



## ZEMİNDE SU AKIMLARI

Zemin içinde iki nokta arasında su akımı meydana gelebilmesi için, o iki noktanın enerji seviyeleri arasında bir farklılık olması gerekir.

Su yüksek enerji noktasından düşük enerji noktasına akarken sürtünme kuvvetlerinden dolayı bir miktar enerji kaybına uğrar.

Akışkanlar mekaniğinde, sıkışması ihmal edilebilir sıvıların kararlı akım problemlerinde enerji kayıplarının ihmal edileceği durumlarda akım kanalı boyunca toplam enerjinin sabit kalacağını ifade etmek için *Bernoulli enerji denklemi* kullanılır.

*Bernoulli bağıntısına* göre, zemin içerisindeki yeraltı su akımı durumunda, herhangi bir noktadaki toplam yükseklik,  $h$  (toplam yük, toplam potansiyel enerji, toplam hidrolik yük) üç bileşenden oluşur.

*Bernoulli bağıntısı*

$$h = z + \frac{u}{\gamma_{su}} + \frac{V^2}{2g}$$

$h$ : toplam yükseklik

$z$ : yer(konum) yüksekliği

$$\frac{u}{\gamma_{su}} = h_{su} \text{ : boşluksuyu yüksekliği} \quad \frac{V^2}{2g} \text{ : hız yüksekliği}$$



## ZEMİNDE SU AKIMLARI

Bernoulli bağıntısı

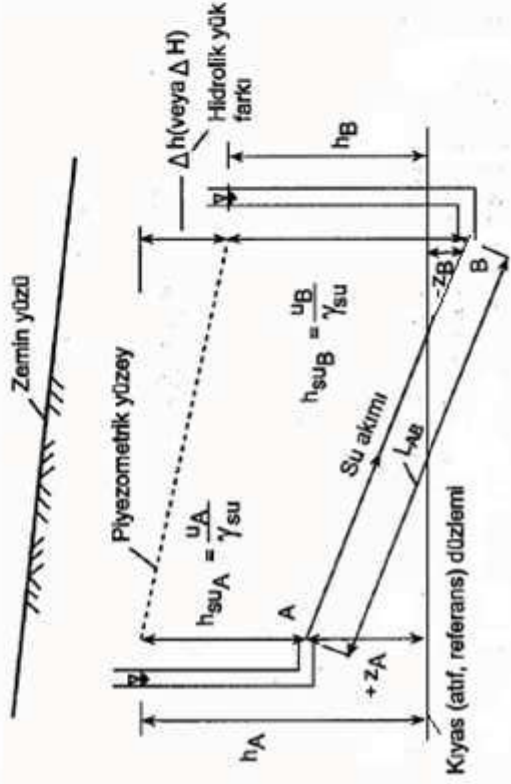
$$h = z + \frac{u}{\gamma_{su}} + \frac{V^2}{2g}$$

**h**: toplam yükseklik

**z**: yer(konum) yüksekliği

$$\frac{u}{\gamma_{su}} = h_{su} : \text{boşluksuyu yüksekliği}$$

$$\frac{V^2}{2g} : \text{hız yüksekliği}$$



Zeminlerde genel olarak akım hızı düşük olduğu için,  $v^2/2g$  şeklinde ifade edilen hız yüksekliğinin değeri diğerlerinin yanında ihmal edilebilir. Ve yeraltı suları için toplam yükseklik;

$$h = z + \frac{u}{\gamma_{su}} = z + h_{su} \quad \text{olur.}$$

Şekildeki A ve B noktalarındaki toplam yükseklikler,

$$h_A = z_A + \frac{u_A}{\gamma_{su}} = z_A + h_{suA} \quad h_B = \frac{u_B}{\gamma_{su}} - z_B = h_{suB} - z_B \quad \text{olur.}$$

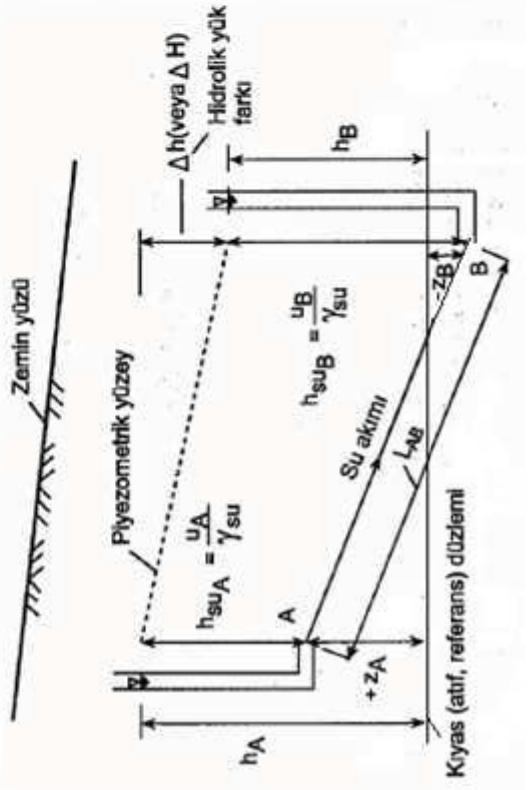


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

Şekildeki A ve B noktalarındaki toplam yükseklikler,

$$h_A = z_A + \frac{u_A}{\gamma_{su}} = z_A + h_{suA}$$

$$h_B = \frac{u_B}{\gamma_{su}} - z_B = h_{suB} - z_B$$



Yine buradaki A ve B noktaları arasındaki hidrolik eğim;

