

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
TÜNEL DERSİ

5. Bölüm – Genişletilmiş –

**(Dairesel kesitli tünellerde gerilme dağılımı, Kritik iksa basınç/
yerdeğiştirme kavramı, Zeminde açılan tünellerde stabilite konusu)**

Prof. Dr. Müh. Ergin ARIOĞLU

Yapı Merkezi AR&GE Bölümü

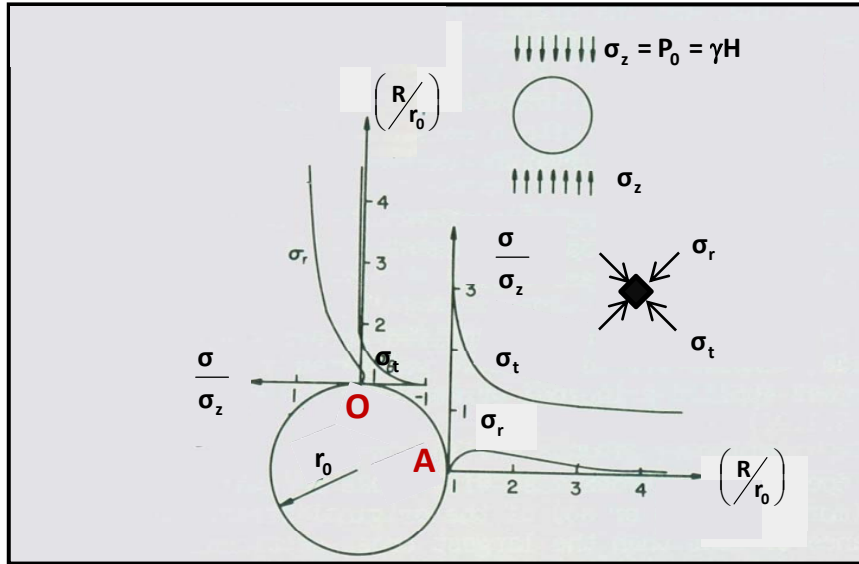
2009

HATIRLATMA NOTU

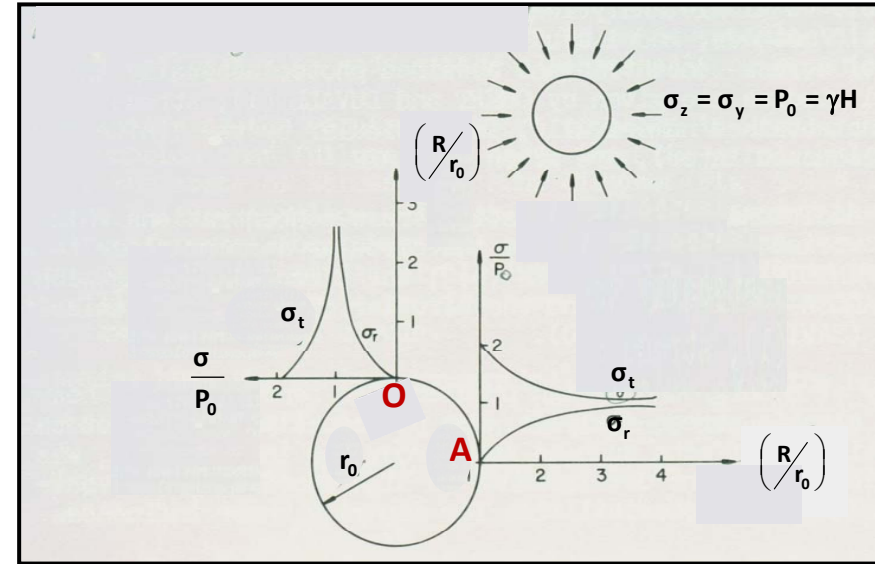
- Düşey gerilme ($\sigma_z \neq 0, \sigma_y = 0$) altında dairesel kesitli bir tünelde ($\sigma_z = \gamma H$) dağılımı şöyledir:
 - Yan cidarda – A noktası – teğetsel gerilme “ σ_t ” maksimumdur. Büyüklüğü ise $\sigma_{t,A} = 3 \sigma_z = 3\gamma H$ ’ dir. ($\sigma_z = P_0 = \gamma H$ derinlik basıncıdır). $R = 2r_0$ ’ de $\sigma_t \rightarrow \sigma_z = \gamma H$ ’ a asimptod olmaktadır. Burada $\gamma =$ Kaya kütlesinin birim hacim ağırlığı, $H =$ Tünel derinliğidir. Eğer teğetsel gerilmenin büyüklüğü, $\sigma_{z,A}$ kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımını $\sigma_{y,b}$ aşıyorsa A noktasında “yenilme” oluşacaktır (Bkz Mohr – Coulomb gösterimi).
 - Yan cidarda radyal gerilme $\sigma_{r,A}$ sıfırdır. $\sigma_{r,A}$ ’ nın $\left(\frac{R}{r_0}\right)$ ’ e göre değişiminde büyük $\left(\frac{R}{r_0}\right)$ değerlerinde $\sigma_{r,A} \rightarrow 0$ olmaktadır.
 - Tavanda – O noktası – teğetsel gerilmenin büyüklüğü $\sigma_{t,0} = - \sigma_z = - \gamma H$ ’ dir. yani cidardaki kaya kütlesi “çökme gerilmesine” çalışmaktadır.

