyle bir noktaya gelir ki, artık uygulanan yük taşınmaz ve numune kırılır.

5. TEKRARLI YÜKLEME (YORULMA)

Eleman içinde bulunan çatlakların zamanla ilerleyerek ve birleşerek kalıcı bir şekil değiştirme göstermeden ve akma sınırını altındaki gerilmelerde kopma şeklinde hasara uğraması **yorulma** olarak tanımlanır. Eleman üzerinde hiçbir çatlak olmasa bile etki eden yük altında dislokasyonlar ilerleyerek gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde bir çatlağın oluşmasına neden olabilir. Bu da zamanla büyüyerek kırılmaya neden olur.

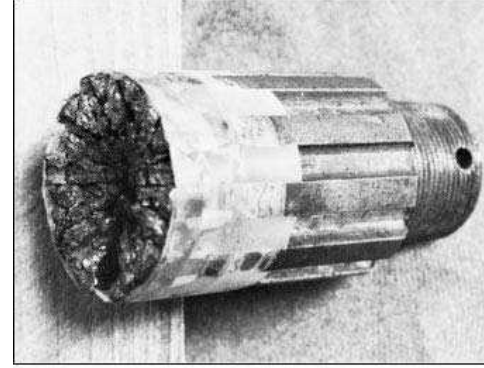
Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeyde bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta ve ani kesit değişimlerinin olduğu yerlerde başlar. Çatlak teşekkülü için aşağıdaki üç ana faktör gereklidir.

- a) Yeterli derecede yüksek bir çekme gerilmesi (anma gerilmesi),
- b) Uygulanan çevrimsel gerilmenin yeterli genliğe sahip olması,
- c) Yeterli sayıda çevrimin uygulanmış olması

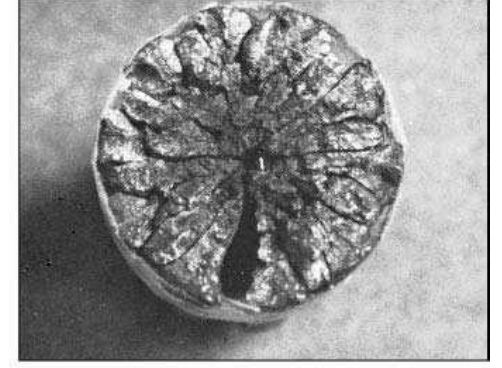
bu'nların yanında, parçadaki gerilme yığılması, korozyon, sıcaklık, ani ve aşırı yüklemeler, metalografik yapı, artık gerilmeler ve birleşik gerilme hali de yorulmayı etkileyen diğer faktörlerdir.

Yorulma hasarı, görünen plastik şekil değiştirme olmadan gerçekleştiği için ve kırılma şeklinde olduğundan büyük zararların ortaya çıkmasına neden olabilir. Yorulmanın gerçekleşmesi için zaman içinde yüklerin tekrarlı olarak etki etmesi gerekmektedir. Genellikle 10^4 tekrara kadar gerçekleşen hasarlar kısa ömürlü yorulma, 10 milyon üzerindeki tekrarlarda hasar meydana gelmemesi de sonsuz ömür olarak adlandırılır. Bu

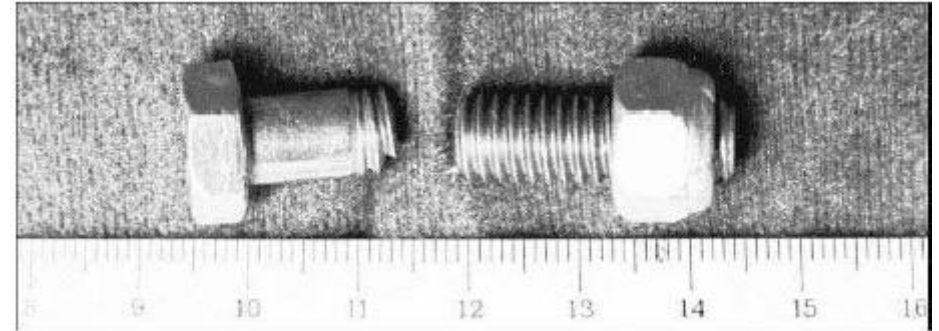
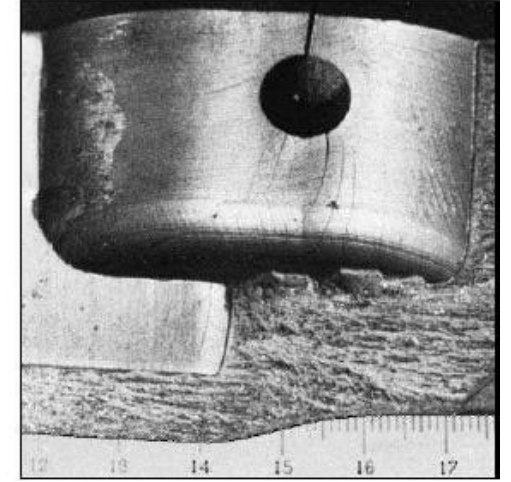
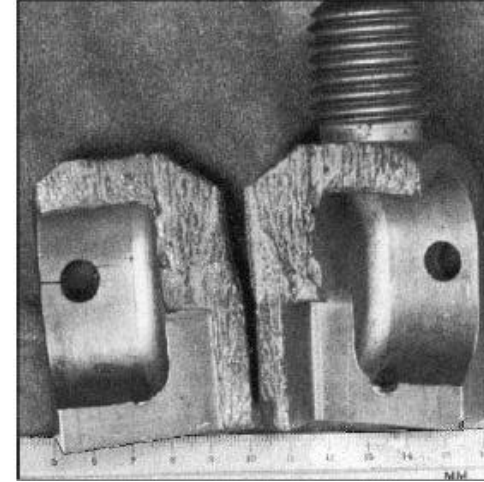
nedenle yorulma konusu 10^3 ve 10^7 tekrar arasında gerçekleşen hasarlarla ilgilidir ve bu aralıkta hasarın oluşmaması tasarımcının asıl hedefidir.

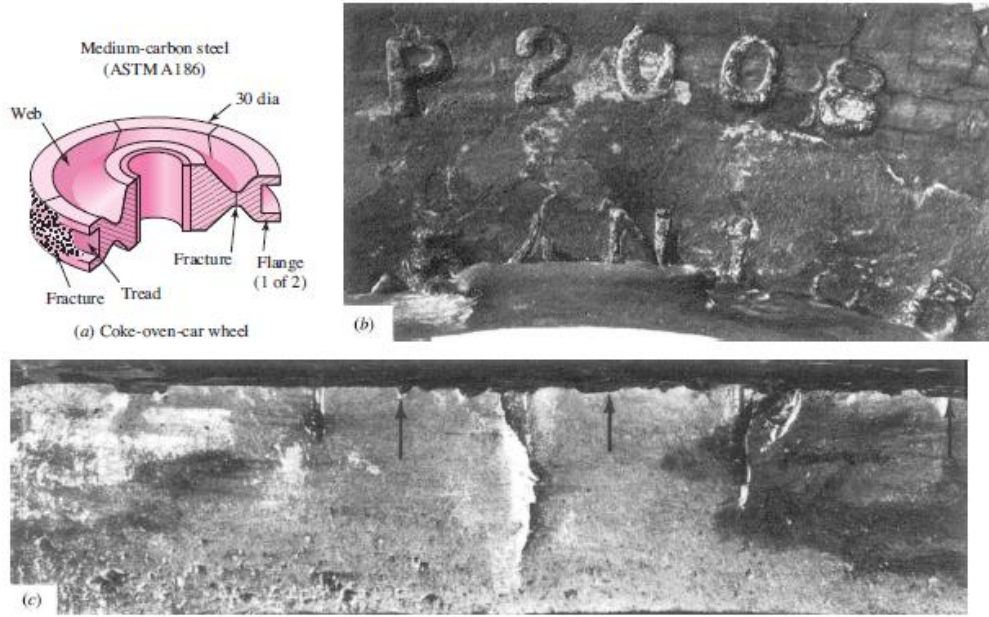


(a)



(b)





5.1 Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler

Çevrim (gerilme periyodu): Gerime-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir.

Maksimum gerilme (σ_{\max}): Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir.

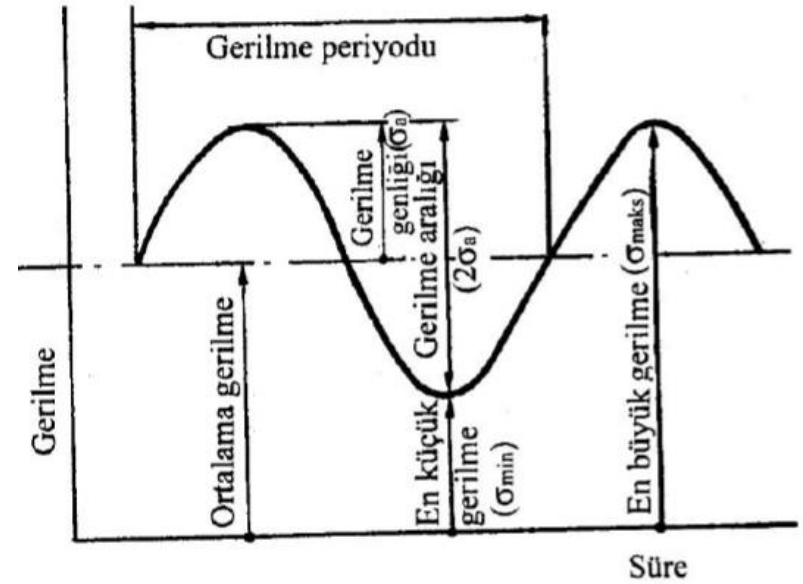
Minimum gerilme (σ_{\min}): Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.

Ortalama gerilme (σ_m): Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

Gerilme aralığı ($\Delta\sigma$): Maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki cebirsel farktır.

Şekillerde σ_{\max} maksimum gerilmeyi, σ_{\min} minimum gerilmeyi, σ_m ortalama gerilmeyi, σ_a ise değişken gerilmeyi göstermektedir. Maksimum ve minimum gerilmelere göre ortalama ve değişken gerilmeler aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

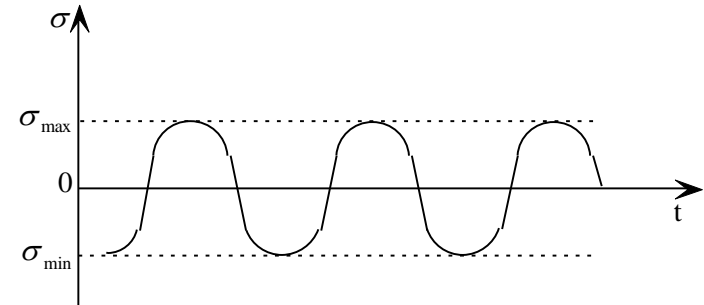


5.1 Yorulma Zorlanması Türleri

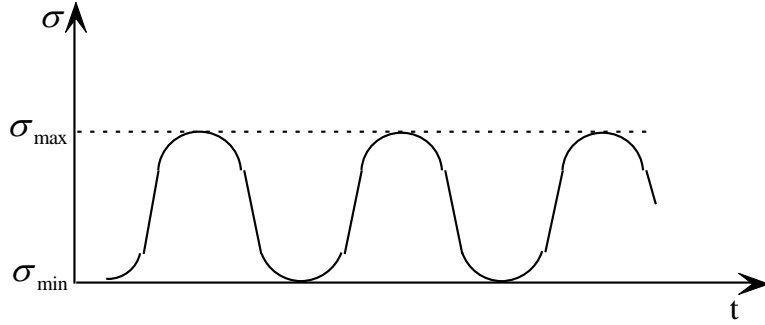
Hesaplamalar yapılırken kolaydan zora doğru bir akış izlenmektedir. Bu nedenle genellikle yükleme durumu başlangıçta sinüs eğrisine uygun olarak kabul edilmektedir. Şekillerde çok rastlanan yükleme durumları verilmiştir.

Değişken yorulma zorlanması

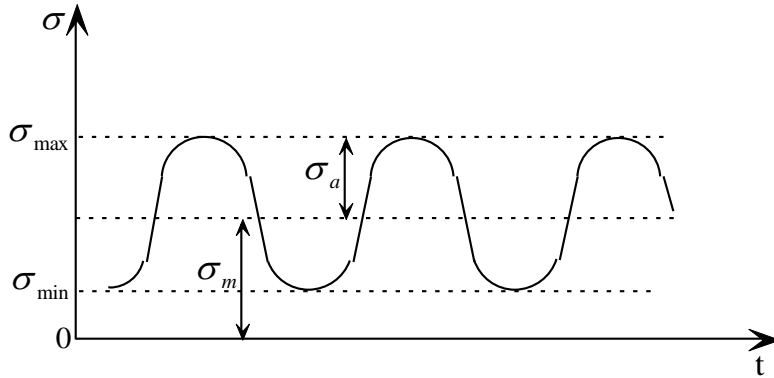
Eleman üzerine etki eden kuvvetin çeki ve bası olarak eşit bir şekilde meydana geldiği yükleme durumuna *değişken yorulma zorlaması* denir. Ortalama gerilme sıfıra eşittir.



Dalgalı yorulma zorlanması



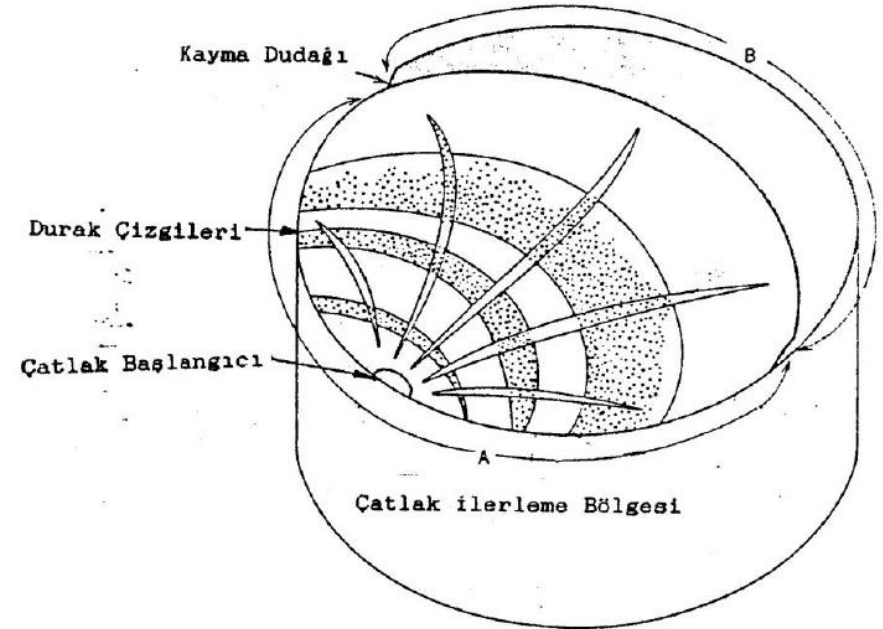
Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanması yorulma zorlanması



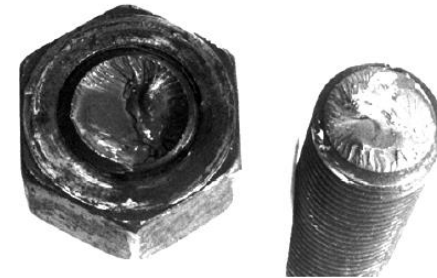
5.2 Kırılma Yüzeylerinin makroskopik görüntüsü

Yorulma kırılmasına uğrayan bir parçanın kırık yüzeyi, zorlanmanın şekli, seviyesi ve zamanla değişimi hakkında önemli bilgiler verdiğinden hasar analizi (failure analysis) çalışmalarında sıkça yararlanılır. Yorulma sonucu oluşan kırık yüzeyler, gevrek özellikler taşıyan parlak görüntülü olup büyük şekil değişimi izlerine rastlanmaz ve çekme gerilmesine dik olarak uzanır. Yorulma hasarı yüzey görünümünden de anlaşılabilir. Örnek olarak aşağıdaki şekilde olduğu gibi, yuvarlak kesitli bir parçanın kırık yüzeyi incelendiğinde değişik özelliklerdeki bölgelerin varlığı dikkat çeker. A bölgesi, yorulma çatlağının ilk olduğu O noktasını da içeren kararlı ilerleme bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede ayrıca makroskopik ölçekte “duraklama çizgileri (Beach Marks)”, ile çatlak ilerleme yönünü

gösteren “radyal çıkıntılar (radial ledges)” yer almaktadır. Çatlak A bölgesinde değişik dinamik zorlanmalar altında kararlı olarak ilerler ve son çatlak cephesine ulaştığı anda malzemenin kalan kesitinin zorlanmayı taşıyamayacak kadar küçülmüş olmasından dolayı ani ve zorunlu olarak kırılır. Bu durum şekildeki B bölgesi ile gösterilmiş olup, burada sünek kırılma belirtisi olan lifli kırık yüzeyler en belirgin özellik olarak dikkati çeker.



Yorulma ile Kırılmış bir malzeme yüzeyi



Şekil: Bir Cıvatanın Yorulma Sonunda Kırılmış Bölgesi

5.3 Yorulmayı etkileyen faktörler

1. Uygulanan gerilmenin büyüklüğü ve doğası
2. Gerilme konsantrasyonları
3. Eleman içinde bulunan kalıntı gerilmeler
4. Eleman yüzey özellikleri
5. Sıcaklık
6. Çevre şartları
7. Elemanın boyutları

5.4 Yorulma Deneyleri

Bir malzemeye, ortalama gerilmesi sıfır olan bir çevrimsel zorlanma uygulandığında, yorulma hasarının değişken gerilme genliğine bağlı olarak hangi çevrimde oluşacağını bildiren grafiklere Wöhler Eğrileri (veya S-N eğrileri) denir. Bu eğriler, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösterir. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalmak üzere farklı numunelere farklı çevrimsel gerilmeler uygulayarak numunenin çatlamasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği sabit tutulur. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Gerilme eksenini ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya maksimum gerilme, ya minimum gerilme ya da gerilme genliğinden biri kaydedilir. Çevrim sayısı olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır.

Wöhler eğrileri, metal veya alaşımların kristal yapısına bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Örneğin, HMK yapıdaki metaller (özellikle demir ve çelikler) belirli bir gerilme genliğinin altındaki zorlanmalarda yorulmaya uğramamaktadır. Bunu belirleyen eşik değere “Yorulma Sınırı (Fatigue Limit)” adı verilir ve o metalin yorulma dayanımını belirler. Yorulma dayanım sınırı, çatlak oluşumuna neden olabilecek hareketli dislokasyonlar etrafında karbon atomlarının bir atmosfer oluşturarak veya küçük partiküller halinde çökelerek onları kilitlemeleri sonucu oluşan deformasyon yaşanması nedeniyle ortaya

çıkılmaktadır. Ayrıca deformasyon yaşanması gösteren bazı alüminyum alaşımları gibi demir dışı malzemelerde de bu durum gözlemlenmektedir.

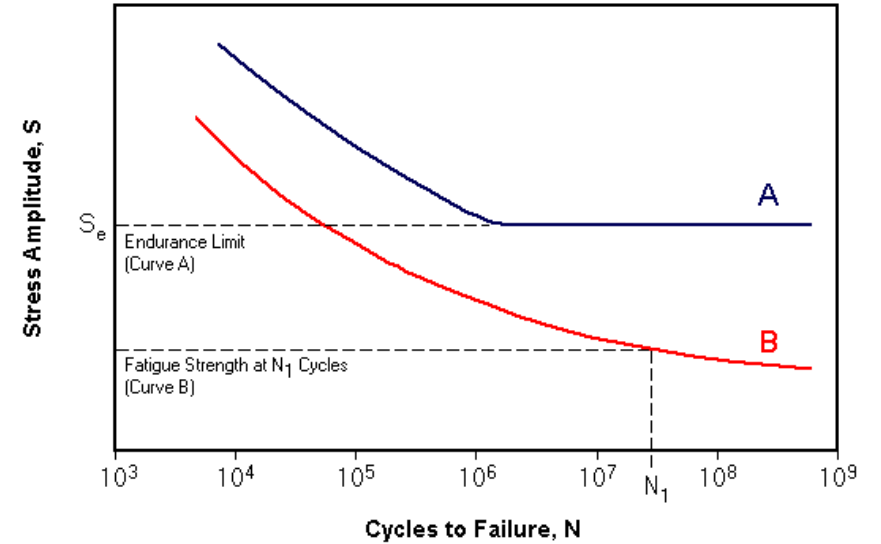
Demir dışı, yani YMK ve SDH yapıya sahip metal ve alaşımlarda istisnai durumlar dışında bu özelliğe rastlanmaz. Diğer bir deyişle gerilme genliğinin azalmasıyla ömürde sürekli bir artış söz konusudur. Genellikle bu tür malzemeler için “Yorulma Dayanımı (Endurance Limit)” olarak 5×10^7 çevrimde yorulma hasarı oluşturacak gerilme genliği esas alınır.

a) Yorulma dayanımı (fatigue strength): Malzemenin N çevrim sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değeri olarak tanımlanır.

b) Yorulma sınırı (Yorulma dayanım sınırı) (fatigue limit): S-N diyagramında eğrinin asimtotik durum aldığı gerilmeye “yorulma sınırı” veya “Yorulma dayanım sınırı” denir. Bu gerilmenin altındaki çevrimsel gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanacağı kabul edilir.

c) Yorulma ömrü (Fatigue life): Belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanan bir malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısına denir.

Özellikle demir dışı metaller ve metal olmayan malzemeler için bir yorulma limiti söz konusu olmayabilir. Bu türden malzemelerde tekrar sayısı ne olursa olsun ancak yorulma mukavemetinden söz edilebilir. Şekilde demir dışı metallere ait şematik bir S-N grafiği verilmiştir.



Şekil. Demir ve demir dışı metaller için yorulma deneyi (WÖHLER) grafikleri

Yorulma deneyleri uzun süren ve pahalı deneyler olduğundan yaklaşık bir değer kullanılmak üzere malzemelerin çekme mukavemetlerine göre bir tahmin yapılabilir. Aşağıdaki çizelgede bazı malzemeler için yaklaşık yorulma limitleri verilmiştir.