$$i_{AB} = \frac{\Delta h_{AB}}{L_{AB}} = \frac{h_A - h_B}{L_{AB}}$$

$\Delta h_{AB}$  = A ve B noktaları arasındaki toplam yükseklik farkı

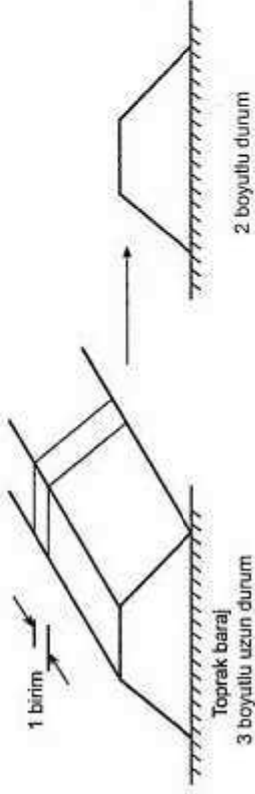
$L_{AB}$  = A ve B noktaları arasındaki akım yolu uzunluğu



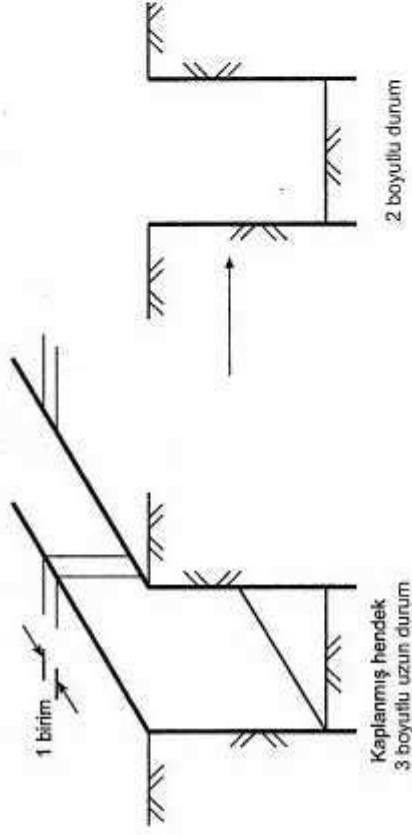


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

Zemin mekaniği problemleri gerçekte üç boyutlu problemlerdir. Ancak bazı durumlarda uzunluk diğer iki boyuta göre çok daha büyüktür ve olayın özellikleri uzunluk boyunca değişmez. Bu nedenle bu gibi durumlarda problem iki boyutlu olarak çözülür ve üç boyutlu olaylara bazı katsayılarla geçilir.



**Yeraltı suyu problemleri iki boyutlu akım koşuluna yakın olup, bu tür problemlerin iki boyutlu olarak analiz edilmesi gereklidir.**





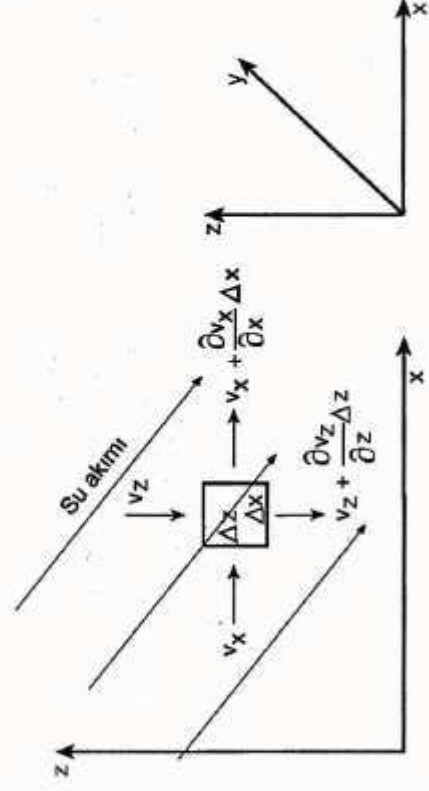
## ZEMİNDE SU AKIMLARI

Yeraltı suyu problemleri iki boyutlu akım koşuluna yakın olup, bu tür problemlerin iki boyutlu olarak analiz edilmesi gereklidir.