❖ Dairesel Kesitli Tünelde Gerilme Dağılımları:

- Sadece düşey gerilme mevcut



- Hidrostatik gerilme koşulu mevcut

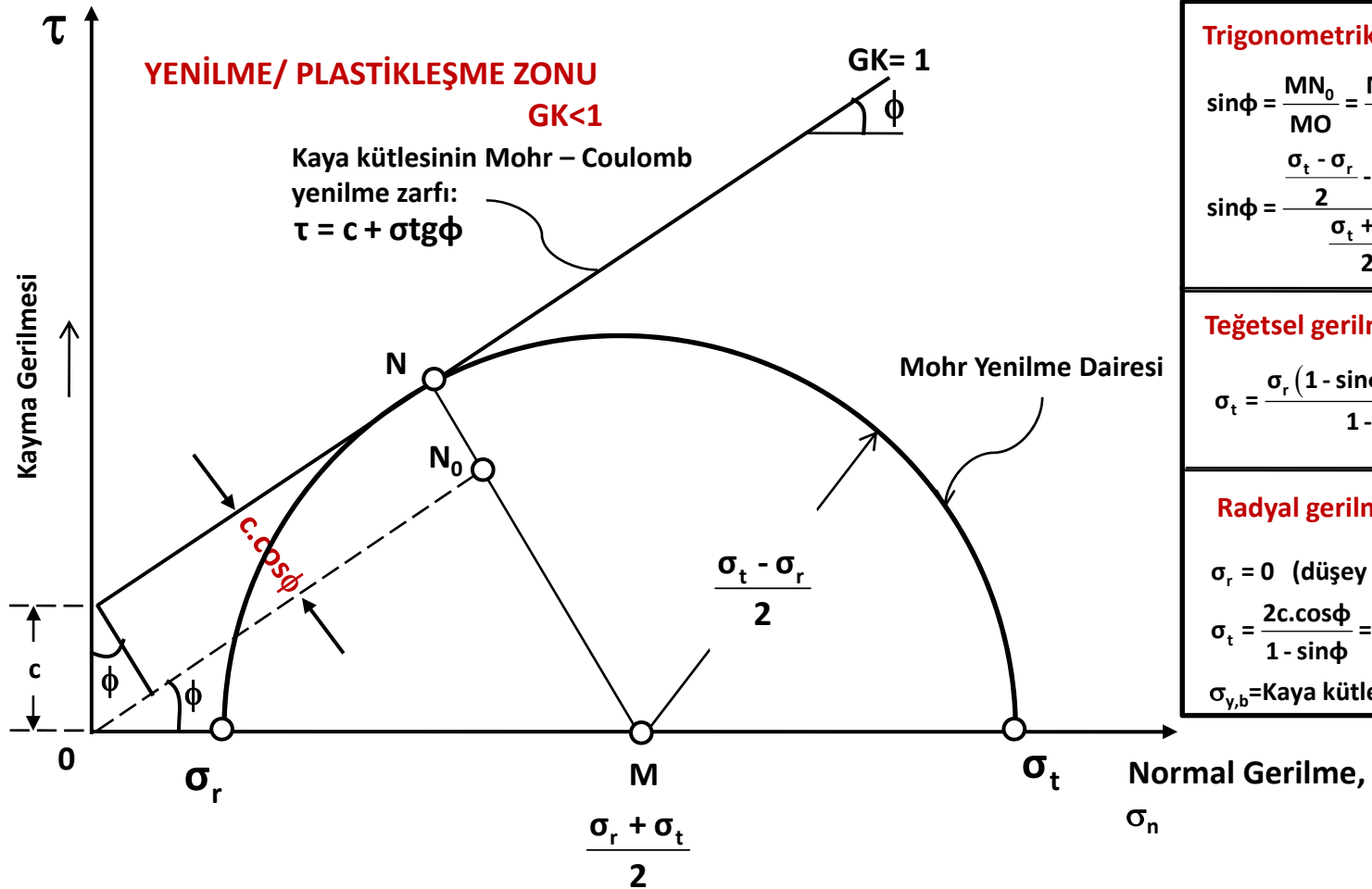


(r_0 = Kazı yarıçapı, R = İncelenen elemanın merkez noktasına olan uzaklığı)

Kaya kütlelerinin çekme dayanımları basınç dayanımlarına kıyasla çok küçük olacağından, büyük olasılıkla tavanda bir “çekme yenilmesi” oluşacaktır.

- $\sigma_{r,0} \approx 0'$ dir. Artan $\left(\frac{R}{r_0}\right)$ değerlerinde $\sigma_{r,0} \rightarrow \sigma_z = P_0 = \gamma H$ asimptod olacaktır.
- Hidrostatik gerilme koşulunda $(\sigma_{t,0}, \sigma_{r,0})$ ve $(\sigma_{t,A}, \sigma_{r,A})$ dağılımları şöyledir:
 - A noktasında teğetsel gerilmenin büyüklüğü $\sigma_{t,A} = 2 \sigma_z = 2 \gamma H$ olup, artan $\left(\frac{R}{r_0}\right)$ değerlerinde hızla derinlik basıncına (γH) asimptod olur. $\sigma_{y,b} > \sigma_{t,A} = 2 \sigma_z = 2 \gamma H$ ise, bu nokta civarında “basınç yenilmesi” meydana gelir.
 - Tavanda herhangi bir çekme gerilmesinden kaynaklanacak bir yenilme sözkonusu değildir. Basınç yenilmesi gözlemlenebilir.
- Eğer $\sigma_{t,A} \geq \sigma_{y,lab}$ ise tünel etrafında plastikleşmeyi önlemek amacıyla tünel cidarına radyal basınç ($P_i = \sigma_r$) uygulayarak, daha açık bir deyişle iksa sistemleri (püskürtme beton, çelik bağ, tavan saplamaları) yerleştirilerek gerilme koşullarının tanımladığı Mohr – Coulomb kırılma dairesinin kaya kütlelerinin yenilme zarfının altında kalması sağlanır. Böylelikle iksa sistemiyle tünel cidarındaki gerilme koşulları değiştirilmek suretiyle verilen kaya kütlesi için “stabilite koşulları” tünelde gerçekleştirilebilir (Bkz Şekil).