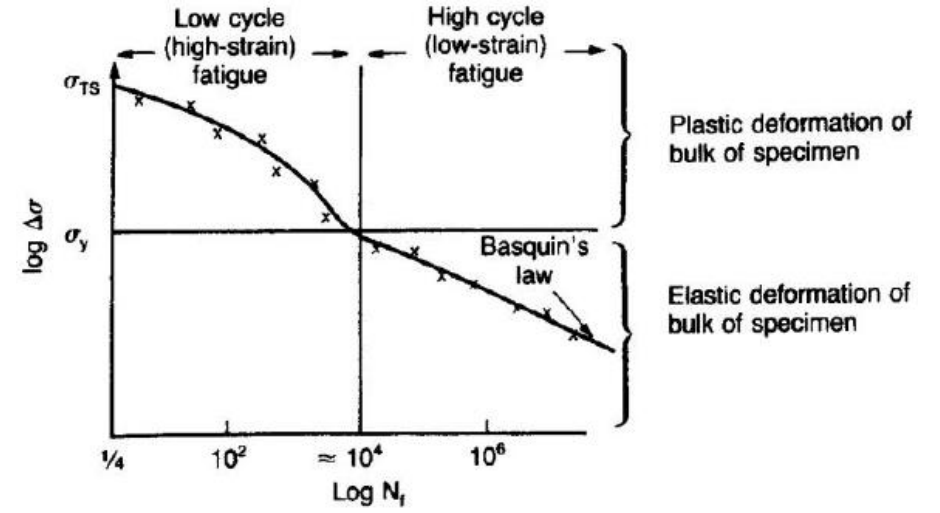
Tablo 24. Bazı Malzemelerin Yaklaşık Yorulma Limitleri

Malzeme	Yaklaşık Yorulma Limiti
Genel yapı çelikleri	0.5 R _m
İslah çelikleri	0.45 R _m
Sementasyon çeliği	0.4 R _m
R _m > 1400 olan çelikler	700 MPa
Lamel grafitli dökme demir	0.37 R _m
Küresel Grafitli dökme demir	0.42 R _m
Magnezyum alaşımları	10 ⁶ tekrar için 0.35 R _m
Ni-Cu	10 ⁶ tekrar için 0.45 R _m
Al-hadde alaşımları	10 ⁸ tekrar için 0.38 R _m
Al-döküm alaşımları	10 ⁸ tekrar için 0.16 R _m

Çatlaksız malzemelerde yorulma

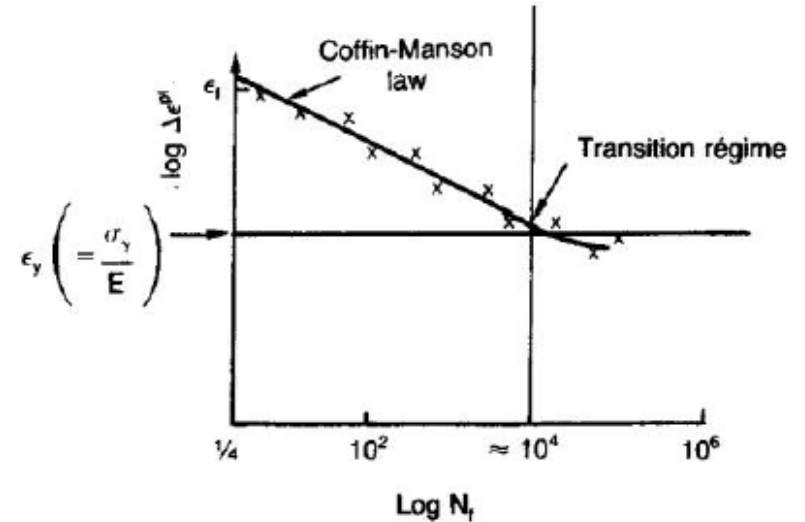
Çatlaksız malzemelerin yorulma deneyleri, çekme-basma veya dinamik eğme halleri için standart numunelerle yapılır. Genelde gerilme, zamana göre sinüzoidal olarak değiştiğinden, dalgaların şekli servo-hidrolik deney cihazları ile kontrol edilmektedir. Çatlaksız malzemelerde görülen uzun ömürlü yorulmada, uygulanan max. ve min. gerilme değerlerinin mutlak değeri malzemenin akma mukavemetinden düşüktür. Bu tür yorulmada deney sonuçlarının amprik olarak

$\Delta\sigma N_f^a = c_1$ ile ifade edilir. **Basquin** kanunu olarak isimlendirilen bu bağıntıda; $\Delta\sigma$ gerilme aralığı, N_f kırılmaya kadar olan çevrim sayısı (yorulma ömrü), a (çoğu malzemeler için 1/8-1/15) ve c_1 birer sabittir.



Çatlaksız malzemelerin kısa ömürlü yorulmasında, uygulanan gerilmenin max. ve min. larının mutlak değeri malzemenin akma mukavemetinin üzerinde olduğundan bu durumda Basquin bağıntısı geçerli değildir. Bu tür yorulmada yorulma özellikleri, sabit toplam birim şekil değiştirme aralığında $\Delta\epsilon_f$ veya sabit birim şekil değiştirme genliğinde yapılan deneylerle belirlenir.

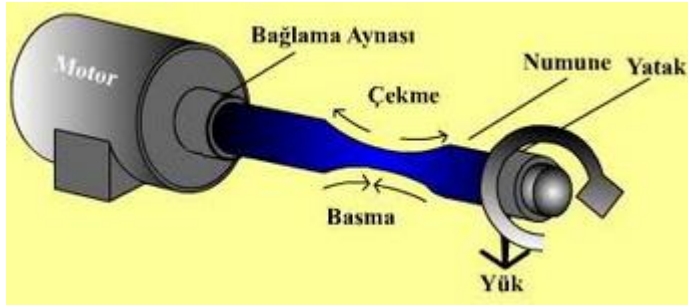
$\Delta\epsilon_{pl} N_f^b = c_2$ bağıntı geçerlidir. Burada b (çoğu malzeme için 0.5-0.6 arasında) ve c_2 birer sabit.



5.5 YORULMA HESAPLARI

Yorulma deneyinde kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. ASTM-466’da eksenel gerilmeli yorulma deneyi için aşağıda verilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallara dikkat edilmelidir.

- Numune, çatlakların numunenin daraltılmış kesitinde olacak şekilde dizayn edilmelidir.
- Numunenin daraltılmış kesiti öyle seçilmelidir ki, max. gerilme deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25’inde, min. gerilme ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5’inde oluşsun.
- Numune boyutları öyle seçilmelidir ki, numunenin doğal frekansı cihazın frekansının en az iki katı olmalıdır.



Dönen destekli kiriş yorulma test düzeneği

Yorulma hesapları bir çok çizelge ve grafiğin formüllerle birlikte kullanıldığı oldukça karmaşık teknikler içerdiğinden kolaydan zora doğru bir akış izlenecektir.

Tam Değişken Yükleme Ve Sonsuz Ömür Durumu (R_f)

Bir makine elemanının sonsuz ömüre sahip olup olmadığı belirlemek için elemanda hesaplanan gerilme değerinin yorulma limitinden daha düşük olması gerekir. Bu durum

tasarım eşitliği olarak $\sigma \leq \frac{R_{fD}}{EK}$ şeklinde ifade edilebilir.

Yorulma Limiti Düzeltme Faktörü

Gerçek makine elemanları yorulma deneyi şartlarından çok farklı özelliklere sahip olarak kullanılırlar. Buda deneyden elde edilen yorulma limitinin ideal bir değer olması ve bunun gerçek şartlara göre düzeltilmesi gereğini ortaya çıkarır. İdeal şartlardan ayrılan her bir özellik için bir doğrultma katsayısı kullanılması gerekmektedir. Bu faktör toplu bir şekilde aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$R_{fD} = \frac{C_b C_\epsilon C_y C_T C_g}{K_f} \frac{R_f}{EK} \quad \text{eşitlikte verilen her faktör sırasıyla incelenecektir.}$$

Boyut Faktörü (C_b)

Yorulma deneyi 10 mm çaplı numuneler ile yapılmaktadır. Daha büyük çaplı elemanların daha düşük yorulma limitlerine sahip olduğu yapılan deneylerde görülmüştür. Bu nedenle makine elemanlarının boyutuna göre aşağıdaki çizelge belirtilen katsayılar kullanılarak düzeltme yapılmalıdır.

Tablo 25. Parça çaplarına göre boyut faktörleri

Parça Çapı	C_b
≤ 10 mm	1
10-50	0.9
50-100	0.8
100-150	0.7

Bu değerler eğilme ve burulma yüklemeleri için geçerlidir. Çekme basma şeklinde yapılan yüklemelerde boyut faktörü 0.6-0.7 arasında, elde edilen yorulma limiti değerlerinin deneysel değer veya yaklaşık değer olmasına göre seçilir. Kesiti silindirik olmayan makine elemanlarında ise, çap yerine kullanılmak üzere $d_{eş} = 0.81\sqrt{A}$ formülüyle bir eş çap hesaplanır. Bu formüldeki A değeri kesit alanı olarak tanımlanır.

Darbeli yükleme faktörü (C_ϵ)

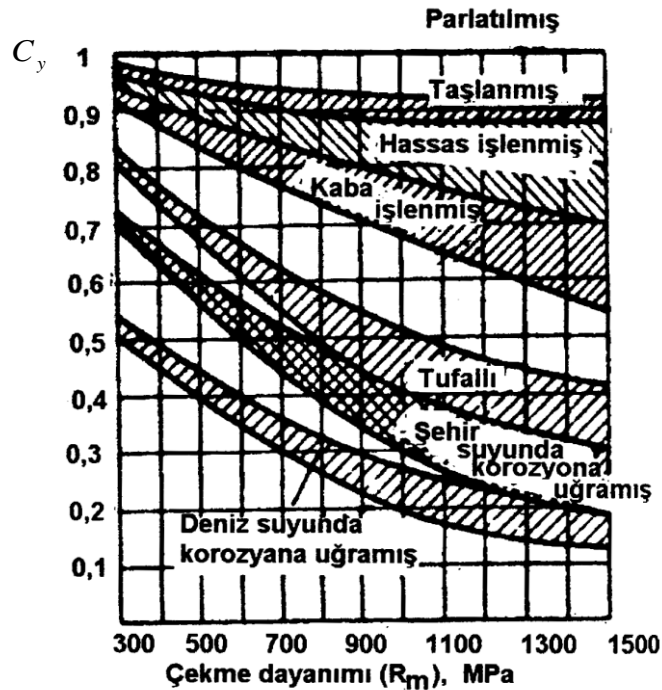
Yorulma deneyi sinüs eğrisine uyan bir değişken gerilme ile yapılmaktadır. Gerçek uygulamalarda ise daha farklı yükleme durumları olabilmektedir. Yükleme durumuna göre düzeltme katsayıları aşağıdaki çizelge seçilir.

Tablo 26. Yükleme Tipine Bağlı Olarak Darbeli Yükleme Faktörleri

Yükleme tipi	C_ϵ
Hafif yükleme (motor ve pompa..gibi)	0.9-1
Orta yükleme (krank-biyel mekanizması)	0.7-0.8
Ağır yükleme (kesme ve şişirme presleri)	0.5-0.6
Şiddetli (şahmerdan, hadde, taş kırıcı)	0.3-0.4

Yüzey Faktörü (C_y)

Deneyler ayna parlaklığında numuneyle yapılmaktadır. Malzemelerde genel olarak yüzey pürüzlülükleri çentik etkisi oluşturmaktadır. Bu durum malzemenin yorulma dayanımı etkilemektedir. Bu nedenle ekte verilen grafik yardımıyla yüzey faktörü değerler bulunmaktadır.

Tablo 27. Yüzey Faktörü (C_y) Değerleri**Güvenilirlik Faktörü (C_g)**

Yorulma deneyleri ve bu deneylerden elde edilen grafikler istatistiksel olarak %50 güvenilirliği ifade etmektedir. Daha yüksek güvenilirlik için bir düzeltme faktörü kullanılmalıdır.

Tablo 28. Güvenilirlik yüzdesine bağlı olarak güvenilirlik faktörü

Güvenilirlik yüzdesi	C_g
% 90	0,897
% 95	0,868
% 99	0,814

Yorulma çentik faktörü (K_f)

Deney gerilme konsantrasyonsuz numune ile yapılmaktadır. Gerilme konsantrasyonu olması durumunda statik yükleme şartlarında gevrek malzeme için hesaplanan K_ϵ eğerine benzer şekilde hesaplanır. K_t değeri ilgili grafiklerden q değeri ise aşağıdaki tablodan elde edilir.

Tablo 29. Çentik Duyarlılık Faktörü q Değerleri

Çelik çekme dayanımı (MPa)		Çentik dibi yarıçapı (mm)								
Çekme ve Eğmede	Burulmada	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
1400	1260	0,65	0,89	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
980	840	0,5	0,78	0,84	0,86	0,88	0,9	0,91	0,92	0,93
700	560	0,45	0,68	0,76	0,8	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87
560	420	0,4	0,63	0,72	0,76	0,79	0,8	0,82	0,84	0,85
420		0,35	0,57	0,65	0,71	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82
350		0,1	0,51	0,61	0,67	0,7	0,72	0,74	0,77	0,77
Demir dışı alaşımlar		0,05	0,4	0,55	0,62	0,68	0,73	0,77	0,8	0,83

Sıcaklık Etkisi (C_T)

Makine elemanları oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda çalışıyorsa malzemede gevrek durum söz konusudur. Sıcaklığın oda sıcaklığının üstüne çıkması durumunda malzemenin çekme dayanımı ve akma sınırı düşmektedir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler dışındaki

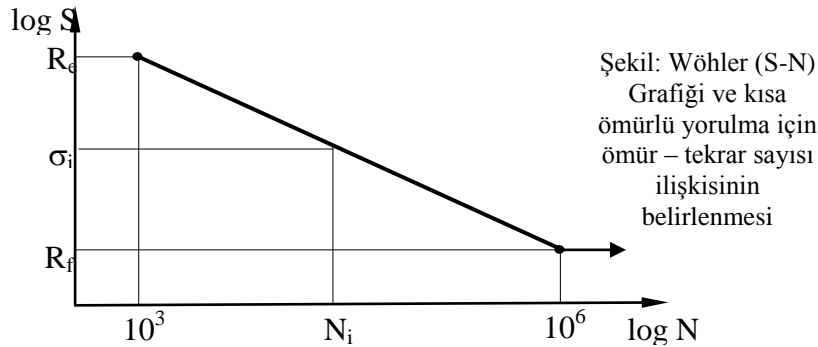
genel malzemeler için 75°C ye kadar sıcaklığın etkisi dikkate alınmaz. 75°C dan sonra ise, artan her 25°C için 0.1 lik bir katsayı ile küçültülür. Bu ifade 200°C ye kadar çalışan normal çelikler içindir. Karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için sıcaklık faktörleri çizelge verilmiştir. Farklı malzemelerin sıcaklık etkisini tespit etmek için kataloglara bakmak gerekir.

Tablo 30. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Çelikler İçin Çalışma Sıcaklıklarına Bağlı etkisi

Çalışma sıcaklıkları (°C)	C _T
20-250	1
300	0,975
400	0,922
500	0,766
600	0,546

5.6. Tam Değişken Yüklemlerde Sınırlı Ömür

Sonsuz ömür durumunda yorulma limiti dikkate alınır. Her zaman sonsuz ömür için tasarım gerekemeyebilir. Kısa süreli kullanılacak makine parçaları sonsuz ömürden daha yüksek gerilmelerle yüklenebilir. Dolayısıyla daha hafif makineler yapılabilir. Bu durumda belirli bir gerilme uygulanan parçanın kaç tekrara dayanabileceği veya belirli bir tekrara dayanması istenen parçaya ne kadarlık gerilme uygulanabileceğinin bilinmesi gerekir. Bu işlem S-N diyagramından grafiksel olarak elde edilebildiği gibi hesaplama yoluyla da elde edilebilir. Şekilde grafiksel yöntem gösterilmiştir.



Aynı değerler grafik logaritmik skalada doğrusal karakter gösterdiğinden formüllerle de elde edilebilir. Bu kapsamda belirli tekrar sayısı için uygulanabilecek tam değişken gerilme değeri,

$$R_{fN} = \frac{(0.8Rm)^2 C_\epsilon K_f}{R_f K_{f1000}^2 C_y C_b} N^\eta \quad \text{ile hesaplanabilir. Buradaki } \eta \text{ değeri doğrunun eğimidir.}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \log \frac{R_f C_y C_b K_{f1000}}{0.8Rm K_f} \quad \text{formülü ile hesaplanır. Belirli bir gerilme değerinde}$$

ulaşabilecek tekrar sayısını (N) ise,

$$N = \left(\frac{R_{fN} R_f K_{f1000}^2 C_y C_b}{(0.8Rm)^2 C_\epsilon K_f} \right)^{1/\eta} \quad \text{olarak yazılır.}$$

Bu formül demir esaslı alaşımlar için 10³ ile 10⁶ arasındaki tekrarlı yüklemelerde geçerlidir. 10³ tekrarda malzemenin akma sınırına kadar yüklenebildiği bilinmektedir. Formüldeki bu değer çekme mukavemetinin % 80'i olarak alınmıştır.

Sonsuz ömür için dikkate alınan yorulma limiti düzeltme faktörleri sınırlı ömür durumunda bazı değişikliklerle birlikte dikkate alınır. Genelde yüzey faktörü, yükleme durumu faktörü ve boyut faktörü sonsuz ömür ile aynı alınır. Güvenilirlik faktörü ise 1 olarak kabul edilir.

Çentik faktörü ise tekrar sayısı ile birlikte değişen bir faktördür. Bu değişimi dikkate almak için formüllerde K_{f1000} tanımlaması yapılmıştır.

$$K_{f1000} = 1 + q_{1000}(K_f - 1)$$

ile hesaplanır. Burada q_{1000} ifadesi 10^3 tekrar için çentik duyarlılık faktörü olarak tanımlanır. Aşağıdaki çizelgede çekme mukavemetine bağlı olarak q_{1000} değerleri verilmiştir. Arada kalan değerler lineer orantı kullanılarak bulunabilir

Tablo 31. Çekme Mukavemetine bağlı çentik duyarlılık faktörü (q_{1000})

Çekme mukavemeti (MPa)	500	550	600	700	800	1000	1400	2000
q_{1000}	0.09	0.1	0.15	0.21	0.28	0.35	0.5	0.7

5.7. Ortalama Gerilmenin Etkisi

Ortalama gerilmenin 0'dan farklı olması durumunda deneysel sonuçları ifade edebilmek için üç boyutlu bir diyagram çizilmesi gerekir. Bu diyagram tam değişken durum için çizilen Wöhler eğrisine bir σ_m eklenerek artan ortalama gerilmeyle yorulma limiti veya yorulma mukavemetindeki değişimi gösterir. Böyle bir deneyin yapılması zaten zor ve pahalı olan yorulma deneylerini tamamen zorlaştırır.

Buradaki zorluğu yenmek için tam değişken yorulma deneylerinden ve çekme deneyinden elde edilen değerlerle ortalama gerilmenin etkisi arasında bir bağlantı kurmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Bunlar **Gerber, Bağcı, Goodman, Soderberg** kriterleri olarak adlandırılır. Bu kriterler aşağıdaki formülasyonlarda belirtilmiştir.

Gerber kriteri,

$$\frac{\sigma_a}{R_{fN}} + \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \leq \frac{1}{EK}$$

Bağcı kriteri

$$\frac{\sigma_a}{R_{fN}} + \left(\frac{\sigma_m}{R_e} \right)^4 \leq \frac{1}{EK}$$

Soderberg kriteri;

$$\frac{\sigma_a}{R_{fN}} + \frac{\sigma_m}{Re} \leq \frac{1}{EK}$$

Goodman kriteri,

$$\frac{\sigma_a}{R_{fN}} + \frac{\sigma_m}{R_m} \leq \frac{1}{EK} \text{ ve } \sigma_m + \sigma_a \leq \frac{Re}{EK}$$

Gerber hasar bölgesi sınırı olarak bir parabol önermiş Goodman ve Soderberg ise birer doğru önermişlerdir. Daha sonra maksimum gerilmenin akma sınırını geçmesi halinde makine elemanında kalıcı şekil değiştirme meydana geleceği gerçeği uygulamak üzere Goodman ikinci bir doğru daha tanımlamıştır.

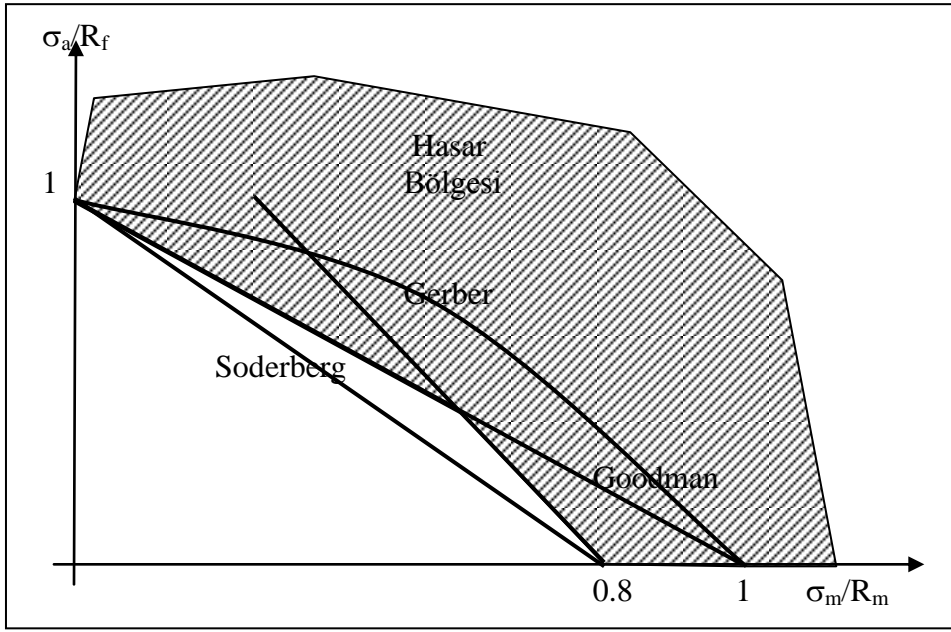
Yapılan deneysel çalışmalar hasarların daha ziyade Goodman ve Soderberg'den dışarıda meydana geldiği, çok az hasarın Goodman içinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda Soderberg çok güvenilirli bir sınır oluşturmaktadır. Soderberg, Goodman ve Gerber diyagramlarının karşılaştırılması şekilde gösterilmiştir.

Emniyet katsayısı da dikkate alındığında Goodman kriteri yeterli sonucu vermektedir. Bununla birlikte bir tek formülle sonuca gidilmesi açısından zaman zaman Soderberg kriteri de kullanılmaktadır. Formüllerde verilen R_{fN} değeri yerine sonsuz ömür için R_{fD} değeri de yazılabilir. Ortalama gerilme çeki olduğu zaman eleman üzerinde olumsuz etki yaparken bası olduğu zaman genel olarak olumlu bir etki yapması beklenir. Bu durumu tanımlamak üzere diyagramdan sol tarafa doğru ortalama gerilme eksenine uzatılır ve basıdaki durum tanımlanmış olur.