*İki boyutlu akımın temel denklemini* elde etmek için şu kabuller yapılır;

- Doygun boşluklu ortam sıkışmazdır( boşluklar zamanla değişmez).
- Darcy yasası geçerlidir.
- Zemin anizotropdur.(  $k_x \neq k_z$  )(Özellikler, yönlerde farklıdır.)

Ve böyle bir akımda, şekil düzlemine dik uzunluğu 1 olan  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  boyutlu bir eleman incelenirse,





## ZEMİNDE SU AKIMLARI

$V_x$  ,  $V_z$  elemana giren suların hızları ,(x ve z doğrultusunda)

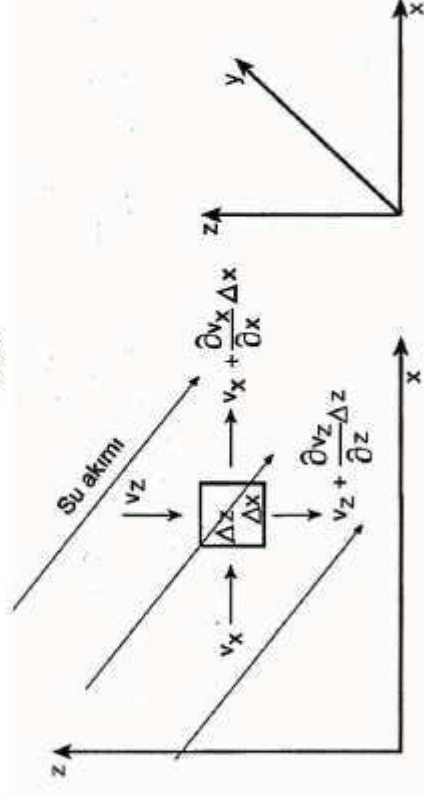
$$V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} . \Delta x \quad , \quad V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} . \Delta z$$
 elemandan çıkış hızları olsun.

Süreklilik denklemini gereği, giren su çıkan suya eşit olmalıdır.

$$q_{giren} = q_{çikan}$$

$$q = V . A$$

$$V_x . (\Delta z . 1) + V_z . (\Delta x . 1) = \left( V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} . \Delta x \right) . (\Delta z . 1) + \left( V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} . \Delta z \right) . (\Delta x . 1)$$







## ZEMİNDE SU AKIMLARI

$$V_x \cdot (\Delta z.1) + V_z \cdot (\Delta x.1) = \left( V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot \Delta x \right) \cdot (\Delta z.1) + \left( V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} \cdot \Delta z \right) \cdot (\Delta x.1)$$

bağıntıda  $d_x = \Delta x$ ,  $dy = \Delta z$  konup sadeleştirilirse;

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{Bağıntı 2}$$

süreklilik denklemi elde edilir. Darcy yasasına göre,

$$V_x = k_x \cdot i_x = k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{ve} \quad V_z = k_z \cdot i_z = k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad \dots\dots\dots \text{Bağıntı 3}$$

Bağıntı 3 , Bağıntı 2 de yerine konulursa,

$$\frac{\partial^2 (k_x \cdot h)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (k_z \cdot h)}{\partial z^2} = 0 \quad \text{elde edilir.}$$

İzotrop zeminlerde  $k_x = k_z = k$  'dır. Ve  $\Phi = k \cdot h$  potansiyel fonksiyonudur.

Bağıntı, 
$$\frac{\partial^2 (\Phi)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\Phi)}{\partial z^2} = 0 \quad \text{şeklini alır.}$$

Bu bağıntı iki boyutlu akımlar için Laplace denklemidir ve analitik, nümerik, deneysel ve grafik yöntemleriyle çözülebilir. Grafik çözüm açıklanacaktır.