❖ Kaya kütleli yenilme zarfı/ Tünel cidarında Mohr yenilme dairesi:



Trigonometrik olarak içsel sürtünme açısı:

$$\sin \phi = \frac{MN_0}{MO} = \frac{MN - NN_0}{MO}$$

$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} - c \cdot \cos \phi}{\frac{\sigma_t + \sigma_r}{2}}$$

Teğetsel gerilme:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_r (1 - \sin \phi) + 2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

Radyal gerilme:

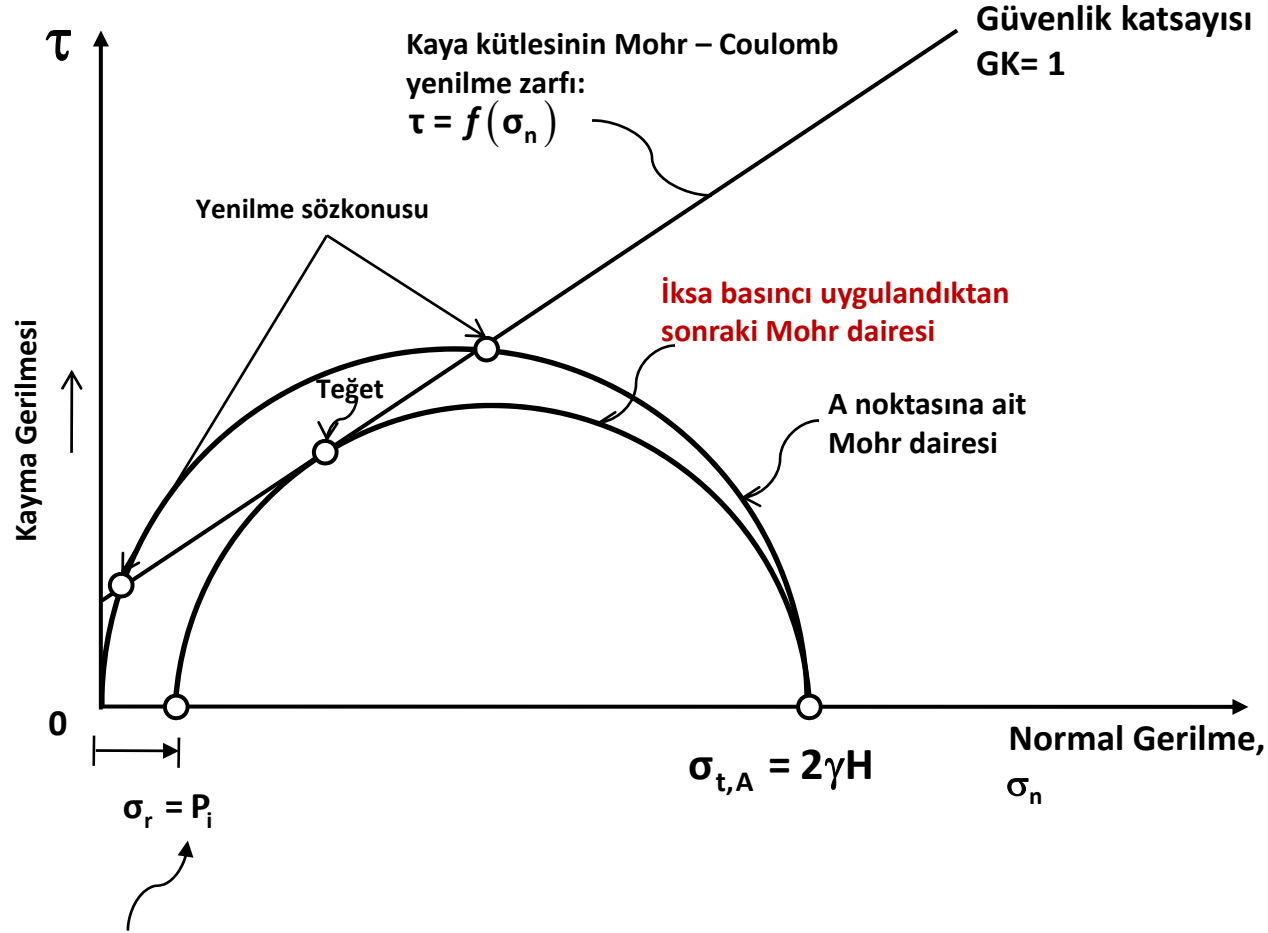
$\sigma_r = 0$ (düşey ve hidrostatik gerilme durumunda)

$$\sigma_t = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} = \sigma_{y,b} \text{ 'dir.}$$

$\sigma_{y,b}$ = Kaya kütleli tek eksenli basınç dayanımı

(GK = Yenilmeye karşı güvenlik katsayısı, c = Kohezyon)

❖ İksa sistemiyle tünelde yenilmenin önlenmesi:



Tünelde iksanın uygulanmasıyla "yenilme" önlenmektedir.