Ortalama ve değişken gerilmeler,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

olarak ifade edilir.

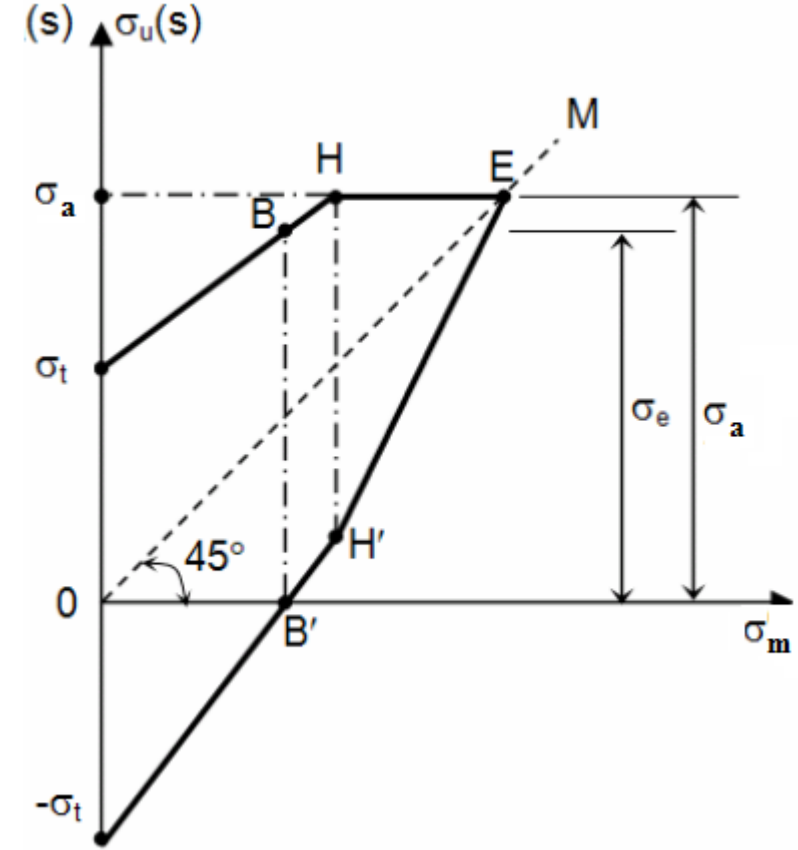


Goodman, Gerber ve Soderberg Grafiklerinin Karşılaştırılması

Ortalama gerilme eğrisi değişince Wöhler eğrisi de değişir. Aynı malzemeye ait çok sayıda Wöhler eğrisi bulunmaktadır. Wöhler eğrisinin ortalama gerilme ve sürekli mukavemet değerleri Smith diyagramı da denilen Sürekli Mukavemet Diyagramı'nda tek diyagram halinde gösterilir. Smith Diyagramı aşağıdaki adımlar gerçekleştirilerek çizilir:

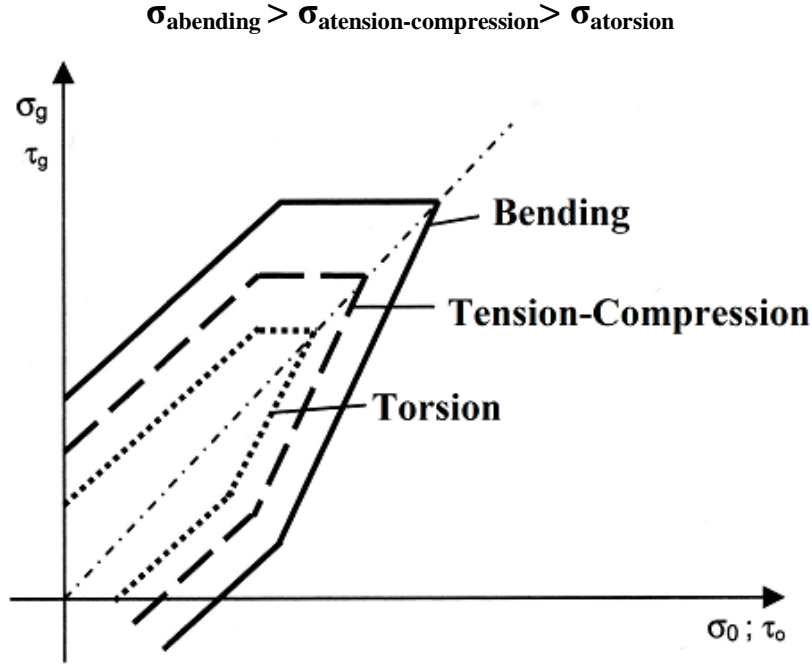
- ❖ Yatay eksene ortalama gerilmeler, düşey eksene ise sürekli mukavemet sınırı, akma ve çekme mukavemet değerleri işaretlenir.
- ❖ Sürekli mukavemet sınırları statik mukavemet sınırında (A noktasında) birleştirilir.
- ❖ Sünük malzemeler için mukavemet sınırı akma gerilmesi olduğundan aşağıdaki şekilde verildiği gibi sınırlar belirlenir. (B noktası)
- ❖ Elde edilen bu diyagram vasıtasıyla, belirlenen herhangi bir ortalama gerilme için, gerilme genliği, maksimum ve minimum gerilme değerleri diyagramdan okunabilir. Eğer nominal gerilmeler diyagram içinde kalırsa numune sonsuz ömürlü, diyagram dışında ise sonlu ömürlüdür.

Örneğin, çeliğin σ_t titreşim dayanımı, σ_e eşik dayanımı ve σ_a akma sınırı ise bu üç değere bağlı olarak sürekli dayanım diyagramı aşağıda görüldüğü gibi doğru parçalarıyla çizilebilir.



Plastik şekil değiştirmeleri önemli olan malzemelerde, sürekli dayanım sınırlarına ait yanda verilen eğrileri biraz değiştirmek gerekir. Örneğin, çelik gibi malzemede, sınır gerilmeler akma değerine ulaşıncı, çatlakların doğması yorulmadan çok plastik şekil değiştirmelerden olur. Bu gibi durumlarda sürekli dayanım sınırları akma gerilmesiyle sınırlandırılır, diğer bir deyişle akma gerilmesinden daha büyük değerler sınır olarak alınmaz. Çok defa bu gerçek göz önünde bulundurularak, plastik şekil değiştirme yeteneği fazla olan bir cismin sürekli dayanım sınır eğrilerini, o malzemenin birkaç karakteristik değerine bağlı olarak bir takım doğrularla yaklaşık olarak simgelemek olanaklıdır. Smith diyagramının teorik olarak çizimi ayrıntılı bir şekilde verilecektir.

Dinamik kuvvetlerin meydana getirdiği zorlamanın, çeki-bası ve kayma olmasına göre elde edilecek sürekli mukavemet diyagramları birbirinden farklı değerlerde olup her üçünü bir diyagramda göstermek de mümkündür. Eğilmede tüm kesit aynı çeki-basıya zorlanmadığı için, sadece çeki-bası zorlamasının olduğu duruma göre daha büyük bir tam değişken sürekli mukavemet değeri elde edilir. Sonuç olarak sürekli mukavemet diyagramlarında aynı malzeme için;

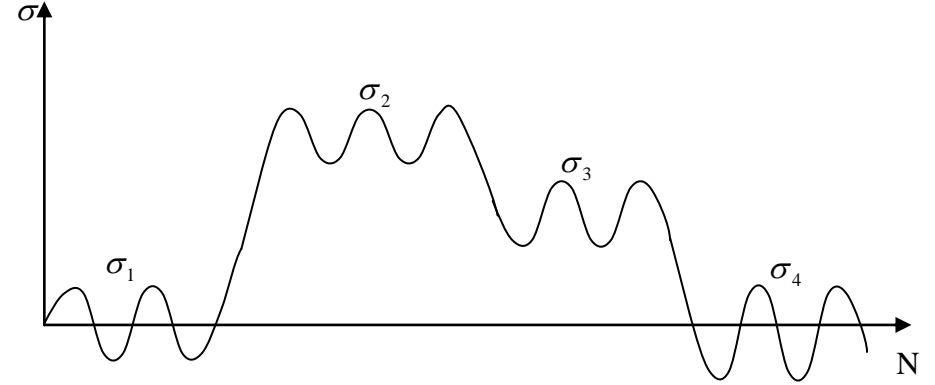


5.2.4 Birçok gerilme Türünün Ardı Ardına Uygulanması Durumu

Önceki problemlerde bir gerilme türü makine parçasına kullanıma alındığından hasara kadar aynı şekilde etki eder şekilde kabul edilmiştir. Oysa gerçek uygulamalarda durum farklıdır. Sürekli değişen karakterde bir yük uygulanması söz konusudur. Sonuçta her karakterdeki yük makine parçasının toplam ömründen bir kısmını tüketerek sonuçta hasarın gerçekleşmesine götürür.

Bazı durumlarda yük tamamen rast geledir. Bu durumlarda makine parçasının gerçek şartlarda denemesi gerekir. Bazı durumlarda ise değişken gerilmeler bloklar halinde etki eder. Bu durumda soru, belirli blokların kaç kere uygulanabileceği şekline dönüşür.

Şekildeki blok örnek alındığında D değeri 1 olduğunda parça hasara uğramış demektir. Bunu elde etmek için D değerinin kaç tekrarında 1 olduğu araştırılmalıdır.



Şekil: Karışık Yükleme Durumu

$$\frac{\sigma_1 \text{tekrarsayısı}}{\sigma_1 \text{ömür}} + \frac{\sigma_2 \text{tekrarsayısı}}{\sigma_2 \text{ömür}} + \dots = D$$

Birleşik Gerilme Durumu

Bileşik gerilme durumunda statik gerilme ile hasar konusunda işlenen hasar teorilerden, sünek malzemeler için Tresca ve Von Mises teorileri, gevrek malzemeler için maksimum gerilme teorisi kullanılmaktadır. Bu teorileri uygularken etki eden gerilmenin ortalama gerilme ve değişken gerilme olarak iki parçaya ayrılması ve eş değer gerilmelerin her bir parça için ayrı ayrı hesaplanarak Goodman kriterlerindeki formülasyonlarda yerlerine yazılması gerekir.

Eş değer gerilme hesaplanırken her bir gerilmeye ait yorulma limiti düzeltme faktörleri ayrı ayrı ele alınmalıdır. Genel olarak bileşik gerilmeye etki ettirilecek faktörler elde edilirken

büyük olan gerilme faktörleri dikkate alınır. Asal gerilmelerin ortalama ve değişken gerilme türünden değerleri;

$$\sigma_{1,2a} = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + \tau_{xya}^2}$$

$$\sigma_{1,2m} = \frac{\sigma_{xm} + \sigma_{ym}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xm} - \sigma_{ym}}{2}\right)^2 + \tau_{xym}^2}$$

olur. Buradan Tresca hasar teorisine göre Goodman kriterini yazacak olursak,

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)m}{R_m} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)a}{R_{fN}} \leq \frac{1}{EK}$$

olarak ifade edilir. Buna ilaveten Von Mises hasar teorisine göre Goodman teorisini yazacak olursak,

$$\sigma_{vma} = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2}$$

$$\sigma_{vmm} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2}$$

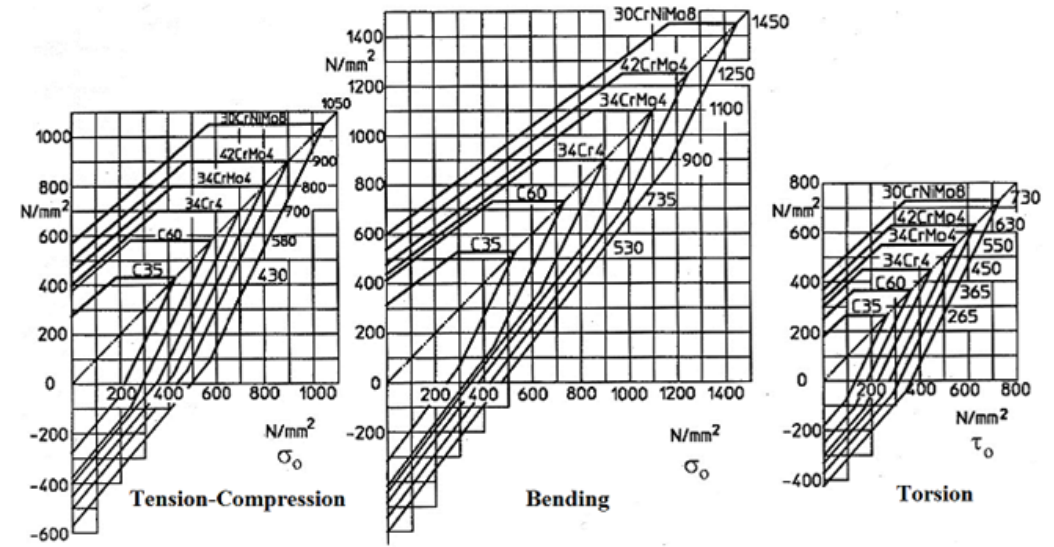
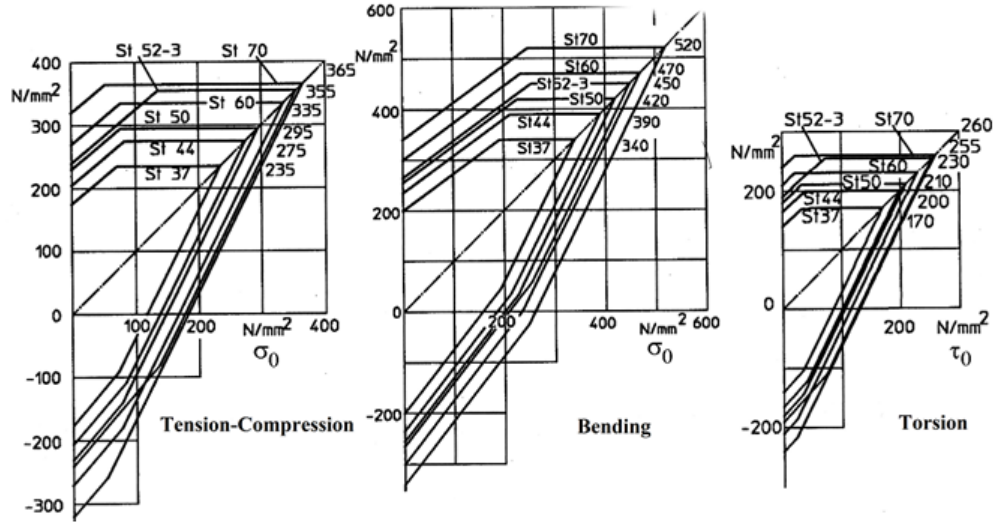
olur. Buradan Goodman kriterini,

$$\frac{\sigma_{vmm}}{R_m} + \frac{\sigma_{vma}}{R_{fN}} \leq \frac{1}{EK}$$

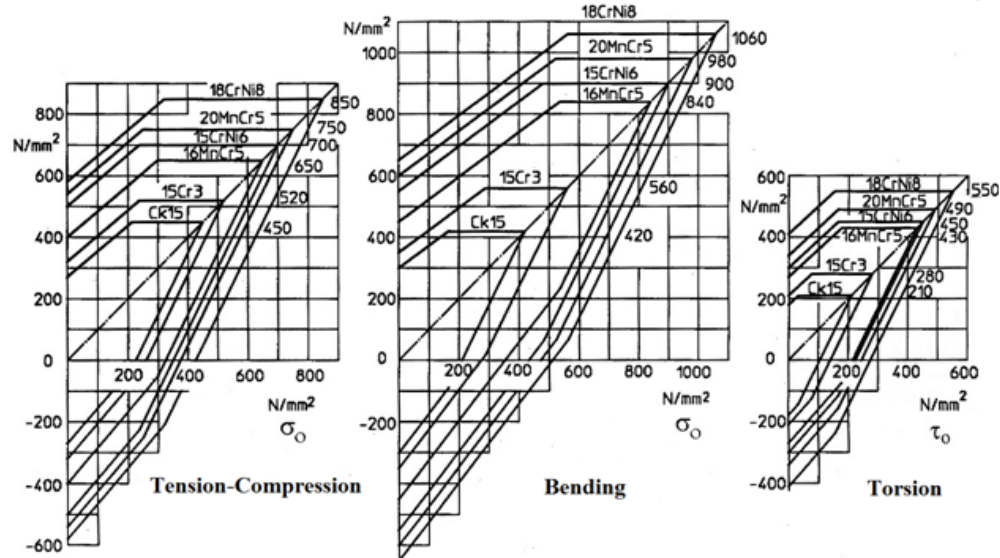
yazabiliriz. Gevrek malzemeler için maksimum normal gerilme teorisine göre Goodman kriterini yazacak olursak,

$$\frac{|\sigma_{1m} veya \sigma_{3m}|}{R_m} + \frac{|\sigma_{1a} veya \sigma_{3a}|}{R_{fN}} \leq \frac{1}{EK} \text{ olur.}$$

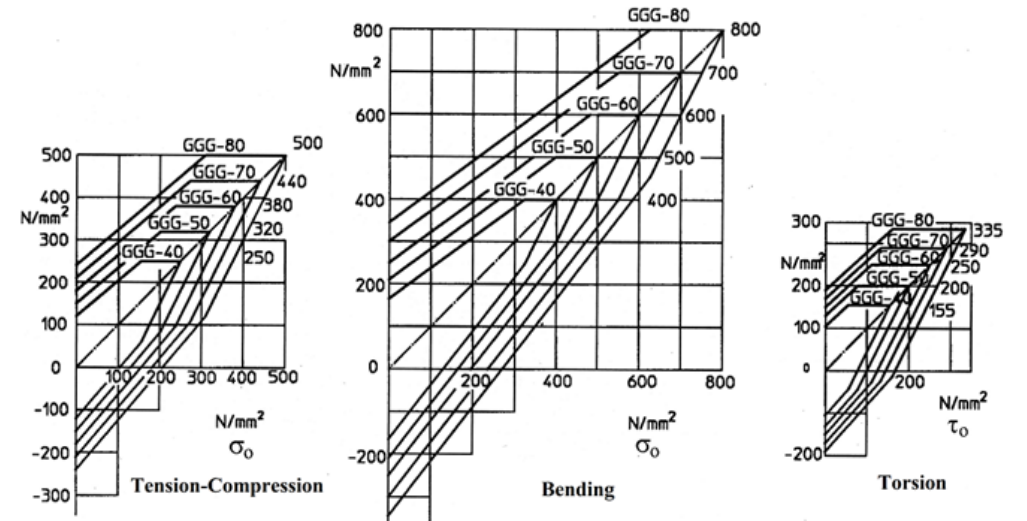
Sürekli Mukavemet Diyagramları



İnşaat Çelikleri için Sürekli Mukavemet Değerleri



İslah Çelikleri için Sürekli Mukavemet Değerleri



Sementasyon Çelikleri için Sürekli Mukavemet Değerleri

Dökme Demirler için Sürekli Mukavemet Değerleri

6. BAĞLANTI ELEMANLARI

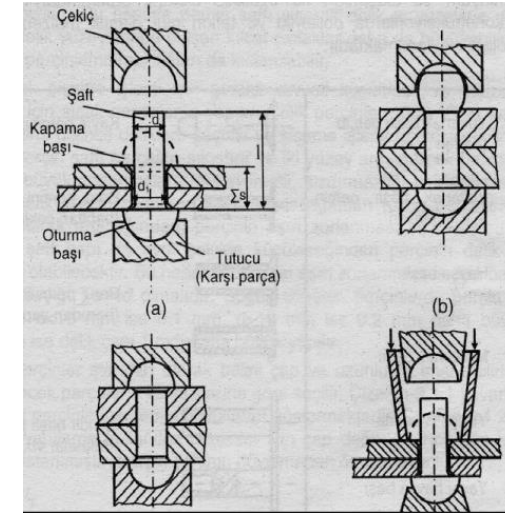
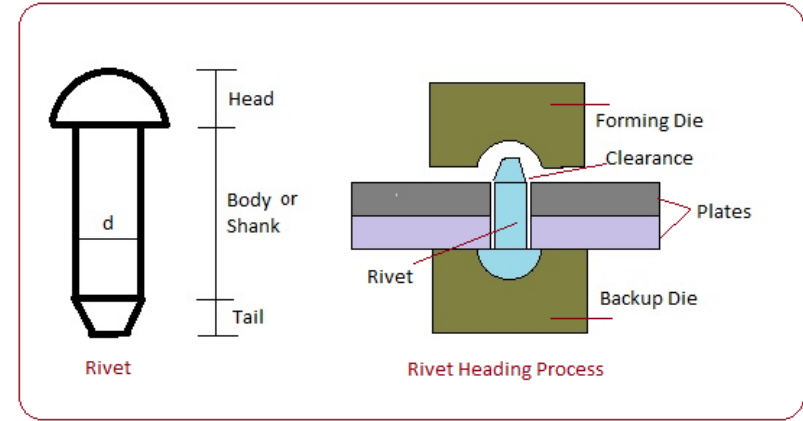
Makine elemanlarını birleştirmek için kullanılan yöntem ve elemanlar bağlantı elemanları olarak adlandırılır. **Sökülebilen** ve **sökülemeyen** olmak üzere iki grupta incelenir. Bağlanan elemanlara yada bağlantı için kullanılan elemana zarar vermeden bağlantı bozulabiliyorsa bunlar sökülebilen bağlantılar olarak değerlendirilir. Cıvatalı bağlantılar bu şekilde bağlantı elemanlarıdır. Perçinli bağlantılar, yapıştırırmalı ve kaynaklı bağlantılı sökülemeyen bağlantılar olarak adlandırılır. Bağlama elemanları ayrıca **şekil bağı**, **kuvvet bağı** ve **malzeme bağı**, olmak üzere başlıca üç ana gruba ayrılırlar.

Bağlantı şekilleri ve bağlantı elemanları

Şekil bağı bağlantılar	Kuvvet bağı bağlantılar	Malzeme bağı bağlantılar
Uygu kaması	Ön yüklemeli kamalar	Kaynak
Pim, Perno	Sıkma bağlantıları	Lehim
Emniyet	Sıkı (pres) geçmeler	Yapıştırma
Profilli mil	Konik geçmeler	
Perçin	Cıvata-somun bağlantıları	

6.1 Perçinli Bağlantılar

Perçinler, bir başı hazır diğer başı ise montaj esnasında biçimlendirilen en az iki parçayı birleştirmek için kullanılan sökülemeyen bağlantı elemanlarıdır. Perçinli bağlantılar, kaynaklı bağlantı yapılamadığı durumlarda kullanılır. Sökülemeyen bir bağlantı elemanı olan perçin kaynaklı birleştirmenin mümkün olmadığı yada çeşitli mahsurlar içerdiği durumlarda kullanılmaktadır. Bu durumlar genellikle arazide yapılan birleştirme işlemlerinde, farklı iki metalin birleştirilmesi gerektiği durumlarda ortaya çıkar. Perçinin bir tarafı hazır diğer tarafı ise birleştirme esnasında yapıldığında uygulanması gereken kuvvete göre sıcak veya soğuk olarak uygulanabilir. Örneğin çelikler için 9 mm çapa kadar soğuk daha büyük çaplar için sıcak perçinleme yapılmalıdır. Ayrıca gerekli kuvvet elle dövme suretiyle veya çeşitli makinelerle uygulanabilir.