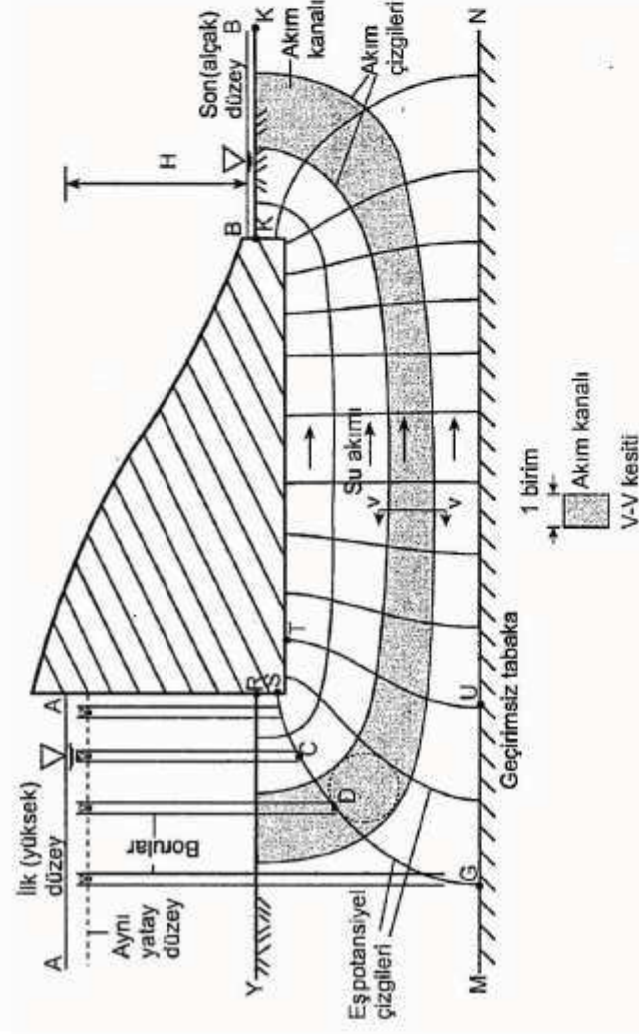


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

*Toprak dolgu barajda su sızması problemini inceleyelim.*

*Akım ağı, akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgilerden oluşur.*



Akım çizgisi, suyun ortalama akış yolunu gösteren çizgidir. İki akış çizgisi arasındaki aralığa Akım Kanalı denilir.

Akım kanalı dikdörtgen enkesitli olup, şekil düzlemine dik boyutu 1 birimdir.

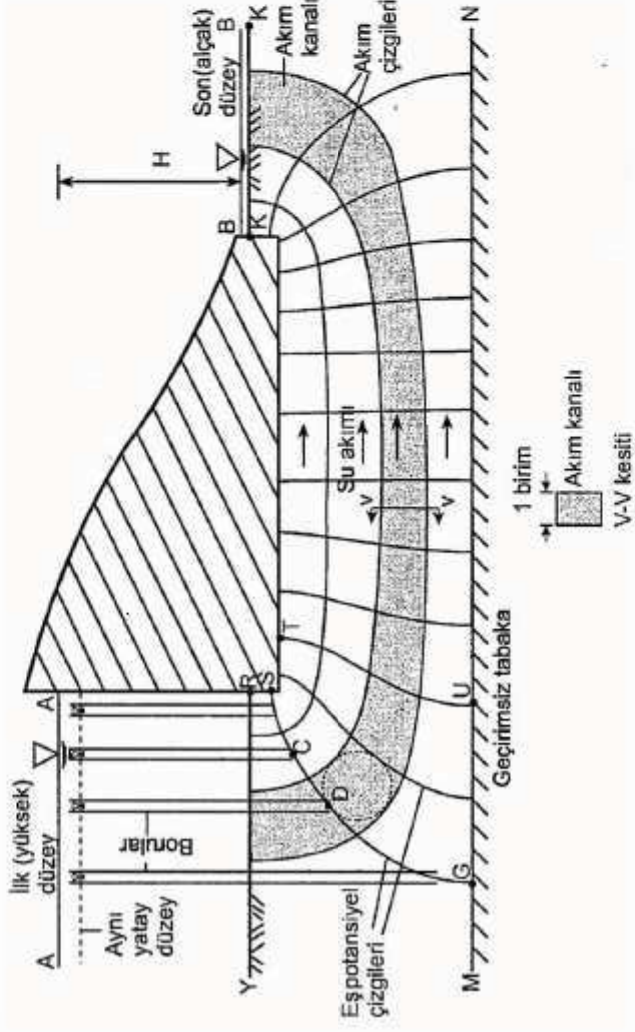
Eşpotansiyel çizgisi, akış ortamında aynı piyezometrik yatay düzeye sahip noktaları birleştiren çizgidir.





## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı



Akım ağı ölçekli çizilmiş bir şekil üzerinde, deneme - yanılma ile oluşturulur ve bazı özellikleri vardır.

- 1) Akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri birbirini dik olarak keserler.
- 2) Oluşturulan elemanlar yaklaşık kare biçimlidirler.
- 3) Her bir akım kanalından geçen akım miktarı birbirine eşittir. ( $q_1 = q_2 = q_3$ )

4) Ardışık eşpotansiyel çizgileri arasındaki potansiyel düşüşleri (yük kaybı) birbirine eşittir ( $\Delta h = s \cdot b \cdot t$ ).

5) Geçirimsiz sınırlar (MN, ARSB) birer akım çizgisidir.

6) Su altındaki zemin yüzleri (üzerinde sadece su olan yüzey) birer eşpotansiyel çizgidir.



## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

#### Akım ağının kullanılması

Akım ağı, sızan su miktarının,

Akış durumunda boşluksuyu basıncının ve

Hidrolik eğimin hesaplanmasında kullanılır.

#### Sızan suyun miktarının hesaplanması

Akım ağındaki elemanın şekil düzlemine dik uzunluğu 1 olsun.