Sayısal Örnek:

260 m derinlikte ve kazı çapı $D= 8$ m olan bir tünel, jeolojik dayanım indisi $GSI= 50$ ile tanımlanan kaya kütlelerinden geçecektir. Tünelin etrafında bir plastikleşme/ yenilme zonunun olmaması istenmektedir. Bu proje koşulunu sağlamak için

- İzin verilebilir radyal yerdeğiştirme miktarı, ve
- İksa basıncının büyüklüğünü

hesaplayınız. Temel kabuller aşağıda sıralanmıştır.

- Hidrostatik gerilme koşulu mevcuttur.
- Kaya kütlelerinin yenilme kriteri Mohr – Coulomb kriterinden belirlenecektir.
- Sağlam kaya – kumtaşı – numunesinin tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{lab,b}= 60$ MPa, formasyonun Poisson oranı $\nu=0,20$ ' dir.
- Problemlerde kullanılan diğer büyüklüklerin kestirimi mühendis tarafından yapılacaktır.

Çözüm:

- Genel:

Hidrostatik gerilme koşulunda ($\sigma_z= \sigma_y= \sigma_x=P_0$) dairesel kesitli tünelin elastik bölgede teorik radyal yerdeğiştirmesi

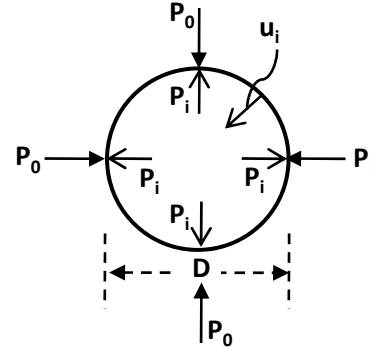
$$u_{ie} = \frac{D(1+\nu)}{2E_y}(P_0 - P_i)$$

'dir (Bkz Şekil).

Devamıdır...

Kritik içsı basıncı ise

$$P_{i,k} = \frac{2P_0 - \sigma_{y,b}}{1 + K}$$



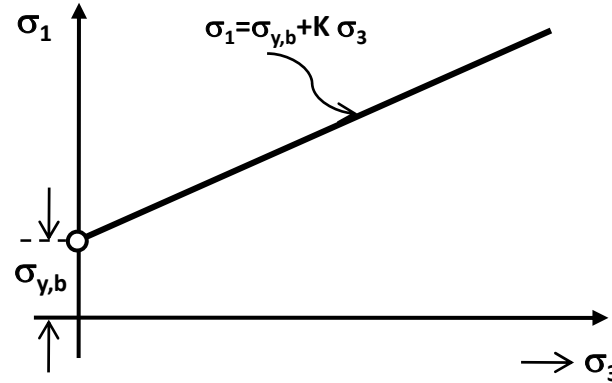
P_0 = Derinlik basıncı

P_i = İksa basıncı

$P_i < P_0$

' dir (Hoek – Kaiser, Bawden, 1995). Mohr – Coulomb yenilme ölçütünde – $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ ifadesinin eğimini tanımlayan –

$$K = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$



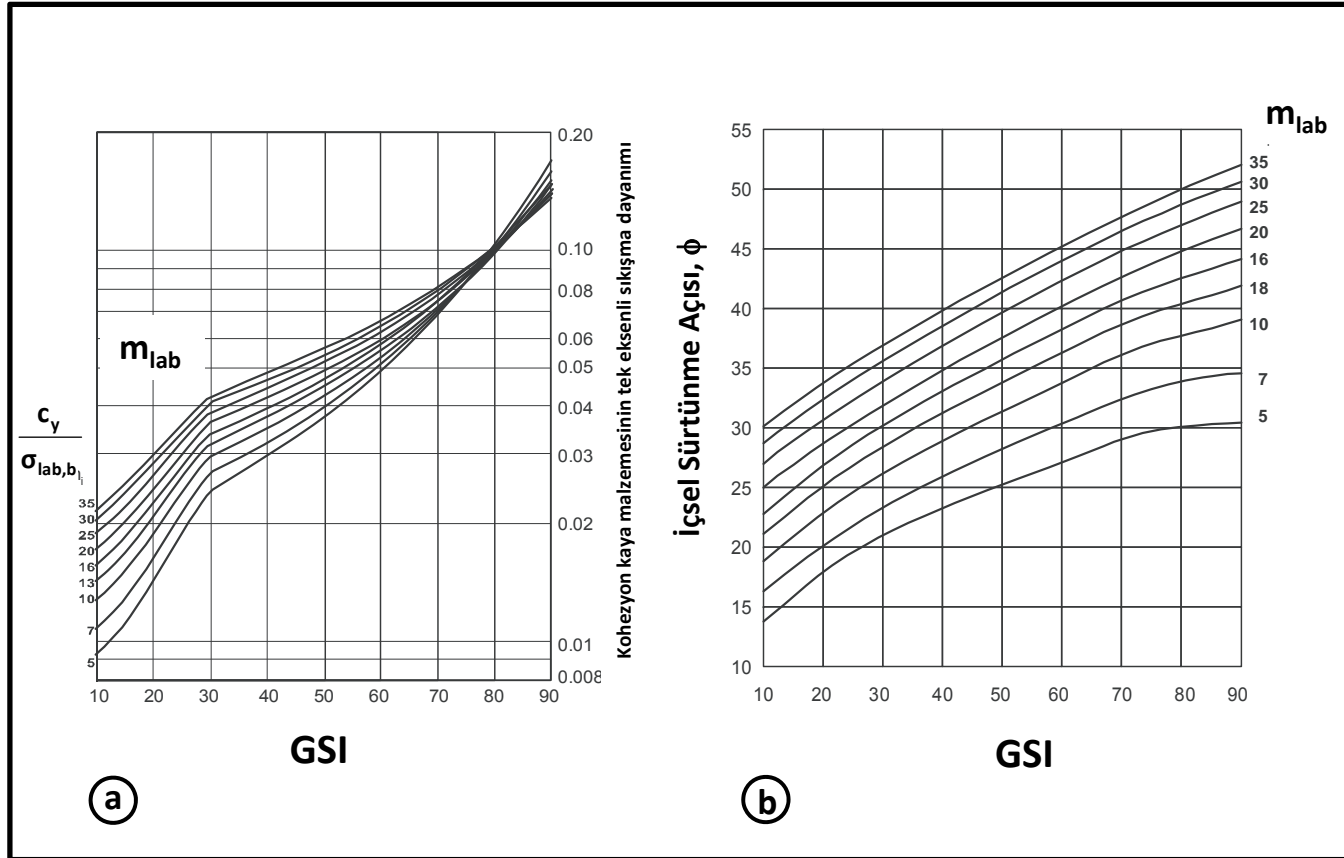
ile bellidir (Bkz Şekil).