Şekil: Perçin Bağlama Şekli

Perçin bağlantılarının avantajları

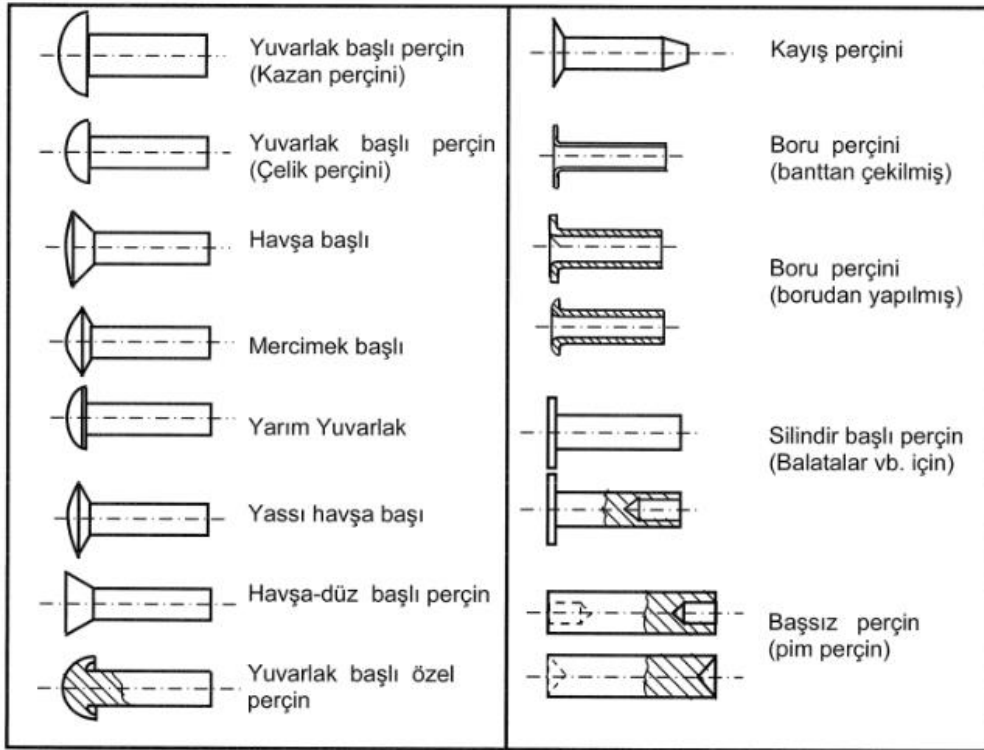
- ❖ Sızdırmazlık
- ❖ Farklı malzemelerin birleştirilmesi

Perçin bağlantılarının avantajları

- ❖ Perçin deliklerinin parçaların mukavemetini zayıflatması
- ❖ Parçaların birbiri üzerine bindirilmesi
- ❖ Tasarım açısından ağırlık parametresinin oluşması

Perçin malzemesi, bağlanacak malzemenin cinsine bağlıdır. Galvanik korozyon meydana gelmemesi için perçin malzemesi ile bağlanan parçalar aynı cinsten yapılmalıdır. Bununla beraber bağlantıda perçin malzemesinin mukavemeti bağlanan parçanın mukavemetinden daha düşük seçilir. Çeliklerden özellikle yüksek plastik şekillendirme kabiliyeti olan genel yapı çelikleri, otomat çelikleri ve ıslah çelikleri yukarıdaki özelliklere dikkate edilmek şartıyla kullanılabilir. Farklı iki parçanın birleştirilmesi durumunda korozyonu önlemek için farklı malzemelerin teması önleyecek izolasyon önlemlerinin alınması gerekir.

Aşağıda başlı perçinler, başsız perçinler ve delikli perçinlere örnekler verilmiştir.



Şekil: Perçin Çeşitleri

6.1.1. Perçin Hesapları

Perçinler yükleme şekline göre eksenel ve eksantrik zorlamaya maruz kalabilirler;

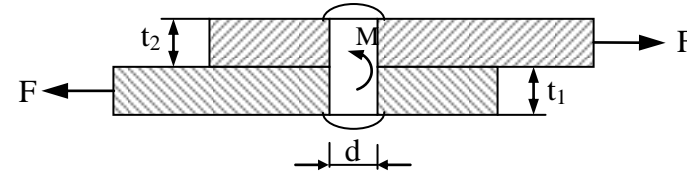
I. Eksenel zorlanan perçinler

Eksenel zorlanan perçinlerde genel olarak yük perçin bağlantısının ağırlık merkezinden geçer. Perçinlerin zorlanma şekillerine bağlı olarak meydana gelen hasarlar:

Perçinin Eğilmesi: Perçini eğmeye çalışan moment,

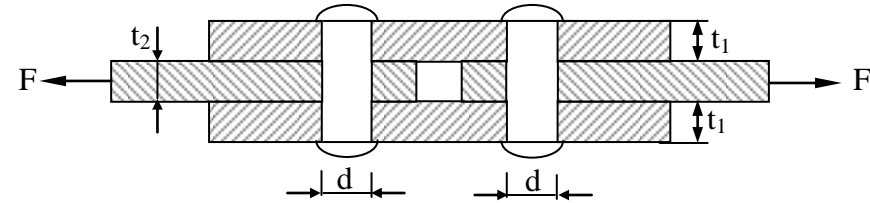
$$M = F \frac{t_1 + t_2}{2}$$

ile ifade edilir. $t_1 + t_2$ değeri arttıkça eğmeye çalışan moment artar. Küçükse bu gibi perçinleme yapılabilir. Şekil de tek bir perçin ile iki plakanın bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil: Tek Bir Perçinle İki Plakanın Bağlantısı

İnce plakaların birleştirilmesinde eğilme ihmal edilebilir. Özellikle 2 ile 3 mm'lik plakaların birleştirilmesinde kullanılabilir. Kalınlığı daha büyük plakaların perçinlenmesinde ise aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kapaklı perçinleme kullanılır.



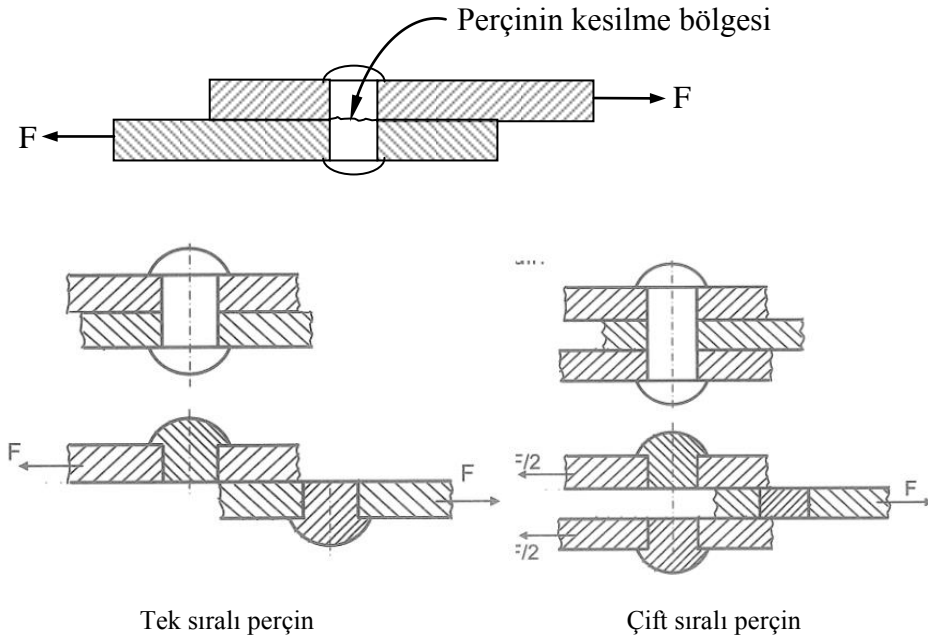
Şekil: Kapaklı Perçinleme Bağlantısı

Perçin bağlantısının eğilmeye zorlanmaması gerekir. Eğilme momenti sac kalınlıklarına bağlı olduğunda küçük sac kalınlıklarında bindirme şeklinde perçinleme yapılabilirse de sac kalınlığının artması ile perçinlemenin kapaklı şekle döndürülmesi gerekir.

Perçinin kesilmesi : Perçini kesmeye çalışan gerilme,

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{znA} \leq \tau_{em} \quad \text{z:perçin sayısı, n=tesir sayısı, perçin şaftının kesiti}$$

olarak ifade edilir. Şekil de perçinin uygulanan kuvvetler sonucunda kesilme bölgesi gösterilmiştir.



Şekil: Perçinin Kesilme Bölgesi

Yukarıdaki şekilde tek sıralı perçinli bağlantı durumunda parçaya gelen (F) kuvveti perçin sayısına bölünerek verilen formüllerde hesaba katılır. Perçinin kesilmeye karşı statik yüklemdeki dayanım değerini,

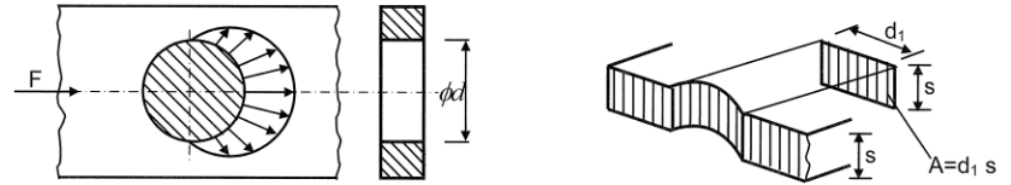
$$\tau \leq \frac{R_e}{2EK} \quad \text{olarak ifade edilir. Tekrarlı yükleme durumunda dayanım değeri ise,}$$

$$\tau \leq C_b \frac{R_m}{4EK} \quad \text{olarak ifade edilir. Burada } C_b \text{ boyut faktörü olur perçin çapına göre seçilir.}$$

Perçin yüzeyinin ezilmesi : Perçini ezmeye çalışan basınç,

$$P = \frac{F}{z.d.s}$$

olarak ifade edilir.

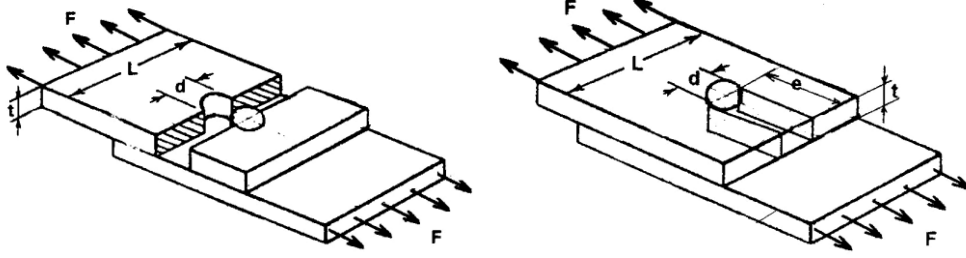


Eğer bağlantıda birden fazla kalınlıkta levha varsa **ince olan tabaka dikkate alınır.** Formüllerdeki boyutlandırmayı yapabilmek için statik yükleme durumunda perçinin akma gerilmesi kullanılır. Tekrarlı yükleme durumunda perçinli bağlantılar sonsuz ömre göre hesaplanır. Perçin silindirik bir parça olduğundan yorulma limiti düzeltme faktörlerinde boyut faktörünün dikkate alınması yeterli olacaktır. Perçin yüzeyinin statik yükleme durumunda ezilmeye karşı dayanım değeri,

$$\sigma \leq \frac{R_e}{EK} \quad \text{ile bulunabilir. Tekrarlı yükleme durumunda ise, } \sigma \leq C_b \frac{R_m}{2EK} \quad \text{şeklinde ifade edilir.}$$

Tek sıra perçinleme ile yeterli dayanım elde edilmediğinden sıra sayısı artırılır. İki sıralı perçinlemede perçine gelen kuvvet eşit olarak bölünür. Sıra sayısı ikiden fazla olduğu durumda sıralara gelen kuvvetler değişir.

Perçin saçının yırtılması: Perçinli bağlantılarda genel olarak yandan ve alından olmak üzere iki farklı yırtılma görülmektedir.



Şekil: Perçinli Bir Bağlantının Yan ve Alından Yırtılması

Şekildeki durumda olduğu gibi bir perçinin levhayı yandan yırtmaya çalışan gerilme,

$$\sigma = \frac{F}{t(L - zd)}$$

ile ifade edilir. Burada z perçin sayısını ifade etmektedir. Alından yırtmaya çalışan gerilme ise,

$$\tau = \frac{F}{et z}$$

olarak ifade edilir. Burada e perçinin bağlantı mesafesini göstermektedir. Perçinli bağlantılarda çalışma durumlarına göre değişik yükleme durumları söz konusudur. Yükleme durumunun farklı olması perçinin dayanım değerinin değişmesine sebep olacaktır. Çizelgede bir perçinin yandan ve alından yırtılmasına bağlı olarak statik, tekrarlı ve ortalama yükleme durumlarındaki dayanım değerleri gösterilmiştir.

Tam Değişken Yükleme Durumlarında Dayanım Değerleri

	Statik	Tekrarlı	Ortalama
Yandan yırtılma	$\sigma \leq \frac{R_e}{EK}$	$\sigma \leq \frac{R_m}{2EK} \frac{C_y}{K_f}$	$\frac{\sigma_m}{R_m} + \frac{\sigma_a}{R_{fD}} \leq \frac{1}{EK}$
Alından yırtılma	$\tau \leq \frac{R_e}{2EK}$	$\tau \leq \frac{R_m}{4EK} C_y$	$\frac{2\tau_m}{R_m} + \frac{2\tau_a}{R_{fD}} \leq \frac{1}{EK}$

$$\text{Çizelgeye göre yorulma limiti düzeltme faktörünü } (R_{fD}), R_{fD} \leq \frac{R_m}{2EK} \frac{C_y}{K_f}$$

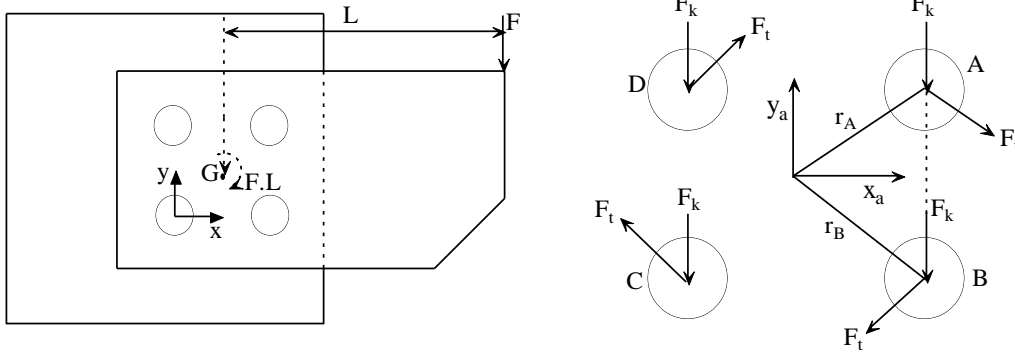
olarak belirtilir. Burada C_y yüzey faktörünü, K_f yorulma çentik faktörünü ve R_m çekme dayanımını ifade etmektedir. Çok sıralı perçinleme durumunda baştaki perçinler yükün büyük bir kısmını sonraki perçinler ise daha sonraki kısmını ise daha küçük bir kısmını taşıdığına dikkat edilmelidir. Altı sıralı perçin için 1. sıra ortalama gerilme 1'in 6'sı kadar 2. sıra 0,9 kadar 3. sıra 0,6'sı kadar gerilme ile ilişkilendirilir.

Eksenel yüklü perçin bağlantıları için pratik değerler;

1. Perçin merkezleri arasındaki mesafe en az perçin çapının 3 katı olmalıdır.
2. Perçin merkezi ile alın arasındaki mesafe (e) perçin çapının iki katı olmalıdır.
3. Perçin merkezi ile yan kenar arasındaki mesafe (e_1) saçın mukavemetine göre perçin çapının 1,5 2,5 katı arasında alınır.
4. Perçin ile sac aynı mukavemete sahipse perçinin kesilmesi ve yüzeyinin ezilmesi formüllerin birlikte kullanıldığında bindirme bağlantılarında perçin çapının sac kalınlığının 2,5 katı olması gerektiği görülür. Kapaklı bağlantılarda ise bu değer 1,25'e iner.

II. Eksantrik zorlanan perçinler

Perçinli bağlantılar eksenel zorlanmaya maruz kalabildiği gibi eksantrik zorlanmalara da maruz kalabilmektedir. Eksantrik zorlanmaya maruz kalan perçinler hem burulmaya hem de kesilmeye zorlanmaktadır. Perçini bu iki zorlanma durumunun bileşkesi hasara uğratmaktadır. Şekil'de eksantrik zorlanma durumunda perçinler üzerinde meydana gelen kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil: Perçinleri Zorlayan Kuvvetler

Burulma sonucunda herhangi bir perçinde oluşan gerilme,

$$\tau = \frac{Tr}{I}$$

olarak ifade edilir. Burada T burulma momentini, I atalet momentini, r ise ağırlık merkezi ile perçin merkezi arasındaki uzaklığı gösterilmiş olup, A perçini için,

$$r_A = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$$

ile ifade edilir. Buradaki x ve y koordinatları, ağırlık merkezinden perçin merkezlerine uzaklıklarıdır. Ağırlık merkezi ise;

$$\bar{x} = \frac{A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_4x_4 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots}$$

$$\bar{y} = \frac{A_1y_1 + A_2y_2 + A_3y_3 + A_4y_4 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots}$$

ile belirtebiliriz. Burulma momentini $T = F.L$ ile hesaplanır. Atalet momenti ağırlık merkezine göre alınır ve

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^4}{64} + A_i . r_i^2$$

şeklinde. Bu ifadelerle birlikte perçinlerde meydana gelen kesme kuvveti,

$$F_k = \frac{F}{N}$$

ile ifade edilir. Burada N perçin sayısını göstermektedir. Burulmadan dolayı meydana gelen **teğetsel kuvvet**,

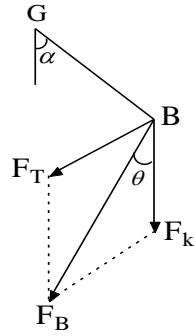
$$F_T = \frac{T.r}{\sum r^2}$$

olur. Eğer şekil 'de gösterildiği gibi sadece A perçini için teğetsel kuvveti yazacak olursak,

$$F_{TA} = \frac{Tr_A}{r_A^2 + r_B^2 + r_C^2 + r_D^2}$$

olur. Burada sadece A perçini için teğetsel kuvvetin hesaplanması durumu ele alınmıştır. Aynı ifade ile B, C ve D perçinleri için yukarıdaki eşitlik yazılabilir. Perçin hesaplamaları sonucunda genellikle ağırlık merkezinden en uzak perçin tehlikelidir. Aynı zamanda F_k ve F_T kuvvetlerinin bileşkesi alınır.

Görüldüğü gibi perçinlere kesme kuvveti birde teğetsel kuvvet etki etmektedir. Bu iki kuvvetin bileşkesi perçinin konumuna göre birbirini artırma veya azaltma şeklinde etki etmektedir. Perçin için yapılması gereken kesme veya yüzey ezilmesi hesaplarını en tehlikeli perçine göre yapılmasıdır. Buda ağırlık merkezinden en uzak noktadaki ve bileşke kuvvetin en büyük olduğu perçin olacaktır. Şekil'de teğetsel ve kesme kuvvetlerinin bileşke durumları gösterilmiştir.



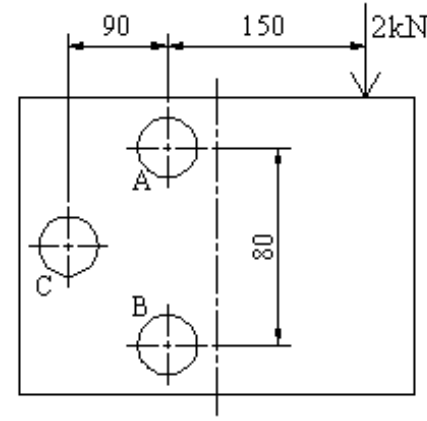
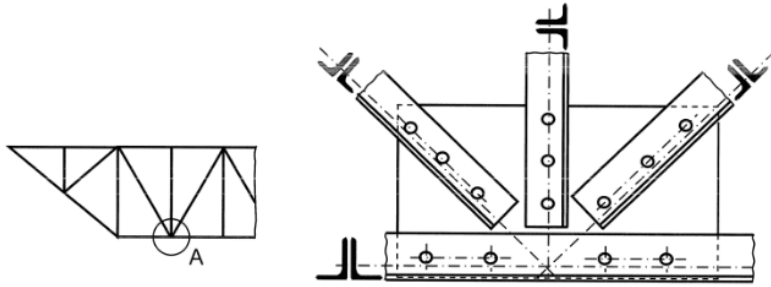
Şekil: Perçinli Bağlantılarda Teğetsel ve Kesme Kuvvetleri

Bu durumda bileşke kuvveti yazacak olursak,

$$F_B = \sqrt{(F_{Tx})^2 + (F_{Ty} + F_k)^2}$$

olur. Aynı zamanda yukarıdaki şekilde belirtilen θ açısı, $\tan \theta = \frac{y_b}{x_b}$ şeklinde ifade edilir.

Çelik konstrüksiyonda perçin birleştirme ve düğüm noktası örneği



Örnek Soru;

Şekildeki bağlantıda S235 çeliğinden yapılmış 10 mm çaplı perçinler kullanılacaktır.

- F yükünden dolayı perçinlere gelen kesme gerilmesini hesaplayınız.
- F yükünün meydana getirdiği burulma momentin etkisiyle perçinlerde meydana gelen gerilmeyi hesaplayınız.
- Bağlantının statik yükleme durumuna göre yeterli olup olmadığını belirleyiniz.
- Saç kalınlığı 5 mm olduğuna göre alından yırtılma olmaması için perçin merkezi ile alın arasındaki mesafe ne olmalıdır.