Ardışık iki eşpotansiyel çizgi arasındaki düşme(yük kaybı)

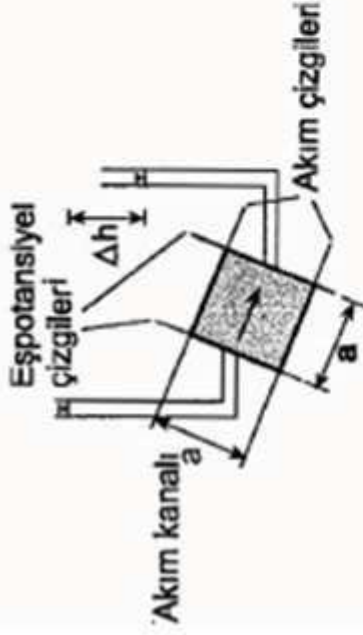
$\Delta h$  veya  $\Delta H$

$$\Delta h = \Delta H = \frac{H}{N_e}$$

Akım ağındaki herhangi bir eleman.

H= Akıma neden olan toplam hidrolik yük kaybı

$N_e$ =eşpotansiyel düşmelerin(yük kaybı) sayısı(eşpotansiyel çizgi sayısı - 1)





## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

Sızan suyun miktarının hesaplanması

Bu akım kanalından geçen suyun debisi,  $\Delta q$  ;

$$\Delta q = A.k.i = (a.1).k. \frac{\Delta h}{a} = k.\Delta h \quad \Delta h = \Delta H = \frac{H}{N_e}$$

$$\Delta q = k. \frac{H}{N_e} \text{ olur.}$$

Akım kanallarının toplam sayısı  $N_a$  (Akım çizgilerinin toplam sayısı – 1) ise sızan suyun miktarı;

$$q = \sum \Delta q = N_a. \Delta q = N_a.k. \frac{H}{N_e} = k.h. \frac{N_a}{N_e}$$

Problemin şekil düzlemine dik uzunluğu L ise toplam debi,

$$\sum q = L.q = L.k.h. \frac{N_a}{N_e} \text{ olur.}$$





## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

Akış durumunda boşluksuyu basıncının belirlenmesi

Akış halindeki suyun herhangi bir düzeye uyguladığı basıncın dağılışı, durgun haldeki suyunkinden farklılık gösterir.

Akışın olduğu durumda herhangi bir noktadaki su basıncı,  $U$ ,

$u = h_{su} \cdot \gamma_{su}$  olur. ilgili noktadaki piyezometrik su yüksekliği,  $h_{su}$

$h_{su} = h_o - \sum \Delta H \pm z$  şeklinde hesaplanır.