Mohr – Coulomb yenilme ölçütünde kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanımı

$$\sigma_{y,b} = \frac{2c_y \cos\phi}{1 - \sin\phi}$$

ile hesaplanabilir (Hoek, 1990). c_y = Kaya kütesinin kohezyonu, ϕ = İçsel sürtünme açısı. Bu büyüklükler verilen jeolojik dayanım GSI için aşağıdaki abaklardan kestirilebilir (Hoek ve Brown, 1997).

Devamıdır...



Şekil – Jeolojik dayanım indeksi, GSI' nin ve m_{lab} sabitinin farklı değerlerine bağlı olarak (a) kohezyon (b) içsel sürtünme açısının değişimleri

Devamıdır...

Kaya kütlesinin elastik modülü Himalaya' da açılan birçok tünelde yerinde ölçü ve geri çözülemeye dayanan bağıntılardan belirlenecektir:

$$E_y = Q^{0,36} \cdot H^{0,2}$$

$$Q < 10 \quad ; \quad H \geq 50 \text{ m} \quad J_w = 1 \quad (\text{Singh, 1997})$$

$$E_y = 10 \left(\frac{Q \cdot \sigma_{lab,b}}{100} \right)^{0,333}$$

$$0,1 < Q < 100 \quad ; \quad \sigma_{lab,b} = 10 - 200 \text{ MPa} \quad (\text{Barton, 2002})$$

Burada:

E_y = Elastik modül, GPa (1 GPa= 1000 MPa)

H= Tünel derinliği, m

(Yukarıdaki bağıntıların kuru koşullar için geçerli olduğu burada unutulmamalıdır).

- **Çözüm:**
- Kaya kütlesine ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi

Devamıdır...

GSI \approx RMR \approx 50 kabulü ile kaya kütleinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı $m_{lab} \approx 15$ için şekillerden sırasıyla

$$\frac{c_y}{\sigma_{lab,b}} \approx 0,046 \quad \rightarrow \quad c_y = 0,046 \cdot \sigma_{lab,b} = 0,046 \times 60 = 2,76 \text{ MPa}$$

ve

$$\phi \approx 35^\circ$$

kestirilebilir. Kaya kütleinin tek eksenli basınç dayanımı ise

$$\sigma_{y,b} = \frac{2c_y \cdot \cos\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{2 \times 2,76 \times \cos 35^\circ}{1 - \sin 35^\circ} \approx 10,6 \text{ MPa}$$

Kaya kütleinin elastik modül ise

GSI = RMR \approx 50 olduğuna göre

$$Q \approx e^{\left(\frac{RMR-44}{9}\right)} = e^{\frac{50-44}{9}} = 1,95 \quad \text{Bieniawski, 1989}$$

$$Q \approx 10^{\left(\frac{RMR-50}{15}\right)} = 10^{\frac{50-50}{15}} = 1 \quad \text{Barton, 1995; 2000}$$

$$\bar{Q} = \frac{1,95 + 1}{2} = 1,48$$

$$E_y = Q^{0,36} \cdot H^{0,2} = (1,48)^{0,36} \cdot (260)^{0,2} = 3,50 \text{ GPa} = 3500 \text{ MPa}$$

$$E_y = 10 \cdot \left(\frac{Q \cdot \sigma_{lab,b}}{100}\right)^{0,333} = 10 \cdot \left(\frac{1,48 \times 60}{100}\right)^{0,333} = 9,6 \text{ GPa} = 9600 \text{ MPa}$$

Devamdır...

Elastik modül kestiriminde diğer iki yaklaşım burada kullanılırsa

$$E_y = 1,5 \cdot Q^{0,6} \cdot E_{lab}^{0,14} \quad (\text{Singh 1997; Singh ve Goel 2006})$$

$$E_{lab} = M \cdot \sigma_{lab,b} = 350 \times 60 = 21000 \text{ MPa} = 21 \text{ GPa}$$

(Modül $M \approx 350$ Kumtaşı için kabul edilebilir).

$$E_y = 1,5 \times (1,48)^{0,6} \times (21)^{0,14} = 2,90 \text{ GPa}$$

$$E_y = \left(\frac{\sigma_{lab,b}}{100} \right)^{0,5} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40} \right)} = \left(\frac{60}{100} \right)^{0,5} \cdot 10^{\left(\frac{50-10}{40} \right)} = 7,74 \text{ GPa} = 7740 \text{ MPa}$$

elde edilmektedir. Dikkat edileceği üzere yaklaşım sonuçları arasında önemli “**farklılıklar**” vardır. bu durumda dört yaklaşıma ait sonuçların aritmetik ortalaması alınarak “farklılık” lar bir ölçüde azaltılabilir.