6.2. Kaynaklı Bağlantılar

Kaynaklı bağlantı iki metalin uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılıp birleştirilmesi olarak tanımlanır. Bu birleştirmede kullanılan kaynak yöntemine göre ergime söz konusu olabilir, ilave metal kullanılabilir ve parçalara dışarıdan bir basınç uygulanabilir.

Bir çok kaynak yöntemi bulunmaktadır. Pratik açıdan en çok kullanılanlar gaz ergitme kaynağı, elektrik ark kaynağı, elektrik direnç kaynağı, sürtünme kaynağı, difüzyon kaynağı yöntemidir. Kaynak sırasında ısınma nedeniyle kaynatılacak malzemeler kimyasal etkilere daha kolay maruz kaldığı için ısına bölgenin korunması gerekir. Bunun için kaynak yöntemine bağlı olarak koruyucu gazlar pastalar veya ısı ile birlikte ergiyerek kaynak bölgesini kaplayan katı maddeler kullanılmaktadır.

Birleştirilecek parçalar arasında bir boşluk bulunması halinde bu boşluğun ilave metal ile doldurulması gerekir. Kalınlığı büyük parçalarda ise homojen ısınma sağlamak amacı ile parçaların birleşecek kısımlarında kaynak ağzı denilen kanallar açılır. Kaynak hesapları elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalar için geliştirilmiş olup diğer kaynak yöntemleri ile yapılan bağlantılar için buradan elde edilen hesaplama yöntemi geliştirilebilir.

I. Kaynak bağlantı dayanımını etkileyen faktörler

Çentik Etkisi: Kaynaklı bağlantılarda çentikler bağlantının dış geometrik yapısından kaynaklanabileceği gibi birleştirme sırasında meydana gelen kusurlardan da kaynaklanabilir. Dış geometrik yapıdan ortaya çıkan çentik etkisi yorulma hesaplarında K_f değeri ile dikkate alınmaktadır.

Kaynak kusurlarından kaynaklanan çentik etkisi: Kaynak sırasında çevresel etkiler, kaynakçının yeteneği ve psikolojisi kaynak edilen malzemelerin kaynaklama kabiliyeti gibi faktörler çeşitli kusurların oluşmasına yol açar bunlar cüruf boşlukları, nüfuziyet eksikliği gibi gözle görülemeyen kusurlar olabileceği gibi artık gerilmeler ve yanma sonucu meydana gelen çentiklerle, ergime sırasında gerçekleşen sıçramalar sonucu ortaya çıkan gözle görülebilen kusurlardır. Gözle görülebilen kusurlar talaşlı işleme ile veya yeniden doldurarak giderilebilir ise de gözle görülemeyen kusurların giderilmesi mümkün değildir. Önemli kaynak bağlantılarında bu kusurların tahribatsız inceleme yöntemi ile incelenerek giderilmesi gerekir. Muayene yapılmayan kaynaklarda ise görülmeyen kusurların etkisini dikkate almak amacıyla bir kaynak kalitesi faktörü (C_{kk}) tanımlanmıştır. Otomatik makinelerle yapılan ve çevresel etkilerin iyi kontrol edildiği durumlarda kaynak kalite faktörü $C_{kk}=1$ olarak alınır. Kaynakçının ustalığına ve çevresel etkilerin durumuna göre 0,5 'e kadar düşen kaynak kalitesi faktörleri alınabilir. Genel olarak C_{kk} değerinin 1- 0,8 ve 0,5 alındığı kaynak kalitesi sınıfı kullanılmaktadır.



Hidrojen Gevrekliği: Kaynak sıcaklığında atomik yapıda bulunan hidrojen iyi korunmayan kaynak bölgesine hızla nüfuz eder. Düşük sıcaklıklarda ise hidrojen molekülü oluşturmaya çalışır. Molekül hidrojenin hacmi atomik hidrojenden çok büyük olduğu için bu bölgelerde zorlanmalar meydana gelir ve malzeme sünek olmasına rağmen gevrek bir davranış gösterebilir.

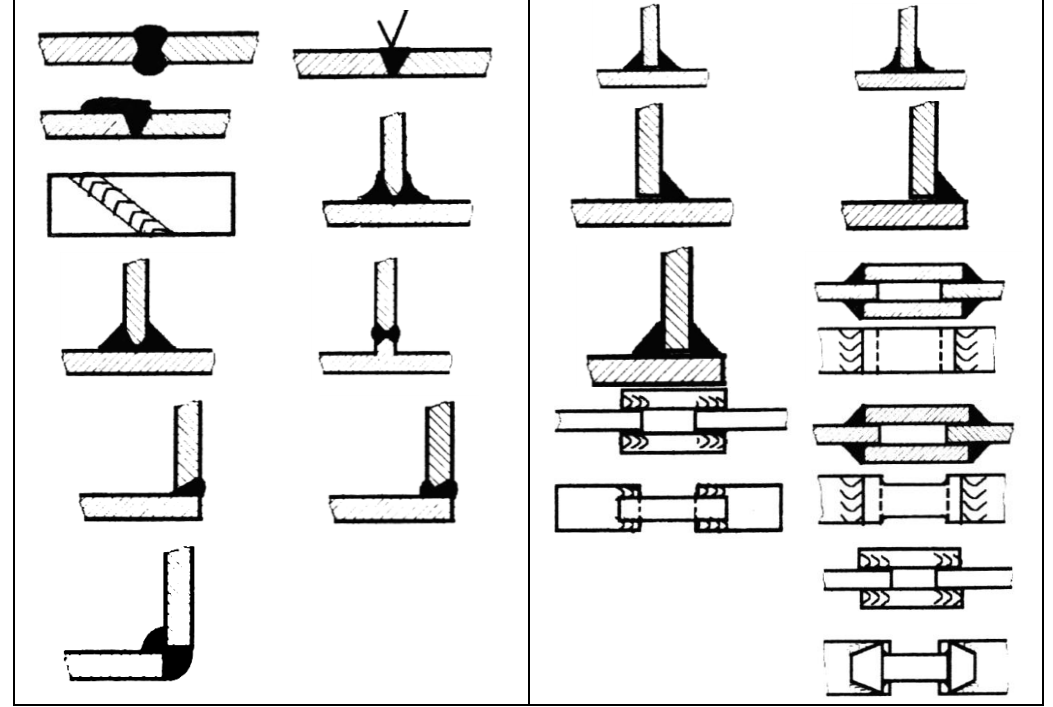
Kaynak sırasında farklı ısınma ve soğumalar farklı miktardaki şekil değiştirmeler iç gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu iç gerilmeler önemli bağlantılarda gerilme giderme tavlama ile ortadan kaldırılmalıdır. Bunun yapılmaması durumunda kaynak dikişi iç gerilmelerin birbirini dengeleyerek yok etmesi amacıyla çaprazlanarak yapılmalıdır.

Kaynak dikişinin dayanım değeri: Kaynak dikiş bölgesinin mukavemet değeri esas metalin (birleştirilen parçaların) dayanım değerine göre belirlenir. Literatürde farklı değerler olmakla beraber çelik bina inşaatları için normal gerilme ile zorlanan yerlerde esas malzemenin dayanım değerinin %60'ı kayma gerilmesi ile zorlanan yerlerde ise %40'nın alınması önerilmektedir. (R_e yerine $0,6R_e$ veya $0,4R_e$, R_m yerinde $0,6R_m$ veya $0,4R_m$) diğer kaynaklı bağlantılarda ise deneysel olarak elde edilmiş bir değer yoksa esas malzemenin dayanım değerleri daha önce verilen hesaplamalarda olduğu gibi (hasar teorilerine dayanarak) kullanılır.

Kaynaklı Bağlantılarda Kaynak Çeşitleri: Birleştirilecek olan malzemelerin geometrik özelliklerine bağlı olarak değişik kaynak çeşitleri bulunmaktadır. Bu kaynak çeşitleri çizelge de gösterilmiştir.

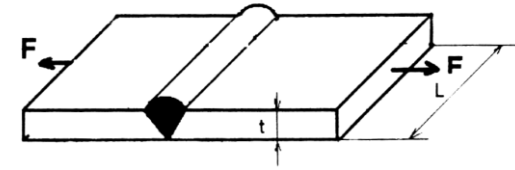
Kaynak Türleri

Alın (Küt) Kaynak Çeşitleri	Köşe Kaynak Çeşitleri
	



II. Kaynaklı bağlantı hesapları

Alın (Küt) Kaynağı: Bu kaynak türü düzgün levhaların birleştirilmesinde kullanılır. Şekil de basit bir alın kaynak türü gösterilmiştir.



Şekil: İki Plakanın Alın kaynağı İle Birleştirilmesi

Kaynak bağlantısındaki çekme durumunda kaynağı zorlayan gerilme, $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{t.L}$ ile ifade edilir. Burada F kaynak dikişini zorlayan kuvvet, A kaynak dikişinin alanı ve t kaynak yapılan levhanın kalınlığıdır. Kaynak dikişinin statik yükleme durumundaki dayanım değeri,

$$\frac{F}{A} \leq \frac{C_{kk} \cdot R_e}{E_k}$$

ile gösterilir. Burada C_{kk} kaynak kalitesi faktörünü ifade etmektedir. Tam değişken yükleme durumundaki dayanım değeri,

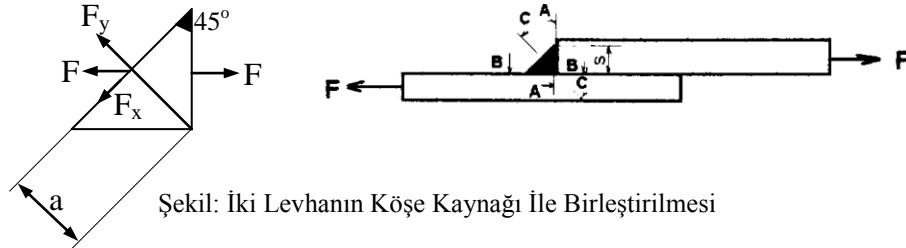
$$\frac{F}{A} \leq \frac{C_B C_y C_\phi C_{kk}}{K_f} \cdot \frac{R_m}{2Ek}$$

olur. Ortalama gerilme bulunma durumunda Goodman kriterini ele aldığımızda,

$$\frac{\sigma_m}{R_m} + \frac{\sigma_a}{R_{fD}} \leq \frac{1}{EK} \quad \sigma_m + \sigma_a \leq \frac{R_e}{EK}$$

olur. Eğer bağlantı çelik bir binada kullanılan bağlantı ise R_e yerine $0.6R_e$, R_m yerine $0.6R_m$ yazılır.

Köşe Kaynağı: Birbiri üzerine oturtulmuş levhaların veya makine elemanlarının birbiri ile kaynatılması durumudur. Şekil de iki levhanın köşe bir kaynak ile birleştirilmesi gösterilmiştir.



Köşe kaynağı için şekilde gösterilen $a = 0.707s$ olarak ifade edilir. Köşe kaynağında kuvvete dik olan yüzey normal gerilme ile paralel olan yüzey ise kayma gerilmesi ile yüklenir. Bu kaynak bağlantılarında hasar en çok dikiş kalınlığı kesitinde meydana gelmektedir. Burada ise bileşik gerilme durumu söz konusudur. Yapılan analizler sonucu bileşik gerilme ve hasar teorileri yaklaşımları kullanılarak burada meydana gelen gerilme,

$$\tau = 0,8 \frac{F}{a.L}$$

olarak elde edilmiştir. Buradaki kayma gerilmesi F_y kuvvetinin oluşturduğu gerilmedir. F_x kuvvetinin oluşturduğu normal gerilme,

$$\sigma = 0,8 \frac{F}{a.L}$$

olarak ifade edilir. O halde kaynak dikişinde meydana gelen gerilmeler için $\sigma = \tau$ olarak söyleyebiliriz. Statik yükleme durumunda kaynak dikişinin dayanımı,

$$\tau = 0.8 \frac{F}{a.L} \leq \frac{R_e C_{kk}}{2Ek}$$

olarak yazılabilir. Tam değişken yükleme durumunda dayanım olarak,

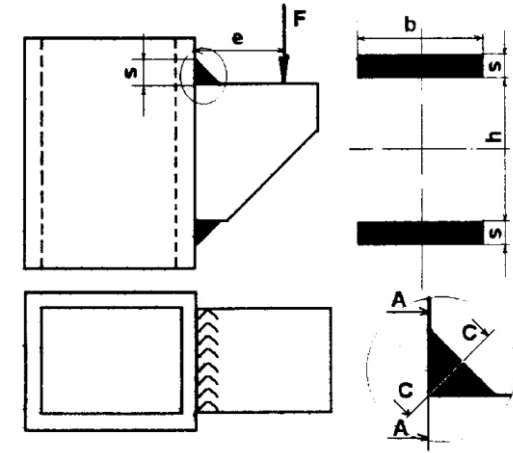
$$0.8 \frac{F}{aL} = \frac{C_B C_y C_\phi C_{kk}}{K_f} \cdot \frac{R_m}{4Ek}$$

olur. Bu kaynak çeşidi ile ilgili olarak Goodman kriterini yazacak olursak,

$$\frac{2\tau_m}{R_m} + \frac{2\tau_a}{R_{fD}} \leq \frac{1}{EK} \quad \sigma_m + \sigma_a \leq \frac{R_e}{2EK}$$

olur.

Kaynağın Düzlem Dışında Zorlanması: Şekil de gösterildiği gibi kaynak dikişi kaynak düzlemi dışından bir kuvvetle zorlanabilir.



Şekil: Kaynak Dikişinin Düzlem Dışından Zorlanması

F kuvveti ile zorlanan kaynak dikişinde parçada meydana gelecek olan moment,

$$M = F.e$$

ile ifade edilir. Parçada kuvvetten dolayı bir eğilme meydana gelmektedir. Bu eğilme göz önüne alıp dikiş kaynağındaki eğme gerilmesi,

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

olarak ifade edilir. Burada y kaynak ağırlık merkezinden en uzak dik mesafeyi göstermektedir. I ise kaynak dikişinin atalet momentidir. Bu kaynak dikişinde birde kayma gerilmesi oluşur. Bunu da

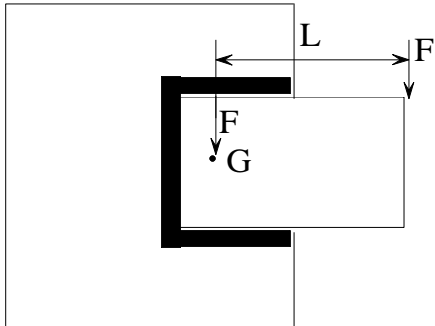
$$\tau = \frac{F}{A}$$

ile gösterebiliriz. Verilen şekil için $A = 2.b.s$ 'dir. Bu durumda eş değer gerilmeyi maksimum kayma gerilmesi teorisine göre;

$$\tau_{eş} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

ile gösterebiliriz. Maksimum kayma gerilmesine göre hesaplanmış olan eş değer kayma gerilmesi köşe kaynağı için verilmiş olan dayanım değerleri ile birlikte kullanılarak boyutlandırma yapılır.

Kaynak Dikişinin Eksantrik Zorlanması: Kullanılacak konstruksiyonun özelliğine bağlı olarak kaynakla bağlanan elemanlar yüke bağlı olarak eksantrik zorlanmalar meydana gelir. Şekil de görüldüğü gibi bir kaynak bağlantısında kaynak dikişi F kuvveti etkisi altında G ağırlık merkezi etrafında dönmeye zorlanmaktadır.



Şekil: Eksantrik Zorlanmaya Maruz Kalan Kaynak Bağlantısı

Şekilde gösterilen kaynak elemanında F kuvvetinin etkisi altında kayma gerilmesi,

$$\tau_k = \frac{F}{A} = \frac{F}{aL}$$

olur. x ve y yönünde meydana gelen burulma gerilmelerini,

$$\tau_{Tx} = \frac{Tr_x}{J} \quad \tau_{Ty} = \frac{Tr_y}{J}$$

olarak ifade edilir. r_x ve r_y ağırlık merkezinden en uzak noktadaki koordinatlardır. J ise polar atalet momentini gösterir. Bu eşitlikler ile birlikte kaynak dikişinde meydana gelen gerilme,

$$\tau = \sqrt{(\tau_k + \tau_{Ty})^2 + \tau_{Tx}^2}$$

olur. Bu ifadeyi statik yükleme durumundaki dayanım değeri ile ifade edersek,

$$\sqrt{(\tau_k + \tau_{Ty})^2 + \tau_{Tx}^2} \leq \frac{C_{kk} \cdot R_e}{2Ek}$$

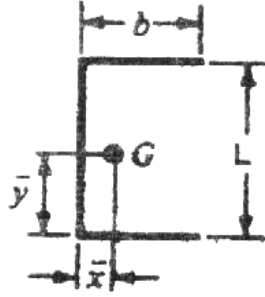
olur. Bununla birlikte tam değişken yükleme için dayanım değerini ise,

$$\sqrt{(\tau_k + \tau_{Ty})^2 + \tau_{Tx}^2} \leq \frac{C_B C_y C_c}{K_f} \cdot \frac{C_{kk} R_m}{2}$$

olarak ifade edilir.

Kaynak Dikişlerinin Atalet ve Polar Atalet Momentlerinin Hesaplanması

Kaynak dikişlerinin atalet ve polar atalet momentlerinin hesabının kolay yapılması için kaynak dikişinin kalınlığı hesaba katılmadan, kaynak dikişi bir çizgi olarak tanımlanır. Bu kabul ile bulunan atalet momentlerine birim atalet momenti ve birim polar atalet momenti olarak tanımlanır. Atalet momentini (I) ve polar atalet momentini ise (J) ile gösterilmektedir. Değişik kaynak durumlarındaki birim atalet momenti ve polar atalet momentleri ek çizelge ve şekiller bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil: Kaynak Dikişi

Yukarıdaki şekilde gösterilen örnek kaynak dikişine ait birim atalet momenti,

$$I = \frac{L^2}{12} (6b + h)$$

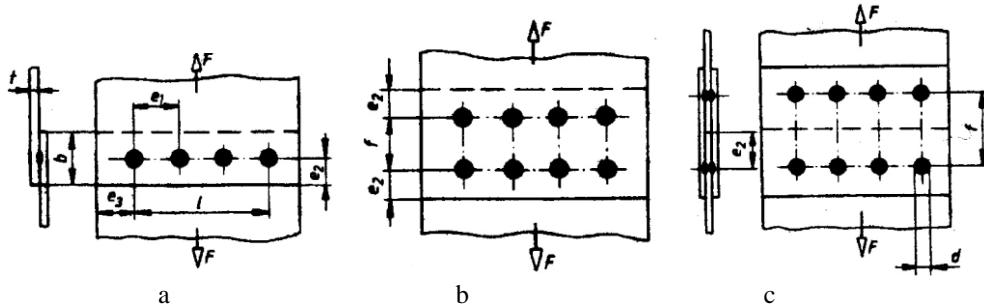
olur. Birim polar atalet momentini ise,

$$J = \frac{8b^3 + 6bh^2 + h^3}{12} - \frac{b^4}{2b + h}$$

şeklinde elde edilir.

6.3. Nokta Kaynağı (elektrik direnç kaynağı)

Kalınlığı 0,5 ile 5 mm arasında olan sacların birbirine tutturulması için yapılır. Bu yöntem punto kaynağı olarak da ifade edilir. Yük taşıma kabiliyeti düşüktür. Malzemelerin sac kalınlığına göre taşıyabilecekleri kuvvetler çeşitli tablolar halinde verilmiştir. Hesaplama tarzı perçin hesaplarına benzer bir şekilde yapılır. Şekil de çeşitli nokta kaynak bağlantıları verilmiştir.



Şekil: Nokta Kaynak çeşitleri. a) Tek sıralı tek etkili, b) çift sıralı tek etkili, c) Çift sıralı çift etkili

S 235 Çeliği İçin Nokta Kaynağının Taşıyabileceği Kuvvetler

Sac kalınlığı	nokta çapı	Taşıyabileceği yük		K_f değeri
		Tek kesitli	Çift kesitli	
0,5	2,5	500	700	
1	4	1500	1700	1-2
2	7	3400	4800	1-2,5
3	9	5300	9200	2,5-3
5	11	8500	15000	3-4

Şekil'e göre nokta kaynağında tavsiye edilen ölçüleri,

$$e_1 > 2d$$

$$e_2 > 2,5d$$

$$e_3 > 3d$$

olarak söyleyebiliriz.

6.4. Lehim ve yapıştırma bağlantıları

Lehim kaynağı bir difüzyon kaynağıdır. Lehim yapabilmek için difüzyon için aktivasyon sayısı düşük malzemeler kullanılması gerekir. 450°C altında ergiyen metallere yapılan lehime yumuşak lehim, 450°C üstünde ergiyen metallere yapılan lehime ise sert lehim denilmektedir.

Lehim malzemesi ergiyerek ergimeyen iki metali birbirine bağlar. Bağlantı malzemelerin birbiri içine difüzyonu ile sağlanır. İyi bir difüzyon için yüzeyler temiz olmalı ve oksidasyon önlenmelidir. Bu amaçla kullanılan malzemelere dekapan denir. Kaynak bağlantılarında kullanılan hesaplama yöntemi lehim bağlantıları içinde geçerlidir.

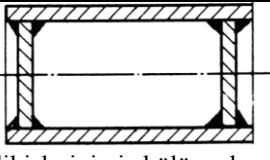

Lehim malzemenin dayanım değeri (MPa)

Malzeme	Normal gerilme	Kayma gerimesi
Kalay	35-40 MPa	25-35 MPa
Pirinç	250-350	150-250
Bakır	200-300	150-220
Gümüş	300-400	150-280

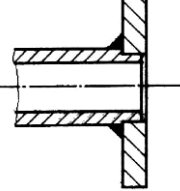
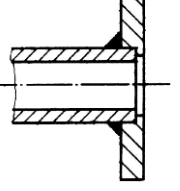
6.5 Kaynaklı Yapılar İçin Tasarım Özellikleri

Makine elemanlarının tasarımı için kaynak dikişinin uygun olup olmaması çok önemlidir. Aşağıdaki tabloda bazı kaynak dikişlerinin uygun olup olmaması durumları karşılaştırılmıştır.

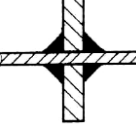

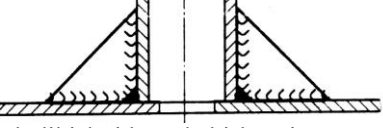
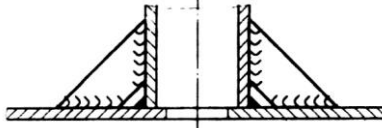
Kaynak İşleminin kolayca uygulanması

Uygun olmayan tasarım	Uygun tasarım
	
Kaynak dikişlerinin iç bölüme konulması nedeniyle kaynağın yapılması zordur.	Kaynak dikişleri dış kısımda olduğu için kolay kaynak yapılabilir.