$h_o$  = başlangıçtaki toplam yükseklik

$\sum \Delta H$  = potansiyel düşmelerin toplamı

$z$  = noktanın yer yüksekliği

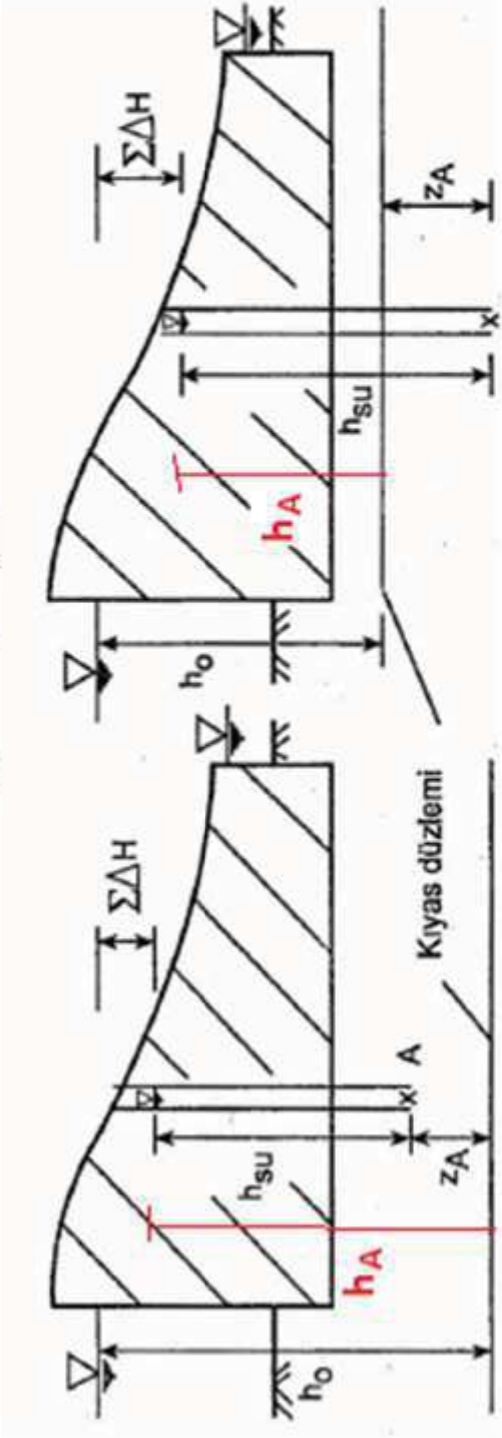


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

Akış durumunda boşluksuyu basıncının belirlenmesi

$$u = h_{su} \cdot \gamma_{su} \quad h_{su} = h_o - \sum \Delta H \pm z$$



- a. Nokta kıyas düzlemi üstünde ise      b. Nokta kıyas düzlemi altında ise

$$h_A = h_{su} + z_A = h_o - \sum \Delta H$$

$$h_A = h_{su} - z_A = h_o - \sum \Delta H$$

$$h_{su} = h_o - \sum \Delta H - z_A$$

$$h_{su} = h_o - \sum \Delta H + z_A$$



## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Grafik çözüm: Akım Ağı

Hidrolik eğimin bulunması

$$i_{AB} = \frac{\Delta h_{AB}}{L_{AB}} \quad \Delta h = \frac{H}{N_e}$$

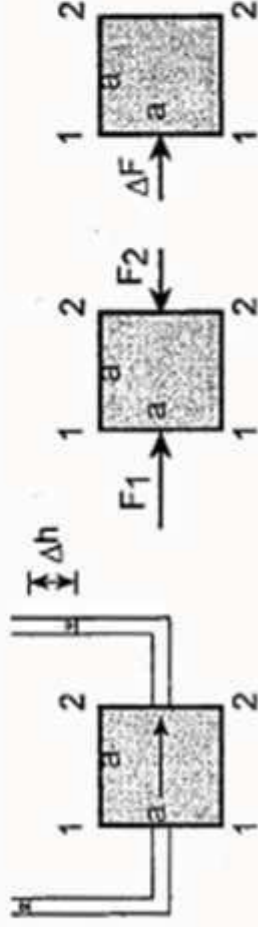
$L_{AB}$  = Noktalar arasındaki uzaklık (ölçekli şekilden belirlenir)

### AKIM KUVVETİ VE KAYNAMA

#### Akım kuvveti

Su zeminde akarken, akış yönünde zemini sürüklemek ister. Suyun zemine akış doğrultusunda uyguladığı kuvvete akım kuvveti denir.

Akışın olduğu ortamda, akım doğrultusunda kenar uzunluğu  $a$  olan bir küp düşünelim.

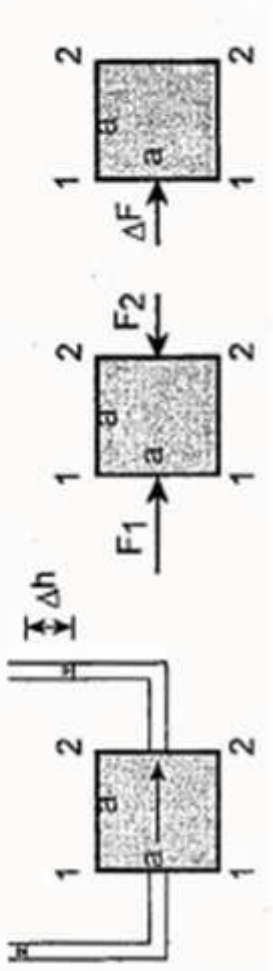






## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Akım kuvveti



Elemanın 1-1 ve 2-2 yüzeylerine etkiyen su kuvvet farkı ( $\Delta F$ );

$\Delta F = \Delta h \cdot \gamma_{su} \cdot a^2$  olup, durgun ve akış durumları arasındaki farkı yansıtır ve bu fark elemana akış doğrultusunda etkir. Birim hacme gelen kuvvet, akım kuvveti,  $j$ , olarak tanımlanır.

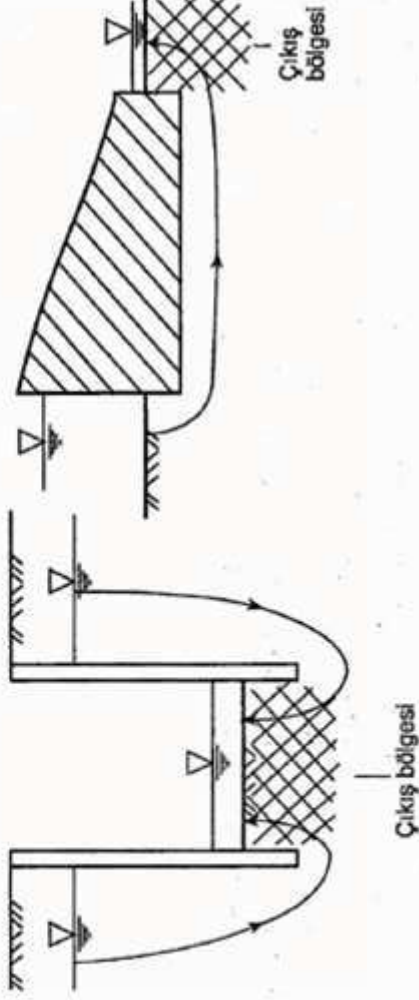
$$j = \frac{\Delta F}{a^3} = \frac{\Delta h \cdot \gamma_{su} \cdot a^2}{a^3} = \frac{\Delta h}{a} \cdot \gamma_{su}$$

Hidrolik eğim,  $\frac{\Delta h}{a}$  olduğu için;  $j = i \cdot \gamma_{su}$  olur.



## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Kaynama



Kaynama bölgeleri.

Zemindeki su akımlarında, çıkış bölgelerinde, akım yönü, yukarı doğru ise o kısımda kaynama(boiling) olayı olabilir. Akım ağları kullanılarak çıkış bölgesinde belli uzunluk için potansiyel farkının uzunluğa bölünmesiyle bölgedeki hidrolik eğim elde edilir(çıkış).



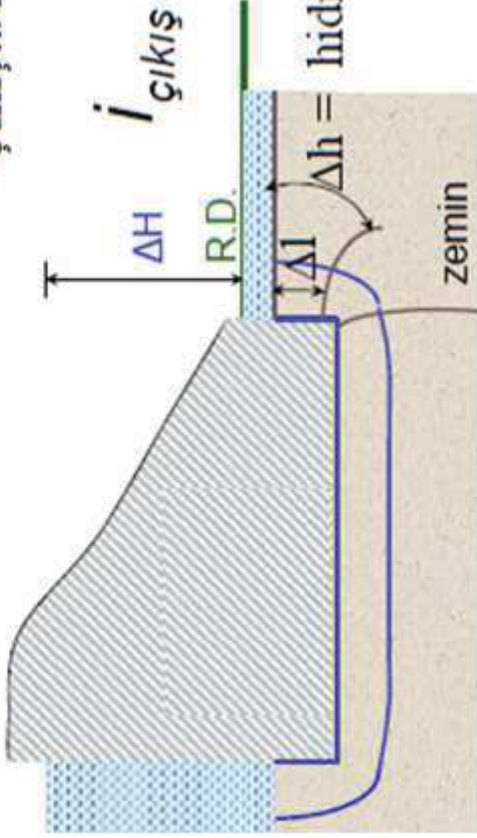
## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Kaynama

Akım ağları kullanılarak çıkış bölgesinde belli uzunluk potansiyel farkının(yük kaybı) uzunluğa bölünmesiyle bölgedeki hidrolik eğim elde edilir(ıçıkıs).

Çıkışta hidrolik eğim

$$i_{\text{çıkış}} = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$



Bulunan hidrolik eğim o zemin için tanımlanan kritik hidrolik eğim ile karşılaştırılır.

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad GS = \frac{i_{cr}}{i_{\text{çıkış}}} > 1 \text{ olmalıdır.}$$

Kaynama olayının oluştuğu zemine akıcı kum(kum türü değil,kaynamaya maruz kuma verilen ad) denilir. Bu bölgede zeminin taşıma gücü sıfır olup,insanlar araçlar suya gömülür.



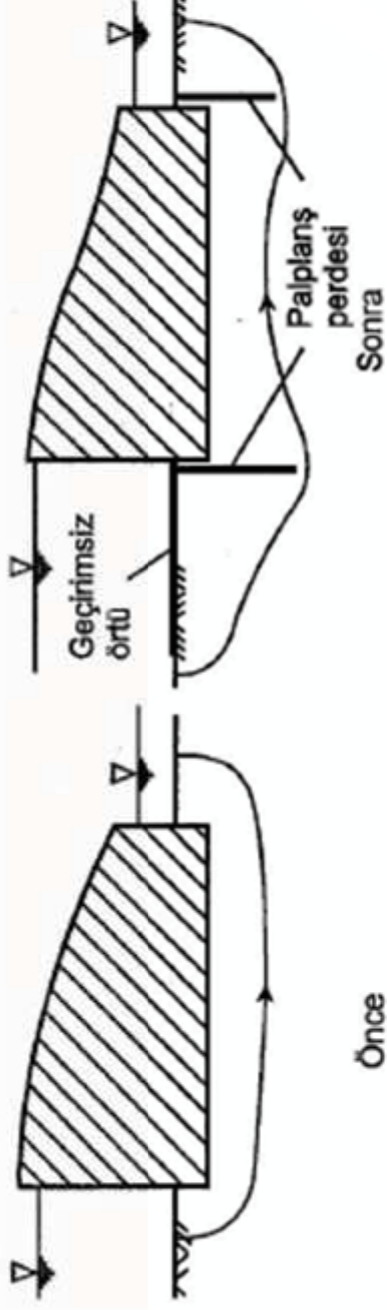


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Kaynama

Kaynama olayını önlemek için;

Akım yolu uzunluğu artırılır veya kaynama riskli bölge üzerinde ağırlık filtresi oluşturulur.