$$E_y = \frac{3,50 + 9,60 + 2,90 + 7,74}{4} = 5,9 \text{ GPa} \approx 5900 \text{ MPa}$$

- Plastikleşme zonunun oluşmaması için gereken iksa basıncı $P_{i,k}$ hesaplanması

$$K = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{1 + \sin 35^\circ}{1 - \sin 35^\circ} = \frac{1 + 0,573}{1 - 0,573} = 3,68$$

$$P_{i,k} = \frac{2P_0 - \sigma_{y,b}}{1 + K} = \frac{2(\gamma H) - \sigma_{y,b}}{1 + K} = \frac{2 \times 2,65 \times 260 - 1060}{1 + 3,68} = 68 \text{ t/m}^2 \quad (0,68 \text{ MPa})$$

(γ = Kayanın birim hacim ağırlığı)

($\sigma_{y,b}$ =10,6 MPa= 1060 t/m²)

Devamıdır...

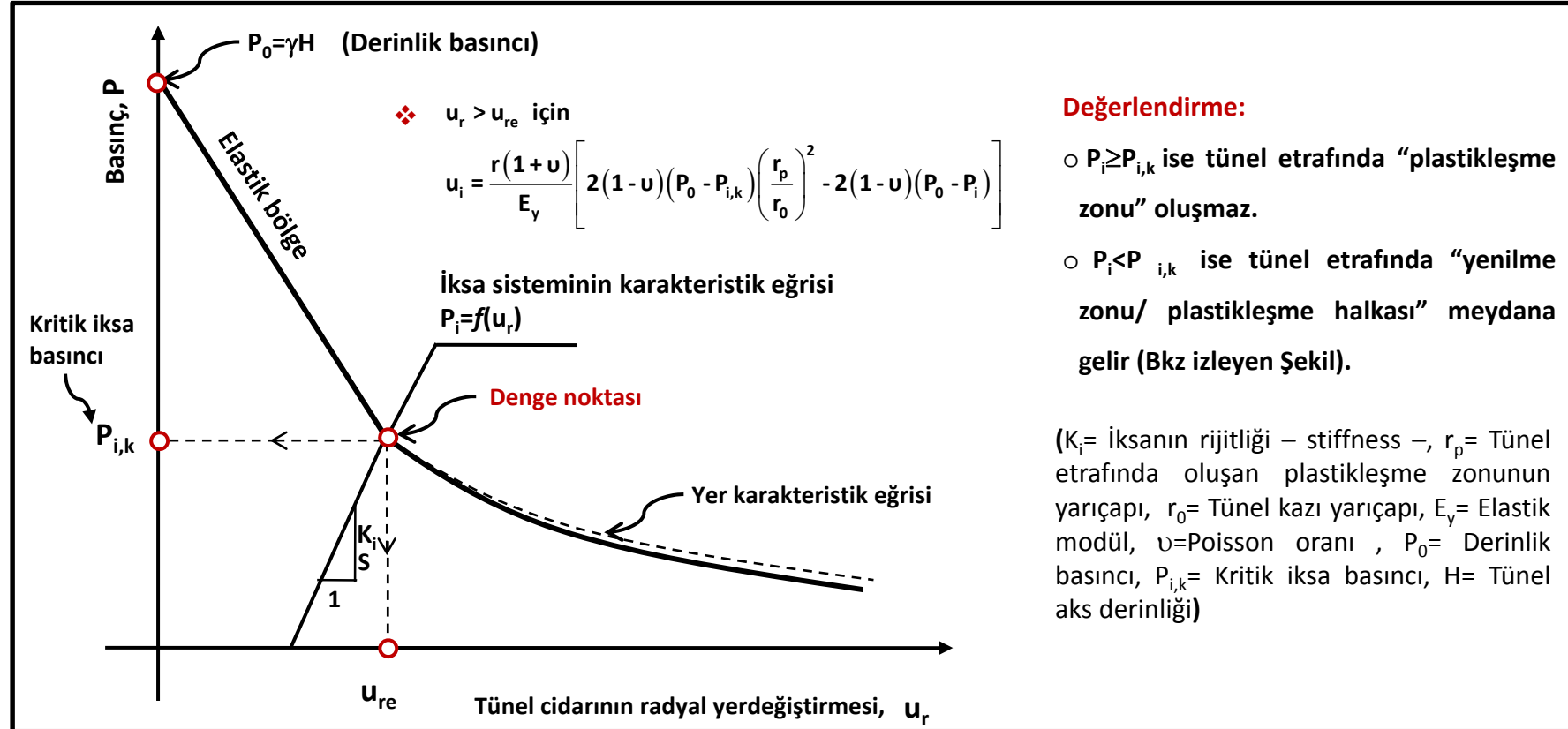
- $P_{i,k} = 68 \text{ t/m}^2$ düzeyinde iksa uygulandığında tünel radyal yerdeğiştirmesinin büyüklüğü