Üretim kolaylığının sağlanması için daha basit kaynak şekiller bulunmalı

	
Boru ve flanşın birleştirilmesinde merkezleme için boruya ön işlem yapılmış. Borunun bu şekilde tornalanması zordur.	Flanşın tornalanması daha kolaydır.

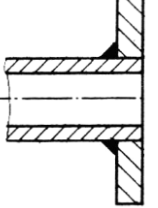
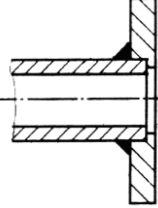
Kaynak üst üste gelmemelidir.

	
Dört adet kaynak dikişi tek noktada toplanmış.	Levhalar farklı kaynatılarak birbirinden ayrılmış.
	
Kaynak dikişleri köşede birleşmiş.	Kaynak dikişlerinin birleşmesi önlenmiş.

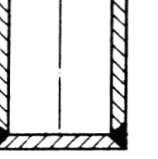
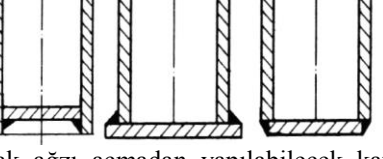
Parçalar birbiri ile kaynatılırken ani geçiş olarak kaynatılmamalıdır.

	
$S/s < 3$	$L > 5(S-s)$ $L > 3(S-s)$
Kalınlıklar oranı üçten küçük ise birleştirme yapılabilir. Kaynak geçiş bölgesi, çentik etkisini azaltmak için ani geçiş olmayacak şekilde uzun tutulmalıdır.	Kalınlıklar oranı üçten büyük ise şekilde görüldüğü gibi ön işlem yapılmalıdır.

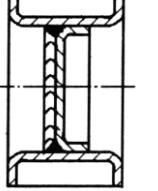
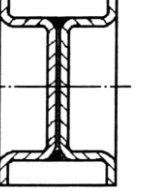
Merkezleme yapılarak kaynak işlemi basitleştirilmiştir.

	
Silindir ile flanşın merkezlenmesi zordur.	Flanşa ön işlem yapılmış. Daha Kolay.

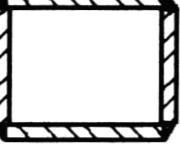
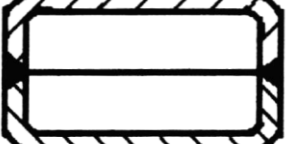
Ön işlem yerine farklı işlemler yapılabilir.

	
Her iki parçaya kaynak azı açılmıştır.	Kaynak ağzı açmadan yapılabilecek kaynak türleri.

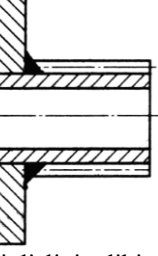
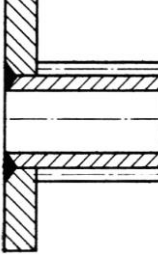
Presle ön şekil verilen parçalar basitleştirmeli

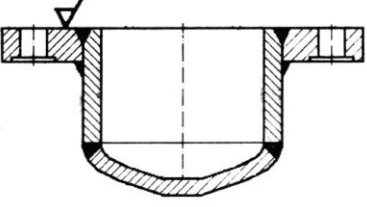
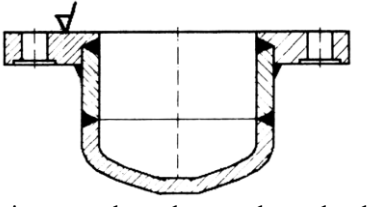
	
Şekildeki parçaların yapılabilmesi için iki adet ayrı parça şekillendirmek gerekir.	İki ayrı parçaya aynı şekil verilerek, tek kalıpla neticeye ulaşılmalıdır.

İnce levhaların ön işlemler ile yapımı kolaylaştırılmalıdır.

	
Dört parçadan kesilerek yapılan kutu profil.	U şeklindeki iki parçadan yapılan kutu profil.

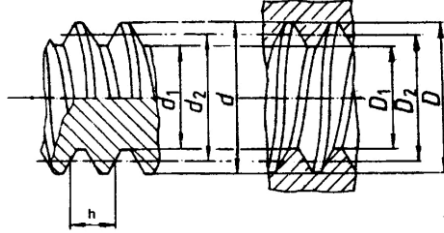
Kaynak dikişine yakın bozulabilecek yüzeyler konulmamalıdır.

	
Kaynak dikişleri dışlinin dibine konulmuş.	

<p>Bu kaynak esnasında dişliler bozulur.</p>	<p>Kaynak dikişleri dişlilerden uzakta konulmuş.</p>
 <p>İşlem yapılmış yüzeylere kaynak dikişi konulmamalıdır. Ayrıca köşelere kaynak yapmaktan kaçınılmalıdır.</p>	 <p>İşlenmiş yüzeylere konan kaynak dikişi içeriye alınıp, köşedeki kaynak yukarıya alınarak doğru işlem yapılmıştır.</p>

7. CIVATALI BAĞLANTILAR

Cıvatalı bağlantılar sökülebilen bağlantı şeklidir. Diğer bağlantı şekillerinden ayrılan en büyük özelliği sökülebilir olmasıdır. Kaynaklı ve perçinli bağlantılar sökülemeyen bağlantı çeşidi olduğu için özellikle sökülmesi istenen makine parçalarında cıvatalı bağlantılar kullanılır. Şekil’de vida temel ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil: Vida Ölçüleri

Yukarıdaki vidaya göre d diş üstü çapıdır. Somunda kullanılan diş dibine eşittir. d₁ diş dibi çapı, d₂ bölüm dairesi çapı ve h bir diş dolusu ile bir diş boşluğunu ifade eden adım ölçüsüdür. Alan hesaplamalarında kullanılacak olan çap ölçüsü

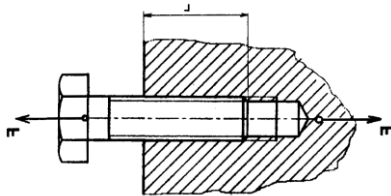
$$d_2 = d - 1.23t$$

olarak ifade edilir. Anahtar ağzı ise $AA \cong 1.5d$ olur.

7.1. Cıvata Hesaplamaları

Çekmeye Çalışan Cıvatalar:

Bir noktaya monte edildikten sonra aksel yük ile statik olarak yüklenecek cıvatalar cıvata şaftında normal gerilme ile, vidaların ortalama çapında ise kayma gerilmesi ile yüklenir. Ayrıca vidaların yüzey ezilmesine göre kontrol edilmesi gerekir. Şekil’de çekmeye çalışan bir cıvata gösterilmiştir.



Şekil: Çekmeye maruz kalan cıvata

Yukarıdaki şekilde gösterilen cıvata yük taşımak için kullanılan bir cıvata. Cıvata çekme esnasında oluşacak olan normal gerilme ve dayanım ifadesi,

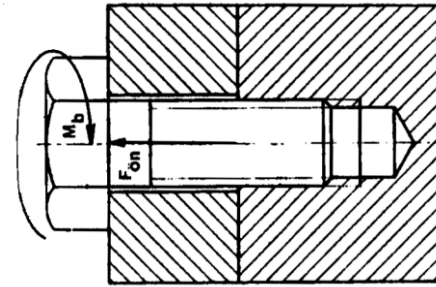
$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_2^2} \leq \frac{Re}{EK}$ olarak ifade edilir. Vidayı sıyırmaya çalışan kayma gerilmesi ise,

$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d_2 L} \leq \frac{Re}{2EK}$ olur. Vida yüzeyini ezmeye çalışan gerilme ise,

$\sigma_{ez} = \frac{4F}{\pi z(d_2^1 - d_1^2)} \leq \frac{Re}{Ek}$ olarak ifade edilir. Burada z vidanın L boyundaki diş sayısıdır.

Sıkma Esnasında Hasar Oluşumu

Cıvatalar sıkma esnasında burulma momenti uygulanır. Şekil’de sıkma esnasında bir cıvata gösterilmiştir.



Şekil: Sıkma Esnasında Bir Cıvata Bağlantısı

Cıvata oluşmuş kayma gerilmesi, $\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_2^3}$ dir. Uygulanan burulma momenti ile

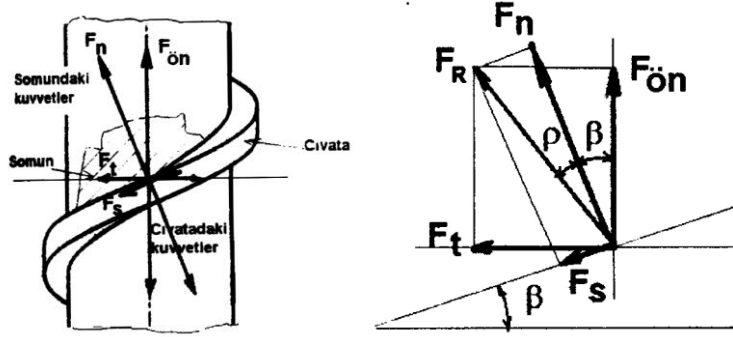
beraber cıvata şaftında yavaş yavaş artan bir normal gerilme oluşur. Bu durumda en tehlikeli yer olan vida gerilme çapında eşdeğer gerilme hesabı yapmak gerekir. Maksimum kayma gerilmesi teorisine göre;

$$\sigma_{es} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d_2^2}\right)^2 + 4\left(\frac{16T}{\pi d_2^3}\right)^2} \leq \frac{Re}{EK} \text{ olarak ifade edilir.}$$

Cıvata Sıkma İçin Uygulanması Gereken Moment

Cıvatalar takılacakları bağlantı yerinde taşıyabilecekleri kuvvet önceden belirlenerek boyutlandırılır. Bu boyutlandırma cıvata çapı yanında sayısını da içermektedir. Bir cıvatanın bu bağlantıda ne kadarlık bir aksel yük taşıyacağı cıvatanın akma dayanımına göre önceden

belirlenir. Bu değer $F_{\text{ön}}$ kuvveti olarak adlandırılır. Uygulanacak ön gerilme akma mukavemetinin %25 ile %75 arasında statik yükleme şartları için sıkma esnasında hasar olup olmayacağına göre seçilir. Şekil de kare bir vidada sıkma esnasında meydana gelen kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil: Kare Vidada Sıkma Esnasında Meydana Gelen Kuvvetler

Bu ön gerilmeyi elde edebilmek için sıkma işleminin son anında civata ve somunun dişleri arasındaki sürtünmenin aşılabilmesi gerekir. Bu durumda gerekli moment uygulanacak olan ön gerilmeye göre hesaplanır. Bu hesaplama eğimi helis açısı ile eşit bir eğimli yüzey üzerinde $F_{\text{ön}}$ ağırlığındaki kütlenin yukarıya doğru sürüklenerek taşınması işlemine benzer.

Düz profilli civatadaki döndürme momenti,

$$T = \frac{F_{\text{ön}} \tan(\beta + \rho) d_2}{2} \quad \tan \rho = \mu \quad \text{Sivri profilli civatadaki döndürme momenti ise,}$$

$$T = \frac{F_{\text{ön}} \tan(\beta + \rho') d_2}{2} \quad \tan \rho' = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad \text{şeklinde tanımlanır.}$$

Cıvata Sökmek İçin Uygulanması Gereken Moment

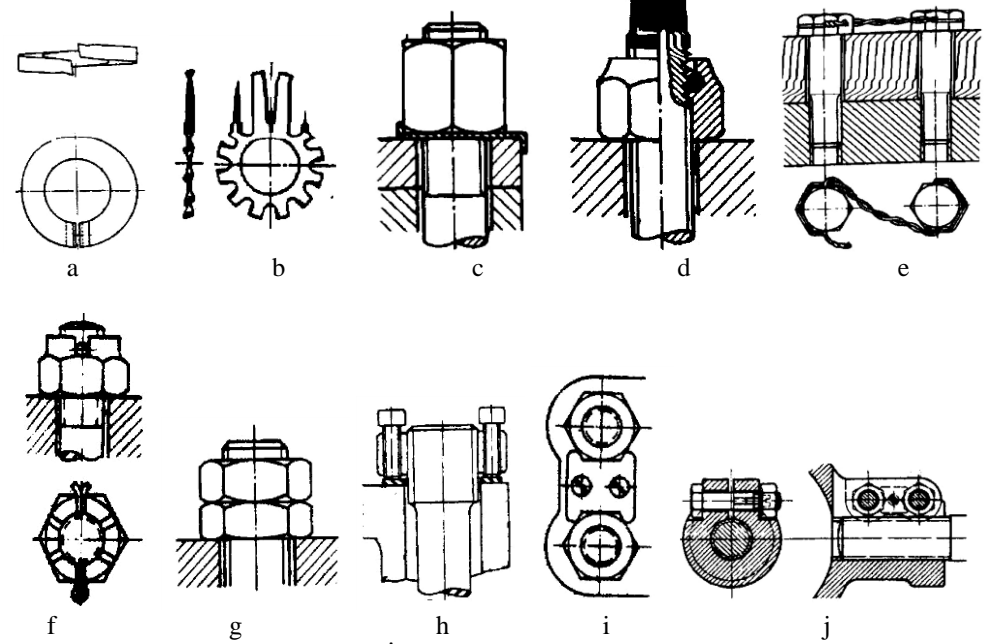
Cıvata sökmek için gerekli kuvvet ve momentin hesaplanmasında işaretler değişir.

$$T = \frac{F_{\text{ön}} \tan(\beta - \rho) d_2}{2} \quad \tan \rho = \mu$$

$$T = \frac{F_{\text{ön}} \tan(\beta - \rho') d_2}{2} \quad \tan \rho' = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

cıvatalı bağlantıların sökmek için herhangi bir kuvvetin uygulanmayarak cıvatanın kendi kendine sökülme kuralına *otoblokaj* adı verilir. Eğer $\rho > \beta$ sağlarsa cıvatalı bağlantı

sökülmez, yani cıvatanın sökülmesini engelleyen kuvvet cıvata sökmeye çalışan kuvvetten büyük olursa cıvata sökülmez. Özellikle titreşimli çalışan yerlerde bu şart sağlansa bile zaman içinde cıvatalı bağlantılarda sökülme meydana gelebilir. Bu nedenle bu gibi yerlerde sökülmeyi önlemek için çeşitli sabitleme yöntemleri kullanılması gerekir. Bu sabitleme yöntemleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Cıvataların Sökülmemesi İçin Bazı Emniyet Tedbirleri a) Yaylı rondela, b) Tırtıllı rondela, c) Emniyet sacı, d) Plastik sıkıştırılmalı somun, e) Cıvataların birbiri ile bağlanması, f) Kopilya, g) Kontra somun, h) Gerdirmeli somun, i) Sabitleme plakası, j) Sıkmalı Somun

Cıvata Başı Altındaki Sürtünmeyi Yenmek İçin Uygulanacak Olan Moment

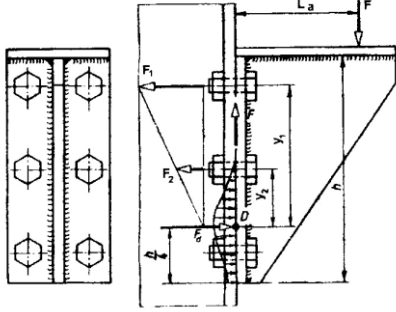
Cıvatalı bağlantılarda özellikle diş sonuna geldiği zaman yani sıkma işleminin bitmesi esnasında cıvata başı ile bağlantı yapılan eleman arasında bir sürtünme meydana gelir. Bu sürtünme sonucunda cıvata sıkıştırılmış olur. Cıvata hesaplamalarında bu sürtünme özellikle sıkma esnasında dikkate alınmış fakat gerilme hesabında ihmal edilmiştir. Sıkma esnasındaki cıvata başı ile bağlantı elemanı arasında oluşan sürtünmeyi yenmek için gerekli olan moment,

$$T_{AA} = \frac{F_{\text{ön}} \mu_{AA} (d_m + AA)}{4} \quad \text{şeklinde ifade edilir. Burada } d_m \text{ delik çapı, AA anahtar ağızıdır.}$$

μ_{AA} ise somun ile birleştirilen malzemem arasındaki sürtünme katsayısıdır.

Düzlem dışından yüklenmiş Cıvatalar

Düzlem dışından yüklenmiş cıvatalarda sürtünme kuvveti, kuvvet ve burulma nedeniyle oluşan iki bileşenin toplamını karşılayacak şekilde hesaplanmalıdır.



Şekil: Düzlem dışından Yüklenmiş Cıvatalı Bağlantının Eğilmesi

Düzlem dışından yüklenmiş cıvata bağlantılarında meydana gelen eğilme momenti asal eksenin üst tarafındaki temas ortadan kaldıracak şekilde etki ettiği için kuvveti karşılamak için oluşturulması gereken sürtünme asal eksenin alt tarafındaki cıvatalara kalır. Üst taraftaki cıvatalar ise eğilme momenti nedeniyle fazladan bir eksenel kuvvet etkisi altında kalacaktır.

7.2. Ön Gerilmeli Cıvata Bağlantıları

Belirli ön gerilme kuvveti ile sıkıldıktan sonra üzerine ilave olarak bir işletme kuvveti etki eden bağlantılar ön gerilmeli cıvatalı bağlantılar olarak adlandırılır. Bu işletme kuvvetinin zaman içerisinde değişken olarak etki ettiği cıvata bağlantıları bu grupta değerlendirilir. Örneğin bir hidrolik silindirin kapak bağlantısı veya bir biyel kolunun kranka bağlanması için kullanılan cıvatalar bu şekilde yüklenen cıvatalardır.

Bu bağlantılarda uygulanan ön gerilme nedeniyle cıvata boyu uzar buna karşılık bağlanan elemanların boyları kısalır. İşletme kuvveti cıvata boyunun bir miktar daha artmasına sebep olurken aynı zamanda kısalmış olan bağlantı elemanlarında bir rahatlama meydana gelir. Böylece işletme kuvvetinin bir kısmı cıvata tarafından taşınırken bir kısmı da bağlanan elemanların üzerindeki yükü kaldırmasına harcanmış olur. Şekil de ön gerilmeli bir cıvatadaki kuvvet dağılımları gösterilmiştir.

Aşağıdaki şekilde α cıvata açısı, β bağlantı elemanları açısının yay karakteristik açısıdır. $F_{\text{ön}}$ cıvatanın sıkılması esnasında oluşan ön gerilme kuvvetini, F_i işletme kuvvetini göstermektedir. İşletme kuvvetinin cıvataya gelen kısmı,

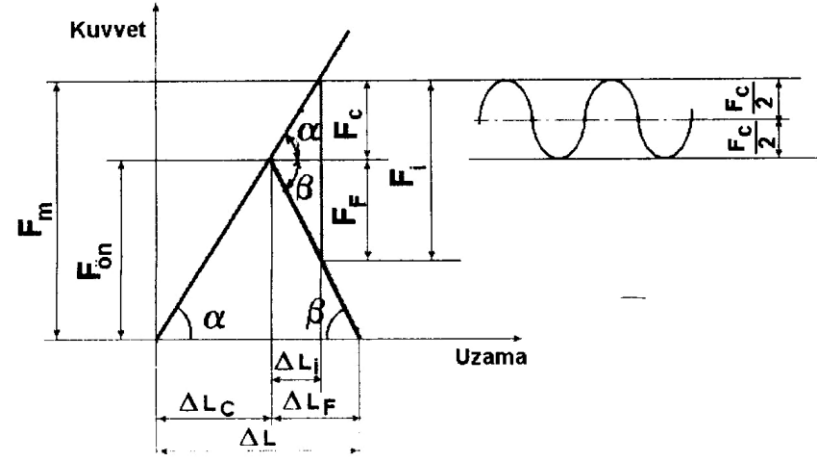
$$F_c = F_{\text{ön}} + F_i \frac{K_c}{K_c + K_B} \quad \text{ile ifade edilir. Burada sırasıyla } K_c \text{ ve } K_B \text{ cıvatanın ve flanşın}$$

yaylanma katsayıları olarak tarif edilir. Bağlantı tarafından basılan kuvvet ise,

$$F_B = F_{\text{ön}} + F_i \frac{K_B}{K_c + K_B} \quad \text{olur. Cıvatanın sıkılması esnasında, cıvatanın uzama miktarı ile flanşın}$$

$$\text{kısalma miktarı, } \delta = \frac{FL}{AE} \quad \text{olur. Burada düz bir çubuk için yay katsayısı } \frac{AE}{L} \text{ olarak elde}$$

edilebilir. Cıvata şaftı diş açılmış ve açılmamış kısımlar ile cıvata başı ve somun içinde kalan kısım olmak üzere 4 parçadan oluşmaktadır. Ayrıca cıvata şaftı farklı çaplarda da imal edilebilir. Bu durumda cıvata seri bağlı yaylar gibi değerlendirilerek toplam yay katsayısını,



Şekil: Ön Gerilmeli Cıvata Bağlantısında Kuvvet Değişimi

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1}{K_{c1}} + \frac{1}{K_{c2}} + \dots \quad K_{c1} = \frac{AE}{L} \quad \text{ile hesaplanabilir. Kolaylık sağlamak amacıyla}$$

cıvata başı kısmı vida açılmamış çaplı kısmın boyuna 0.28d, somun kısma ise vida açılmış kısma 0.32d eklenerek dikkate alınır. Flanş'ın yay katsayısının belirleneceği konusunda pek çok çalışma yapılmıştır. Özellikle A_B alanının belirlenmesi önemli bir durum oluşturmaktadır.

Bu ders kapsamında,

$$D_0 = \frac{1}{2} D_m + 0.14 L_B \quad \text{olmak ve } D_m \text{ delik çapını, } L_B \text{ cıvata boyunu göstermek üzere flanş}$$

kısımın alanı, $A_B = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_m^2)$ ile hesaplanacaktır. İki farklı malzemenin birleştirilmesi durumunda yine seri bağlı yaylar yöntemi kullanılır.

8. MİL GÖBEK BAĞLANTILARI

8.1. Kamalı bağlantılar

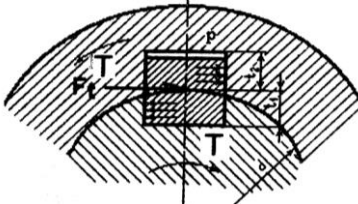
Kamalar, dişli çark, kasnak, volan gibi makine elemanlarını millere sökölüp takılabilir şekilde bağlanmasında kullanılan elemanlardır. TS 147’de kamlar 13 grupta ve kamalı miller ise üç grupta standartlaştırılmıştır. Kama yuvaları genellikle freze tezgahında parmak freze çakısı veya kanal freze çakıları ile açılmaktadır. Parmak freze çakısı ile açılmış kama kanalına A tipi kama, kanal freze çakıları ile açılmış kama kanalına ise B tipi olarak adlandırılır. Bazı kamalar alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olarak yapılır. Bu tür kamalara düz kamalar denir. Eğimli kamalarda ise, alt kenar ile üst kenar arasında 1/100 eğime sahiptir. Kamanın mile hafif bir sıkılıkta takılması gerekir. Sık sık durup hareket eden bağlantılarda sıkı geçme kamayı sabitlemek için yeterli değilse vidalı veya pimli bağlantılarda yapılabilir.