Şekil Akım yolu uzunluğunun artırılması.

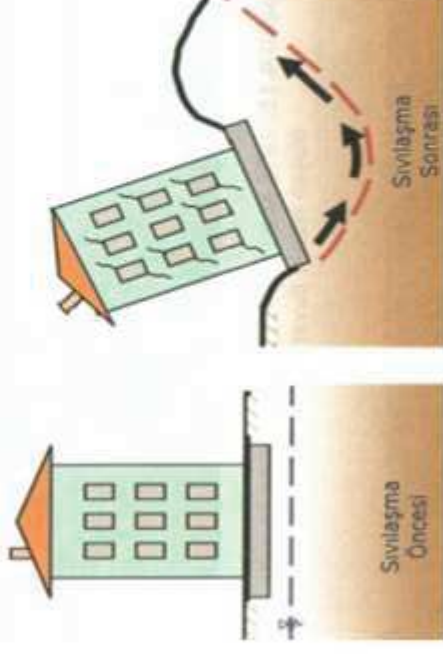


## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Sıvılaşma

Gevşek veya gevşeye yakın suya doygun kum gibi taneli zeminlerde, deprem vb. etkilerle oluşan titreşimlerin etkisi ile ( $e \downarrow, n \downarrow, D_r \uparrow$ ) daha sıkı dizilişe geçen taneler arasındaki suyun bir kısmı düşük geçirimsizlikten dolayı hızla kaçamayarak (su ve taneler sıkışmazdır), boşluksuyu basıncının artmasına yol açar. Toplam gerilme sabit kalırken, artan boşluksuyu basıncı efektif gerilmeyi sıfır yaparak ( $\sigma^t \downarrow = \sigma - U \uparrow$ ) ( $\sigma^t = 0$ ) zeminin bir sıvı gibi davranmasına (sıvılaşmış zemin) yol açar. Kayma direnci ve taşıma gücü sıfır olan böyle zeminler sıvı gibi olur.

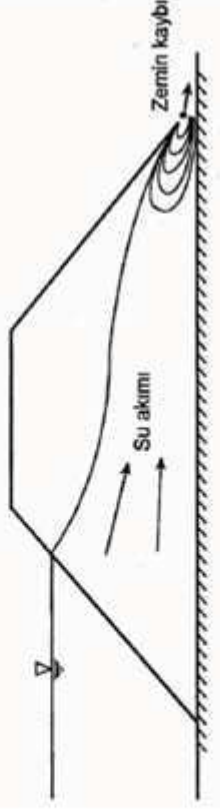
Bu olayı önlemek için, zemin sıklığı artırılır, ıslah edilir, zemin geçilerek sağlam zemine yük aktarılır.





## ZEMİNDE SU AKIMLARI

### Borulanma

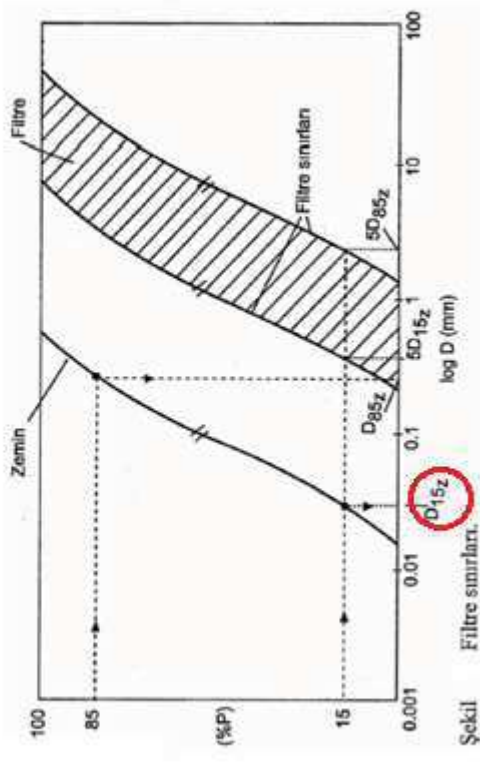


Şekil Borulanma olayı.

Su zeminden çıkarken, zemin tanelerini de sürükleyebilir. Bunun sonucu zeminde oluşan iç erozyona borulanma denir ( $i_{cizikt} > i_{cr}$ ). Borulanmayı önlemek için drene olan zemine göre daha iri taneli malzemelerden filtreler oluşturulur.

Filtre zemini başlıca 2 koşulu sağlamalıdır.

- 1) Geçirimsizlik koşulu  
 $D_{15}(\text{filtre}) \geq 5D_{15}(\text{zemin})$
- 2) Borulanma koşulu  
 $D_{15}(\text{filtre}) \leq 5D_{85}(\text{zemin})$



Şekil Filtre sınırları.