$$P_i = P_{i,k}$$

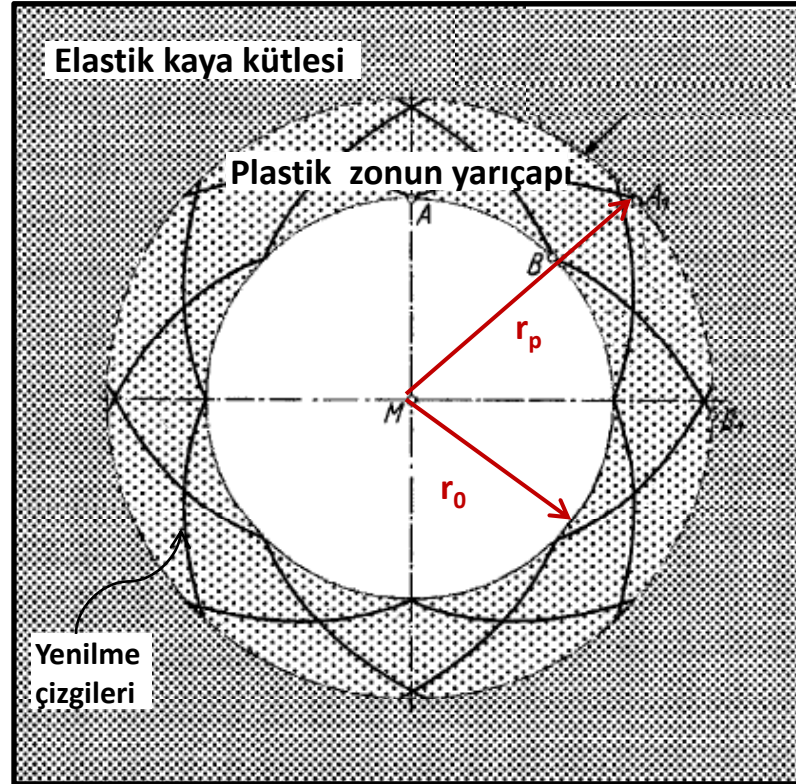
$$u_{re} = \frac{D(1+\nu)}{2E_y} (P_0 - P_{i,k}) = \frac{8(1+0,20)}{2 \times 590000} (2,65 \times 260 - 68) = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

(D= Tünel kazı çapı, ν = Poisson oranı, P_0 = Derinlik basıncı, E_y = Kaya kütleinin elastik modülü) (Bkz Şekil).

$$\frac{u_{re}}{0,5D} \times 100 = \frac{5,05 \times 10^{-3}}{0,5 \times 8} \times 100 = \%0,126$$



Şekil – Yer ve iksa sisteminin karakteristik eğrileri ve denge noktası



Şekil – Hidrostatik ($k=\sigma_y/\sigma_x=1$) gerilme durumunda dairesel kesitli tünellerde plastikleşme zonu (r_0 = Tünel kazı yarıçapı, r_p = Tünel etrafında oluşan plastikleşme zonunun yarıçapı)

Kaynak: Castel 1967' den alıntılan Brandl ?

Devamıdır...

Değerlendirme:

- Teorik olarak hidrostatik gerilme altındaki dairesel kesitli tünelin cidarının radyal yerdeğiştirmesi
 - Derinlik basıncına
 - Tünel kazı çapına
 - Geçilen formasyonun yerinde tek eksenli basınç dayanımına, elastik modül değerine ve içsel sürtünme açısına
 - Kazı işleminde kullanılan iksa – destek – sisteminin çalışma basıncına bağlıdır.
- İksa basıncını yerinde düzenlemek suretiyle tünel radyal yerdeğiştirmesi denetlenebilir. Radyal yerdeğiştirmenin kontrollü şekilde arttırılmasıyla ekonomik iksa – küçük kesit boyutları – sağlanabilir. Bu ise kazı bölgesinde yerdeğiştirmelerin özenli biçimde ölçülmesiyle mümkündür.

❖ KİLDE AÇILAN TÜNELDE ARIN BASINCININ ve HACİM KAYBININ BELİRLENMESİ

- Veriler

Örtü derinliği $H = 9$ m olan bir tünel ($D = 6,8$ m), killi bir formasyonda açılacaktır. Kilin ortalama satüre birim hacim ağırlığı $\gamma = 1,9$ t/m³ ve drenajsız kayma dayanımı^(*) – kohezyon – $c_u = 1,25$ kgf/cm² dir. trafik yükü $P_{ek} = 1$ t/m² alınacaktır.

- Zemin çevresinde drenajsız olmaması durumunda tünel stabilitesini sağlamak için gerekli “arın basıncı” nı ve tünel çevresinde oluşacak “hacim kaybı” nı belirleyiniz.

- **Çözüm:**

- Genel

Probleme stabilite sayısı kavramı ile yaklaşım yapılırsa

$$N = \frac{P_{ek} + \gamma \cdot \left(H + \frac{D}{2} \right) - P_i}{c_u}, \quad (\text{Broms ve Bennermark, 1967'den alıntılanan Ng et al 2004})$$

İksa basıncı P_i verilen stabilite sayısı N için bulunabilir. Stabilite sayısı $N = 1 \sim 2$ ise tünel kazı arını çevresindeki zemin “**elastik**” rejimdedir. $2 < N < 4$ aralığında ise “**sınırlı akma**”, $4 < N < 6$ da ise “**plastik akma**” sözkonusudur. Genelde $N > 6$ durumunda tünel arınında çok ciddi stabilite sorunları gözlenmektedir.

(*) Genellikle killerin drenajsız kohezyon değeri “ c_u ” derinlikle artmaktadır. ($c_u \approx 0,22 \sigma'_z$ ($\sigma'_z =$ Efektif düşey basınç) (Mesri, 1975). Bu problemde daha emniyetli kalmak üzere sadece ortalama değeri alınmıştır.

Devamıdır...