Göbeğin sallanmasını önlemek için kama boyu mil çapının en az 1.25’i kadar olması gerekir. Ayrıca kama genişliğinin mil çapına göre ¼ oranında alınması kama boyu hesabında kolaylık sağlar. Hesaplanan ölçüler standart değerlere ya da üretici firmaların katalog değerlerinden sağlanır. TS 147 kama malzemesi olarak Ck45 ıslah çeliği tavsiye edilmektedir.

Kama hesapları

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kama burulma momentinden dolayı ezilmeye ve kesilmeye zorlanır. Bu durumda kamanın ezilmeye ve kesilmeye zorlayan gerilme $\tau = \frac{F}{A} = \frac{2T}{dbL}$ olup burada kamanın alanı $A = dbL$ ’ye eşittir. Aynı zamanda buradaki burulma momenti $T = Fd$ olarak ifade edilir. Kamalar ilgili olarak değişik yükleme durumlarındaki dayanım değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

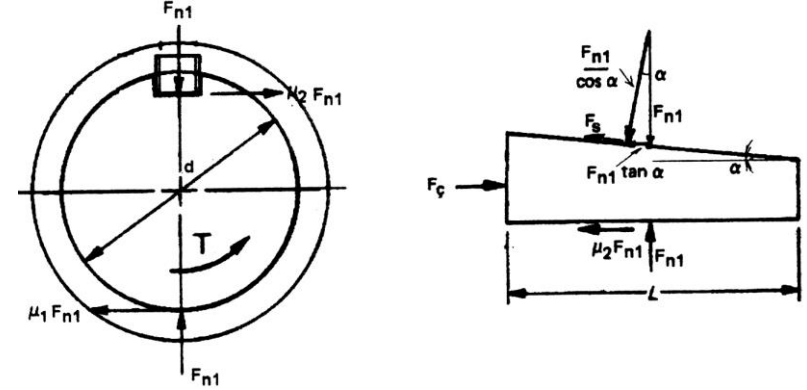
Statik yükleme durumu	Tam değişken yükleme durumu	Goodman eşitliği
$\tau \leq \frac{R_e}{2EK}$	$\frac{R_m}{4EK} C_B C_\zeta$	$\frac{2\tau_m}{R_m} + \frac{2\tau_a}{R_{fd}} \leq \frac{1}{EK}$
$\sigma \leq \frac{R_e}{2EK}$	$\frac{R_m C_B C_\zeta}{2EK}$	$\frac{\sigma_m}{R_m} + \frac{\sigma_a}{R_{fd}} \leq \frac{1}{EK}$



Şekil: Kama bağlantısı

Eğik kamaların hesabı

Eğik kamalar sürtünme ile hareket ve moment iletirler. Eğimli kamalarda kamanın F_c kuvveti ile çakılması sonucu şekilde görülen sürtünme kuvvetleri meydana gelir. Bu sürtünme kuvvetleri sayesinde aktarılmak istenen moment milden göbeğe veya tersi aktarılmış olur. Sürtünme kuvvetleri, uygulanacak çakma kuvvetine ve sürtünme katsayılarına bağlıdır. Mil, göbek ve kama malzemelerine bağlı olarak μ (sürtünme katsayısı) belirlenir. Sürtünme katsayıları çelik çelik durumunda $\mu = 0.2$, çelik dökme demir durumunda $\mu = 0.1$ alınır.



Şekil: Eğik kama bağlantısında moment iletme ve çakma durumunda kuvvetler

Bağlantının taşıyabileceği moment, çakma kuvvetine buda kama yüzeyinin ezilmeden taşıyabileceği maksimum gerilmeye bağlıdır. Bu tip bağlantılar statik yüklenen sürekli aynı yüklenen ve sık sık durup çalışan pozisyonu olmayan yerlerde kullanılmaktadır. Kamanın taşıyabileceği moment;

$$T = \mu_1 F_{n1} \frac{d}{2} + \mu_2 F_{n1} \frac{d}{2} \text{ olarak ifade edilir. Gerilme ifadesi,}$$

$$\sigma = \frac{F_{n1}}{bL} \text{ olur. Bu gerilme ifadesi ile oluşan kuvvet,}$$

$$F_{n1} = bL \frac{R_e}{EK} \text{ olur. Bununla birlikte kamalı bağlantının taşıyabileceği en büyük moment,}$$

$$T = \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2) dbL \frac{R_e}{EK} \text{ olarak ifade edilir. Kamayı çakmak için kullanılacak olan kuvvet,}$$

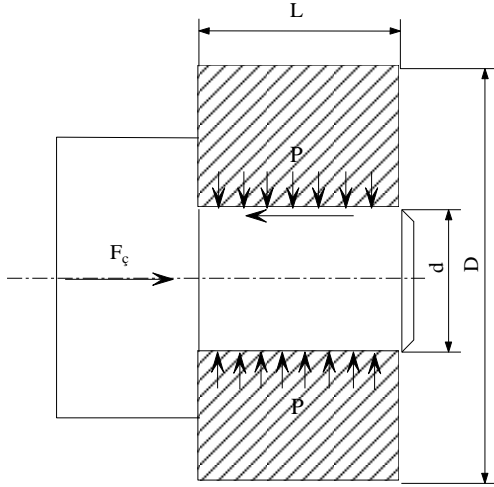
$$F_c = (2\mu_2 + tg \alpha) bL \frac{R_e}{EK} \text{ olur.}$$

Eğik kamaların otoblokojı çok önemlidir. kamanın kendi kendine sökölmemesi için sökmeye çalışan kuvvetin, sökölme engelleyen kuvvetten küçük olması gerekir. Bir başka ifade ile

eğimli kamanın kendi kendine sökülmemesi için kama eğiminin sürtünme katsayısından iki katından küçük olmalıdır. Bu ifade, $tg \alpha \leq 2\mu_2$ ile tarif edilebilir.

8.2. Sıkı Geçme

Bir mil-göbek bağlantısında mil çapı göbek çapından daha büyük yapılır ve bu ikisi bir çakma kuvveti ile birbirine takılırsa arada meydana gelen sıkılık nedeniyle göbeğin iç kısmına bir iç basınç ve milin yüzeyine de iç basınçla aynı büyüklükteki bir dış basınç etki eder. Sürtünme katsayısı yardımıyla moment ve hareket iletimi sağlanmış olur. Göbek olarak takılan dişli çark, rulman iç bileziği, kasnak gibi elemanlar kalın cidarlı silindir tanımına uyarlar. İnce cidarlı silindirlerde gerilmenin kalınlıkla değişimi ihmal edilmektedir. Kalın cidarlı silindirlerde ise bu değişimin ihmal edilmesi mümkün değildir. Bununla beraber sadece iç basınca maruz silindirlerde en büyük gerilme iç yüzeyde meydana gelir. Dolayısıyla bu silindirlerin iç yüzeyleri için hasar durumunun incelenmesi bağlantının emniyeti için yeterli olabilir. Şekil'de bir sıkı geçme bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil: Sıkı geçme Bağlantısı

Sıkı geçme bağlantılarında bağlantıya verilmesi gereken sıkılığın alt ve üst sınırı hesaplarla belirlenmelidir. Alt sınırı belirlemek için iletilmesi gereken momentden hareketle bir hesaplama yapılır. Sürtünme kuvvetinin ürettiği moment dışarıdan sisteme uygulanan momenti dengelemelidir. Dengeleneme sağlanamazsa mil ve göbek arasında kayma meydana gelir. En büyük sıkılık ise göbek malzemenin hasar durumuna göre belirlenir. Eğer göbek malzemesi dökme demir veya sertleştirilmiş çelik gibi gevrek bir malzeme ise maksimum normal gerilme teorisine göre analiz yapılır. Eğer yumuşak çelik, alüminyum, pirinç... gibi sünek bir malzeme ise maksimum kayma gerilmesi teorisine göre hasar analizleri yapılır. Şekil'e göre bir mil-göbek bağlantısında çakmak için gerekli olan kuvveti,

$F_{\phi} = P_i \pi d L \mu$ ile ifade ederiz. Burada $\pi d L$ yüzey alanı, μ sürtünme katsayısı ve P_i 'de iç basınç olarak tarif edebiliriz. İç basıncı ise, T aktarılması gereken moment olmak üzere,

$$P_i = \frac{2T}{\pi \mu L d^2} \text{ yazabiliriz. Buradan da aktarılabilecek olan toplam momenti,}$$

$$T = \frac{\pi \mu L d^2 P_i}{2} \text{ şeklinde yazabiliriz. Sıkı veya sıcak gecme bağlantılarında meydana gelen sürtünme katsayısı çizelgeden belirlenebilir.}$$

Çizelge: Sıkı veya Sıcak Geçme Bağlantılarında Sürtünme Katsayıları

Malzeme Çifti	Çelik-çelik	Çelik-dökme demir	Çelik-pirinç	Çelik-magnezyum alaşım
Sürtünme Katsayısı	0.05-0.16	0.15-0.2	0.05-0.14	0.05-0.06

Çakma kuvvetine karşı öne çıkan sürtünme katsayısı burulma momentine karşı ortaya çıkan ve bu tabloda verilen sürtünme katsayılarından %10 kadar daha düşük olabilir. Ayrıca çelik-çelik bağlantılarında büyük kuvvetler ile takmak gerektiği için zaman-zaman yağlama yapılabilir. Bu durumda da sürtünme katsayısını %20 düşürmek gerekir.

Sıkı Geçme Bağlantılarında Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkileri

Bağlantılı milin içi dolu olması durumunda mil yüzeyine bir dış basınç etki etmiş olur. Bu basınç milde akmaya yol açmaz ancak yüzey ezilmesine neden olabilir. Aynı basınç göbeğe iç basınç olarak etki ettiği için göbekte çatlama veya plastik şekil değiştirme şeklinde hasar meydana gelebilir ve bu şekildeki silindirlerde gerilme değeri,

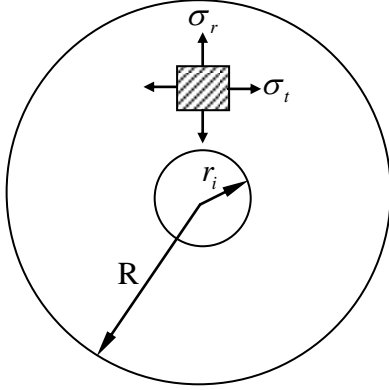
$$r \frac{\partial r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \text{ denkleminde olduğu gibi 1.dereceden kısmi bir türevli bir}$$

diferansiyel denkleme uygun olarak dağılır. Denklem sınır şartlarına bağlı olarak çözüldüğünde en büyük gerilmenin iç basınç durumunda iç yüzeyde ortaya çıktığı görülmektedir.

$$\sigma_{r \max} = \frac{r_i^2 P_i}{R^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{R^2}{r_i^2} \right)$$

$$\sigma_{t \max} = P_i \left(\frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} \right) = P_i \left(\frac{C_d^2 + 1}{C_d^2 - 1} \right) \quad C_d = \frac{R}{r_i}$$

olur. Burada R silindirin dış yarı çapı, r_i silindirin iç yarıçapı ve C_d ise çap oranını ifade etmektedir.



Şekil: Ortasında Delik Bulunan Silindirin Gerilme İlişkisi

Eğer içi boş bir mile dış basınç etki ediyorsa, bu durumda en büyük gerilmeler milin dış yüzeyinde meydana gelir ve değerleri,

$$\sigma_{r \max} = -P_o \quad \text{ve} \quad \sigma_{t \max} = -P_o \left(\frac{C_d^2 + 1}{C_d^2 - 1} \right)$$

olur. Gevrek malzemeler için kullanılacak hasar teorisinde görüldüğü gibi maksimum normal gerilme her iki durumda da $\sigma_{t \max}$ değerine eşittir. Dolayısıyla gevrek malzemelerin çekme mukavemeti ve emniyet katsayısı bu değerle karşılaştırılarak boyutlandırma ve basınç kontrolü yapılabilir. Sünek malzemeler için kullanılması gereken maksimum kayma gerilmesi değeri ise ;

$$\tau_{\max} = P_i \left(\frac{C_d^2}{C_d^2 - 1} \right) \leq \frac{Re}{2EK} \quad \text{olarak hesaplanır.}$$

Elde Edilen İç Basınç ile Şekil Değiştirme Miktarı

Göbek iç çapının büyümesi;

$$\Delta d_g = \frac{d}{E_g} P_i \left(\frac{C_d^2 + 1}{C_d^2 - 1} + \nu_g \right) \quad \text{olur. Burada } E_g \text{ göbek malzemesinin elastisite modülü,}$$

ν_g ise göbek malzemesinin poisson oranı olarak ifade edilir. Dolu bir mil için mil çapındaki küçülme miktarı,

$$\Delta d_m = \frac{-d}{E_m} P_i (1 - \nu_m) \quad \text{olur. Burada da } E_m \text{ mil malzemesi için elastisite modülü, } \nu_m \text{ ise}$$

mil malzemesi için poisson oranı olarak tarif edilir. İçi boş mil için mil çapındaki küçülme miktarı,

$$\Delta d_m = \frac{-d}{E_m} P_i \left(\frac{C_m^2 + 1}{C_m^2 - 1} - \nu_m \right) \quad \text{ve} \quad C_m = \frac{R_m}{r_m}$$

olur. r_m, R_m içi boş milin iç ve dış yarıçaplarıdır. Sıkı geçme bağlantısı yapılırken mil ve göbek de bulunan pürüzlülüklerin ezilerek düzleştiği bilinmektedir. Bu nedenle yüzey durumuna ait pürüzlülük miktarı,

$\Delta_{dp} = 1.2R_t = 6R_a$ olarak ifade edilir. Burada R_t en büyük pürüzlülük değeri ve R_a ortalama pürüzlülük değerini ifade etmektedir. Bağlantıya verilmesi gereken toplam sıklık değeri bu üç sıklığın toplamı olmalıdır.

Çizelge: Çeşitli Yüzey Kalitesine Bağlı Olarak Ortalama Pürüzlülük Değeri

Yüzey kalitesi	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
R_a (mikron)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

Sıcak Geçme

Sıkı geçme işleminden çakma şeklinde veya pres yoluyla değil de göbeğin ısıtılarak veya milin soğutulmasıdır. Gerilme formülleri, göbek iç çapının büyümesi veya mil çapının küçülmesi pres geçme ile aynıdır. Pürüzlülük ezilmesi söz konusu değildir. Genellikle göbek

ısıtılarak yapılır. Gerekli olan sıcaklık farkı, $\Delta T = \frac{\Delta d}{\alpha d}$ ile ifade edilir. Burada

α genişleme katsayısı, Δd çaptaki büyümedir ve aşağıdaki eşitlik de ifade edilir.

$$\Delta d = \Delta d_m + \Delta d_g + d * 10^{-3} \quad \text{Bu ifadeden } d * 10^{-3} \text{ kolay takılabilmesi için verilecek boşluğu göstermektedir.}$$

9. MİL DESTEKLEME ELEMANLARI (YATAKLAR)

Gövde gibi duran elemanlarda mil gibi dönen elemanları birbirine bağlamak için kullanılan makine elemanları yatak olarak adlandırılır. Yataklar dönen elemanlı (rulmanlı) yataklar ile sabit (kaymalı) yataklar olmak üzere iki tipte yapılmaktadır.

9.1. Rulmanlı Yataklar

Rulmanlı yataklar, genellikle iki adet bilezik ve dönen elemanlardan meydana gelirler. Ayrıca dönen elemanı tutan bir kafes bulunmaktadır. Rulmanlarda sürtünme katsayısı 0.001 ile 0.005 arasında değişmektedir. Rulman yataklı malzeme olarak 100Cr6 gibi çeliklerden veya sementasyon çeliklerinden yapılır. Sertleştirme sonucu 58-65HRC sertlik elde edilebilir. Rulman çelikleri vakum ergitme yöntemiyle elde edilir. Bu yöntem ile elde edilen çeliğin homojen bir yapıya sahip olmaktadır ve aynı zamanda kalıntılar çok azdır. Bu yöntemle üretilen çeliğin güvenilirliği ve verimi yüksek olmaktadır.

Rulmanlı Yatakların Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları:

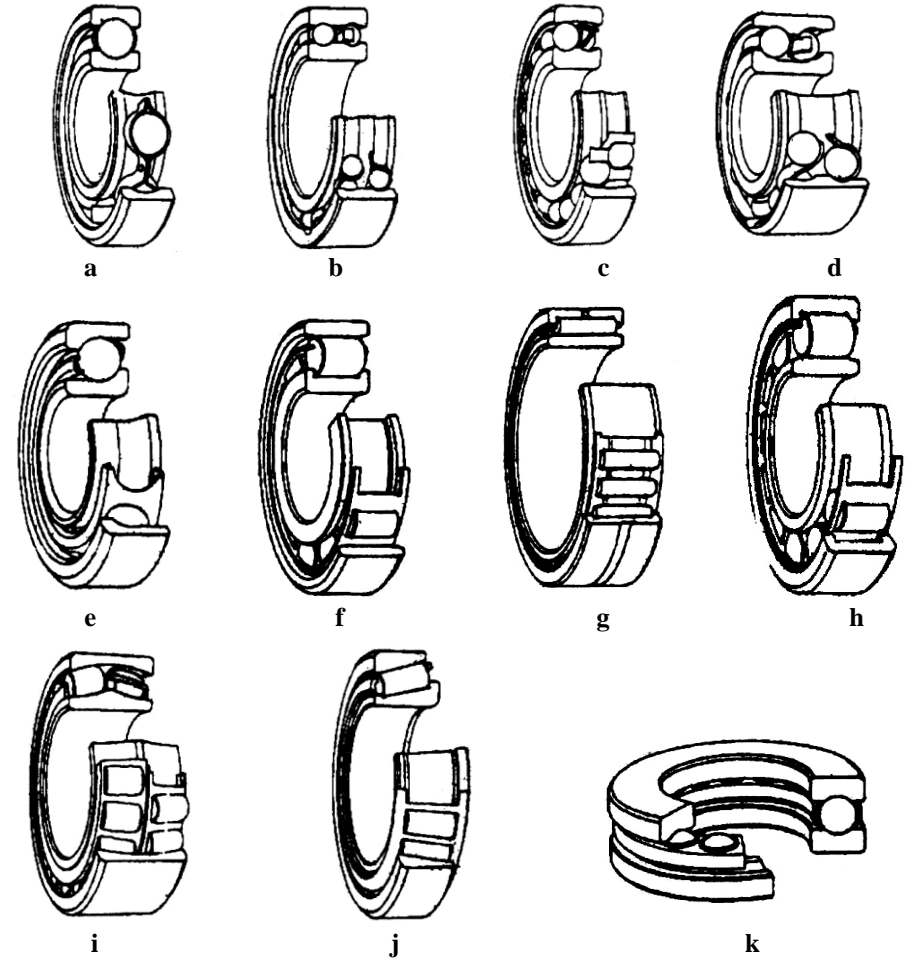
1. Sürtünme katsayısı çok küçüktür.
2. Çok az yağ harcarlar.
3. Az bakım isterler ve çalışma şartlarına bağlı olarak uzun ömürlüdürler.
4. Radyal yük taşıdıkları gibi eksenel yükler de taşıyabilirler.
5. Yatak boşlukları çok hassas olduğundan, miller daha hassas yataklanabilir.
6. Standartlaştırılmıştır.
7. Eksenel yöndeki boyutları küçüktür.
8. Yüksek sıcaklıklarda özel alaşımlı malzeme kullanılması ve uygun yağlama yapılması ile 600°C ye kadar kullanılabilir.
9. Vakumlu ortamlarda çalışabilir.

Dezavantajları:

1. Nispeten ağırdır.
2. Mil ve gövdeye hassas geçme toleranslarıyla takılırlar bu nedenle takılıp sökülmesi zordur.
3. Darbeli ortamlar için standart tipler dayanıklı değildir.
4. Ses yapabilirler.
5. Radyal ölçüleri büyüktür.
6. Ömürleri kaymalı yataklara göre daha kısadır.

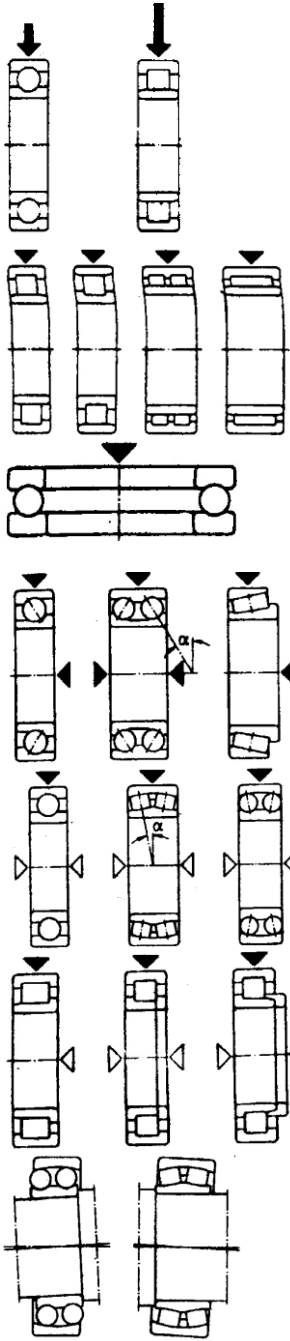
Rulmanlı Yatak Tipleri

Endüstride yük taşıma kabiliyetine ve çalışma ortamına bağlı olarak çok çeşitli rulmanlı yatak tipleri vardır. Uygun yatak seçimi çalışma verimini etkileyeceği gibi, rulmanın ömrünü de etkilemektedir.



Şekil: Endüstride kullanılan bazı rulmanlı yatak tipleri. a) Tek sıralı Sabit bilyeli yatak, b) Çift sıralı Sabit bilyeli yatak, c) Oynak bilyeli yatak, d) Çift Sıralı eğik bilyeli yatak, e) Eğik Bilyeli yatak, f) N Tipi Silindirik makaralı yatak, g) İğneli yatak, h) NU tipi Silindirik makaralı yatak, i) Oynak makaralı yatak, j) Konik Makaralı yatak, k) Eksenel sabit Bilyalı yatak

Rulmanlı Yatakların Yük Taşıma kabiliyetleri



Makaralı yataklar, temas eden yüzey alanı çok fazla olduğu için genellikle daha fazla yük taşırlar.

Bilezikli silindirik makaralı yataklar ve iğne makaralı yataklar sadece radyal yük taşır.

Eksenel sabit bilyalı yataklar olarak adlandırılan bu yataklar sadece eksenel yönde yük taşırlar.

Tek sıralı ve çift sıralı eğik bilyalı yataklar ile konik makaralı yataklar radyal ve eksenel yükü birlikte taşımaktadır.

Sabit bilyalı yataklar, oynak bilyalı yataklar ve oynak makaralı yataklar çok iyi radyal yük taşımaktadırlar. Bunun yanında bu yatakların az miktarda eksenel yük taşıma kabiliyetleri vardır.

Silindirik makaralı yataklar çok küçük eksenel yük taşıma kabiliyetlerine sahiptir.

Oynak bilyeli yataklar ve oynak makaralı yataklar millerdeki eksen kaçıklıklarını kolayca alabilirler. Bu yataklarda en fazla 3° lik eksenel kaçıklık verilebilmektedir.

Rulmanlı Yatak Hasarları

Yorulma: Rulmanlı yataklarda pullanma şeklinde yüzey yorulma hasarları en temel hasar çeşididir Doğru bir şekilde monte edilmiş ve ön görülen yüklerde yüklenmiş yatakların ömür hesapları bu pullanma hasarlarına göre belirlenmiştir. Standart rulmanlar için kataloglarda 1 milyon devir sayısına kadar kullanma hasar olmadan çalışabilecek yükleme yapılabilmektedir.

Aşınma: Rulmanlı yatakların çalışma ortamına bağlı olarak içleri toz gibi maddelerin girmesi zamanla yüzeyin aşınmasına sebep olur. Bu sebeple mümkün olduğunca yatak sürekli yağlı tutulmalı ve revizyon geçirilerek temizlenmelidir.

Korozyon: Rulmanlı yataklar özellikle nemli ortamlarda çalıştıkları zaman rulman yüzeyinde korozyona sebep olmaktadır.

Kırılma: Çalışma ortamına bağlı olarak rulmanlı yatağın aşırı zorlanmasında üzerinde çeşitli çatlamlar veya kırılma meydana gelir.

Plastik Deformasyon: Aşırı yüklemelerde malzemenin akma sınırının üstünde yüklenmesi ile malzemede kalıcı deformasyonlar oluşur.

Rulmanlı Yatak Hesapları

Rulmanlı yataklar 1 milyon devir çalışma ömrüne göre imal edilmiştir. Kataloglarda bu ömür için taşıyabilecekleri yük değerleri standart deneylere göre verilmektedir. Bununla ilgili ömür hesabı aşağıdaki formüle göre yapılmaktadır.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F} \right)^p$$

Burada C rulmanın standart deneylerden elde edilen yük taşıma değeri, F rulmana gelen yük, P ömür üstelini ifade etmektedir. P değeri bilyalı yataklar için 3, makaralı yataklar için ise $\frac{10}{3}$ alınır. Yukarıdaki ömür ifadesini çalışma saati cinsinden yazarsak,

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{F} \right)^p$$

şeklinde yazılır. Burada n dönme hızı (dev/dk) olarak alınır. Rulmanlı yatağın yük taşıma değeri (C) oda sıcaklığında, standart yağlama şartlarında, darbesiz olarak düzgün bir şekilde etki eden yüke göre elde edilmiştir. Uygulama yapılacak yerde bundan farklı şartlar söz konusu ise kataloglarda verilen değerlerin bazı katsayılarla çarpılarak düzeltilmesi gerekir. Bütün firmaların anlaşma sağladığı düzeltme katsayısı sıcaklıkla ve güvenilirle ilgili katsayılarıdır.

Çizelge: Sıcaklığa Bağlı katsayı Değerleri

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Katsayı
<150	1
150-200	0,30
200-250	0,75
250-300	0,6

Yükleme değerleri %90 güvenirliliğe göre verilmektedir. Daha büyük güvenirlilik değerleri için kataloglardan elde edilen yükün bir katsayı ile çarpılarak küçültülmesi gerekir. Bu katsayı %99 güvenirlilik için (0,21) olarak hesaplanmıştır. Bu ikisinin dışında çeşitli firmalar tarafından yükleme durumu faktörü montajdaki hassasiyet faktörü, yağlama faktörü... gibi katsayılarla önerilmektedir.

Yükleme durumu faktörü yorulma limiti düzeltme faktörü (C_{ϵ}) ile aynıdır. Diğer faktörler için firma kataloglarına başvurulması gerekir.

Rulmana Gelen Kuvvetlerin Hesaplanması

L_{10} değeri 1milyon rakamını ifade etmektedir. Buna karşılık rulmanın kullanılacağı yere göre makinenin tasarlanmasında kullanılan işletme saatleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla L_{10h} değerinin kullanım yerine göre seçilmesi gerekir.

Çizelge: Makine Elemanlarına Bağlı Olarak İşletme Saatleri

Kullanım Yeri	L_{10h} (saat)
El aletleri, tarım makineleri, tıbbi araç gereçler.	300-3000
Kısa süreli veya aralıklı çalışan makineler, elektrik el aletleri, inşaat makineleri.	3000-8000
Kısa süreli veya aralıklı çalışan fakat yük emniyetinin yüksek olması gereken makineler (asansör..gibi)	8000-12000
Günde 8 saat çalışan fakat her zaman tam yük altında bulunmayan makineler	10000-25000
Günde 8saat tam yükte çalışan makineler, takım tezgahları, seri imalat makineleri..gibi	20000-30000
Gece gündüz aralıksız çalışan makineler tekstil makineleri... gibi	40000-50000
Su tesisleri gemi makinesi ..gibi sürekli çalışan makineler	60000-100000
Sürekli çalışan ve yüksek emniyet gerektiren makineler	100000>

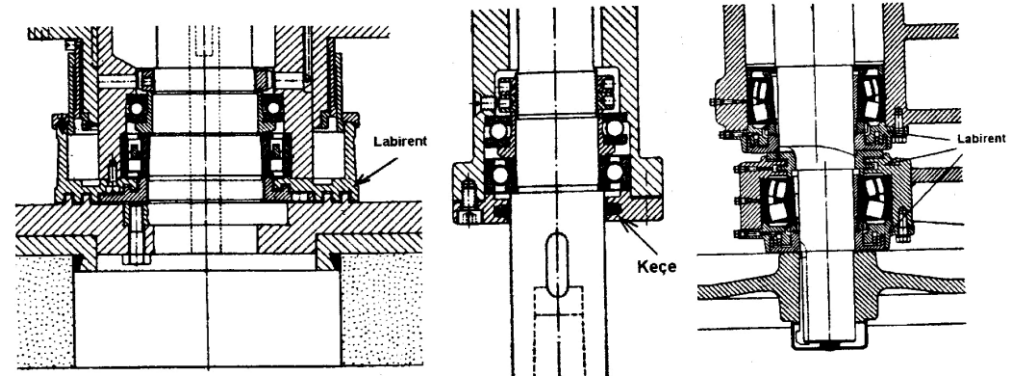
Bazı durumlarda çalışma saati yerine alınan yol cinsinden ömür belirlenmesi gerekir. Bunlar için L_{10h} yerine L_{10s} tanımlanmıştır. Örneğin otomobiller için 100000 km, kamyon ve otobüsler için 200000-300000 km, yük vagonları için, 800000 km, uzak mesafelerde çalışan elektrikli lokomotifler için 3-5 milyon km'dir. Bu değerler standartlaştırılmıştır.

Rulmana gelen yük sadece radyal yük taşıyabilen rulmanlarda radyal yük, sadece eksenel yük taşıyabilen rulmanlarda ise eksenel yüklerdir. Her iki yükü birlikte taşıyabilen rulmanlarda ise bir eş değer yük hesabı yapılması gerekir. Bu kuvveti,

$$F = XF_r + YF_a$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, F_r radyal yük, F_a eksenel yük olarak verilmiştir. X ve Y çarpanları radyal ve eksenel yüklerin oranlarına göre tablodan bulunur. Bu değerler çizelgede gösterilmiştir.

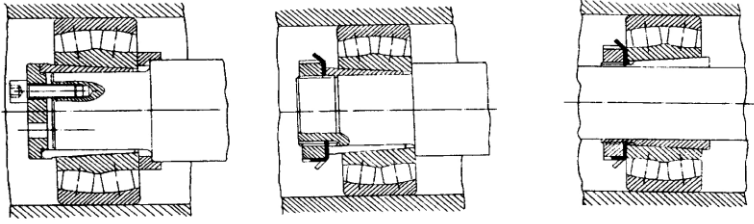
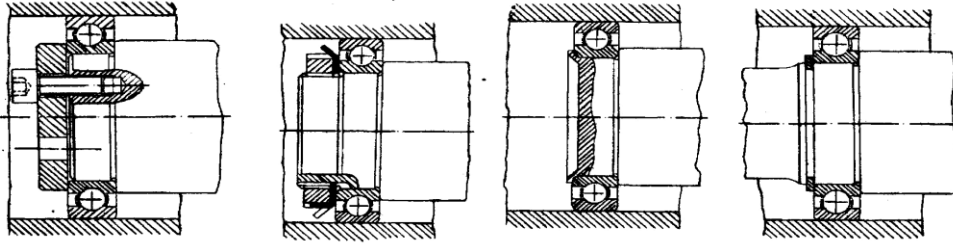
Rulmanlı Yatakların İçine Toz Girmemesi İçin Labirent ve Keçe Bağlantı Şekilleri



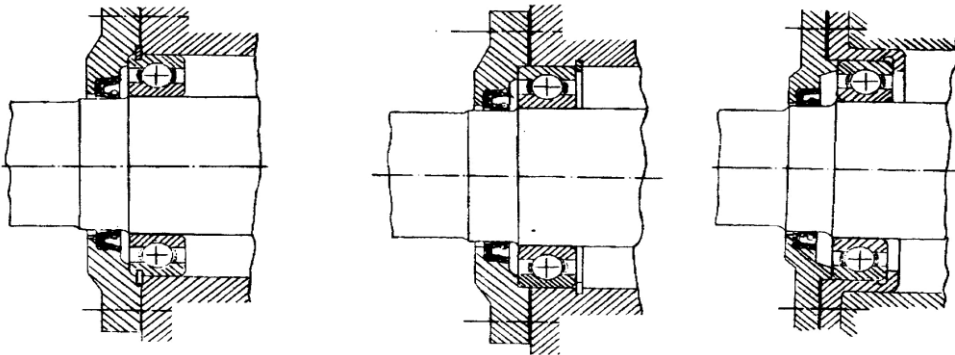
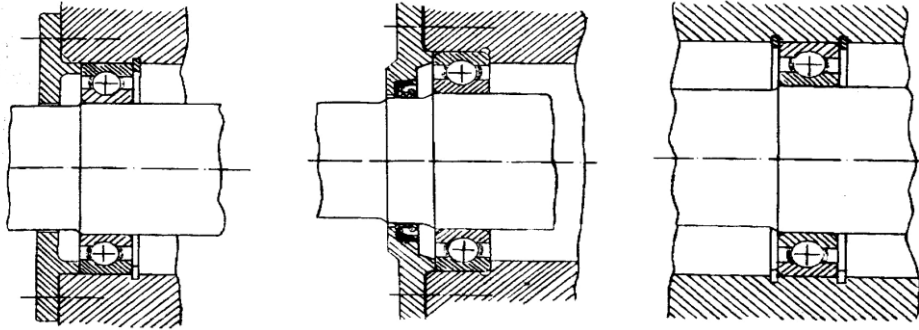
Şekil: Rulmanlı Yatakların keçe ve Labirent ile korunması

Rulmanlı Yatakların Sabitleme Şekilleri

Rulmanlı yataklar millere farklı şekillerde sabitlenirler. Rulmanlı yatağın iç bileziği sabitlendiği gibi dış bileziği de her iki taraftan sabitlenebilirler. Aynı zamanda sabitleme elemanı olarak genellikle sekmanlar kullanılır.



Şekil: Rulmanlı yatakların Millere Sabitleme Şekilleri



Şekil: Rulmanlı Yatakların Gövdelere Yataklama Şekilleri

9.2. Kaymalı Yataklar

Kaymalı yataklar yük taşıma kabiliyetine göre radyal, eksenel, radyal ve eksenel yataklar ile kızaklardır. Kaymalı yatakların rulmanlı yataklara göre şu üstünlükleri vardır.

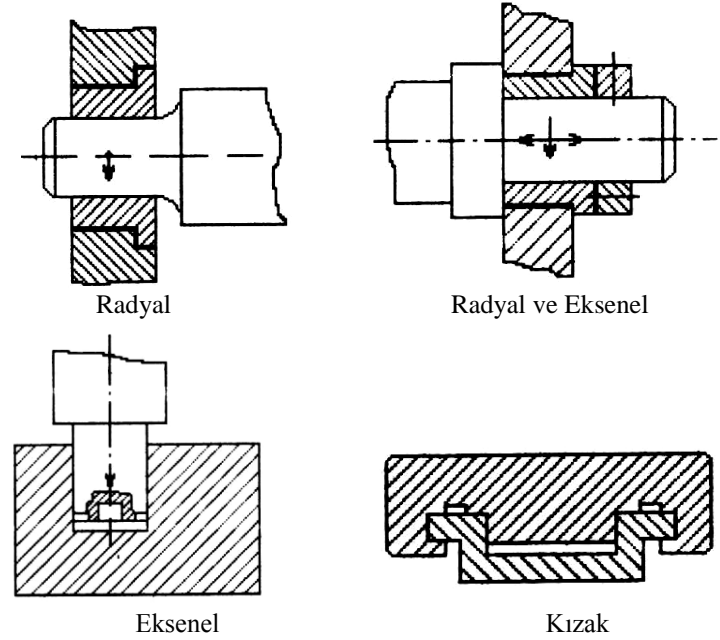
Kaymalı Yatakların Avantajları ve dezavantajları

Avantajları

1. Daha sessiz çalışırlar.
2. Büyük sarsıntı ve darbeleri daha kolay taşıyabilirler.
3. Parça yapılabilir.
4. Radyal yönde az yer kaplarlar.
5. Basit yapıda ve ucuzdurlar.
6. Büyük yük taşıyabilirler.
7. Yüksek hızlarda çalışabilirler.

Dezavantajları

1. Yağlama için özel teçhizat gerekir.
2. Hidro_dinamik yataklarda başlangıç sürtünmesi çok büyüktür.
3. Eksenel yönde çok büyük yer kaplarlar.



Şekil: Kaymalı Yatak Çeşitleri

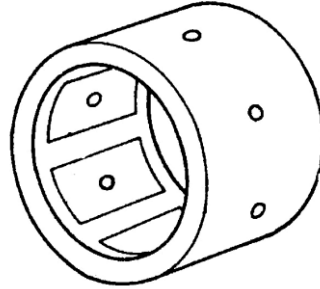
İki yatak birleştirilirse radyal ve eksenel yükleri birlikte taşıyabilen bir yatak elde edilebilir. Kaymalı yataklar yüzey ezilmesi veya abrasif aşınma ile hasara uğrarlar. Bu nedenle kaymalı

yatakların hesabında bu iki hususu dikkate alan yöntemler geliştirilmiştir. Teorik olarak aşınma olmaması için hareketin bir yağ filmi üzerinde gerçekleşmesi gerekir. Bunun için yağ filmi kalınlığı ve bunu sağlayacak yağ basıncının ve hızının belirlenmesi gerekir. Ezilmeyi önlemek için ise belirli bir çapa sahip mil için ancak yatak uzunluğunun hesaplanması mümkündür.

Yatak Tipleri

1. Yağlamasız yataklar: Bu tip yataklar yağlamanın mümkün olmadığı yağlama yağının sisteme zarar verebileceği veya yağlama yağının çeşitli nedenlerle sisteme tutulması mümkün olmadığı durumlarda kullanılır. Sürtünme katsayısı düşük malzemelerden yapılan bu yataklar yüzey basıncı ve dönme hızıyla orantılı olarak ısınırlar. Bu nedenle soğutma önlemlerinin alınması gerekir.

2. Yağlamalı yataklar: Sürtünme katsayısı düşük malzemelerden imal edilmiş yataklar kullanılabileceği gibi bu malzemelerde kaplanmış yataklarda kullanılabilir. Lamel grafitli dökme demirler bu tür malzemelerdir.



3. Hidrostatik yağlamalı yataklar: Bu yataklar üzerinde yağ cebi denilen kısımlara üretilir ve çalışmanın başlamasından itibaren yağ bu cep den basınçlı olarak doldurulur. Yağın ısınması ile akıcılığı değiştiği için yağa soğutma önlemi alınması gerekir. Şekil..de hidrostatik yağlamalı bir yatak gösterilmiştir.

4. Hidrodinamik yağlamalı yataklar: Bu yataklarda yatak içinde sürekli yağ bulunur. Hareketin başlangıcında muylu yatakla temas halindedir. Hızın artmasıyla birlikte yağ bu teması keser bu nedenle başlangıçta önemli aşınma meydana gelebilir.

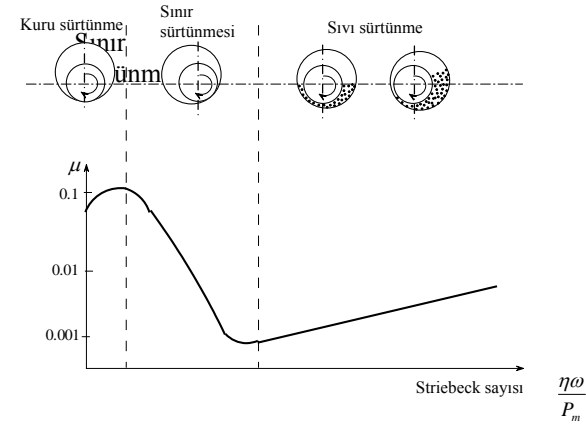
Stribeck sayısı = $\eta \omega / P_m$ ile ifade edilmektedir. Burada η yağlama yağının dinamik viskozitesini, ω milin açısal hızını ve P_m ise yatakta oluşan basıncı belirtmektedir.

Hidrodinamik yataklarda yatak ve muylu arasına verilmesi gereken boşluk miktarı Sommerfeld tarafından belirlenmiştir. Bu boşluk yatak ve muylunun yüzey pürüzlülüğünün toplamından daha büyük olmalıdır. Dolayısıyla boşluk hesabı aslında yüzey pürüzlülüğü maksimum değerinin hesabı anlamına gelmektedir.

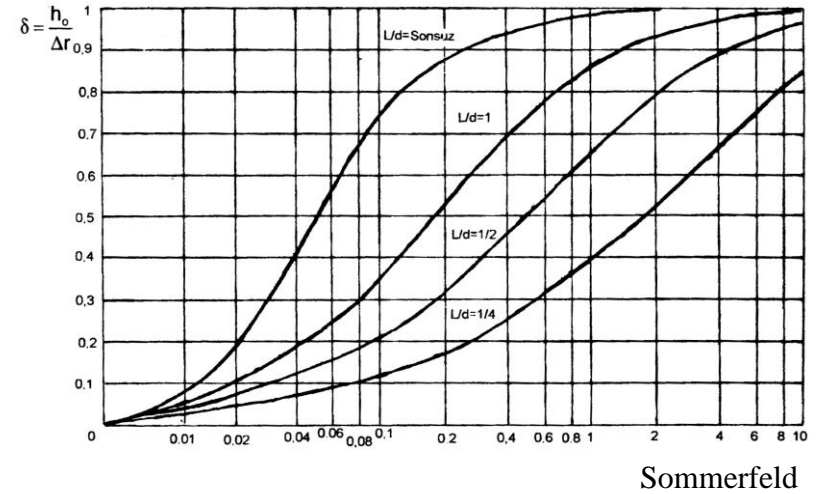
Sommerfeld sayısında bazı düzenlemeler yapıldığında $\frac{\eta n}{P_m \psi^2}$ olur. Burada P_m Pascal

birimine sahip basınç $\frac{F}{d^2}$ $\psi \rightarrow$ ise $\frac{d_y - d_m}{d_m}$ şeklinde hesaplanan bağıl yatak boşluğudur.

Bu formülasyonla elde edilen yatak boşluğu, Rt cinsinden pürüzlülük değerini verir. Standart yüzey pürüzlülükleri ise Ra'ya göre verilmiştir. Dönüşüm; $Ra = Rt/5$ formülüyle yapılır.

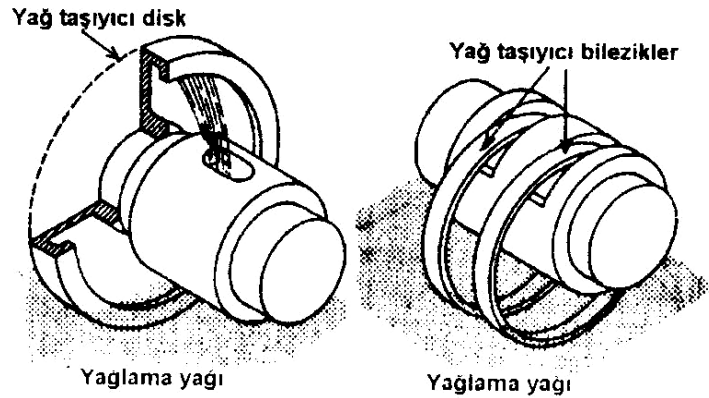


Şekil: Hidrodinamik yağlamada sürtünme katsayısının değişimi



Şekil: Sommerfeld Diyagramı

5. Kendi Kendini Besleyen Yataklar: Yatağın yağ içinde olması her zaman mümkün olmaz. Bu durumda yağı yatağa iletmek için önlem almak gerekir. Bunun için çeşitli tasarım yöntemleri geliştirilmiştir.



Şekil: Kendi Kendini Besleyen Yatak çeşitleri

6. Kendinden Yağlamalı Yataklar: Genellikle toz metalurjisi yöntemi ile gözenekli olarak yatak imalatı yapılabilmektedir. Bu gözeneklere belirli aralıklarda yağ emdirilerek çalışma esnasında yağlamanın otomatik bir şekilde yapılması sağlanabilmektedir. Yapılan tasarım normal çalışma sıcaklıklarında yatağa emdirilmiş olan yağın 1000 saat süre ile yağlamayı devam ettirmesine göre hesaplanmıştır.

Yatak Seçimi

Makine imalatında yatak seçimi çok önemlidir. Yatak seçimi millerin devir sayılarına ve yük taşıma kabiliyetlerine göre değişmektedir. Yatak seçimi için şekil.de radyal yük altındaki yatakların yük taşıma kabiliyetleri verilmiştir. Diğer de ise eksenel yük altında değişen yatak tiplerinin yük taşıma kabiliyetleri gösterilmiştir.