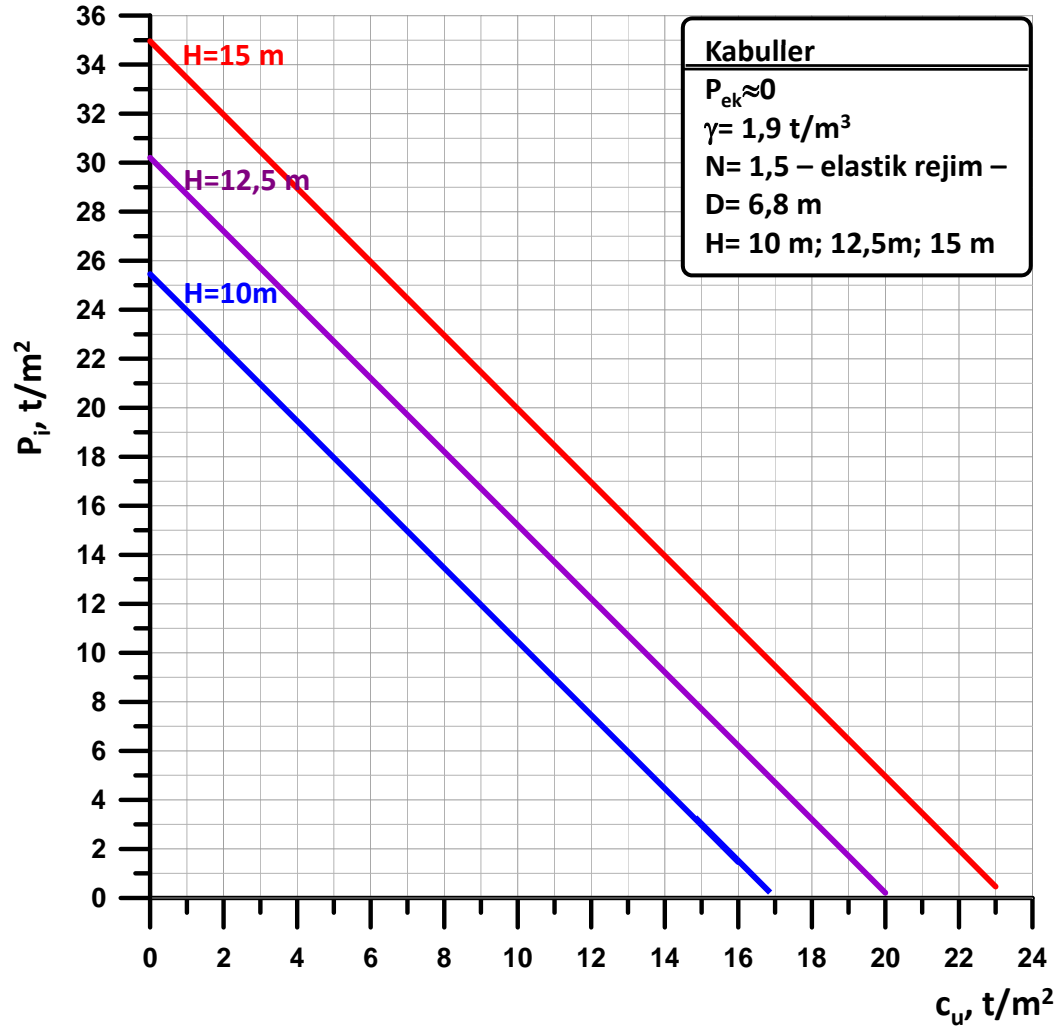
$$P_i = P_{ek} + \gamma \left(H + \frac{D}{2} \right) - Nc_u \quad (\text{Bkz Şekil})$$

Eğer tünelin üzerinde yoğun şekilde binalar bulunuyorsa, stabilite sayısı $N= 1 \sim 2$ aralığında seçilmelidir. Kaya tünellerinde cidara deformasyon izni verilmesiyle azalan “arın basıncı” zemin tünelleri için de geçerli olduğu hemen fark edilmektedir. $N= 1,5$ kabulü ile gerekli arın basıncı

$$P_i = 1 + 1,9 \left(9 + \frac{6,8}{2} \right) - 1,5 \times 12,5 \approx 5,8 \text{t/m}^2$$

düzeyinde olmalıdır.

Devamıdır...



Şekil – Sature killer için $P_i=f(H, c_u)$ değişimleri ($c_u=f(H)$ değişimi burada sabit alınmıştır)

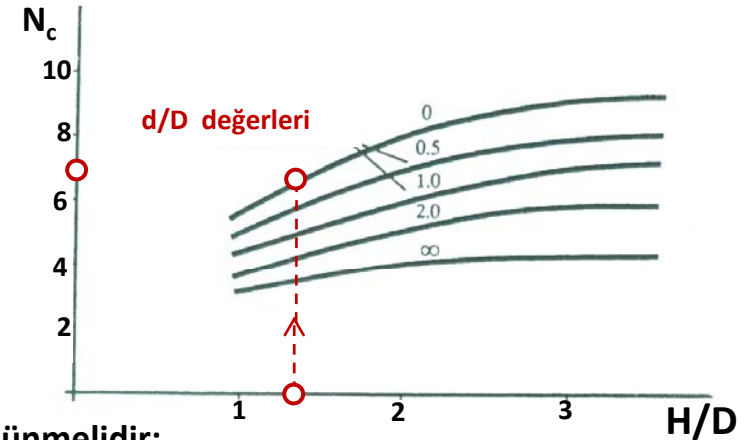
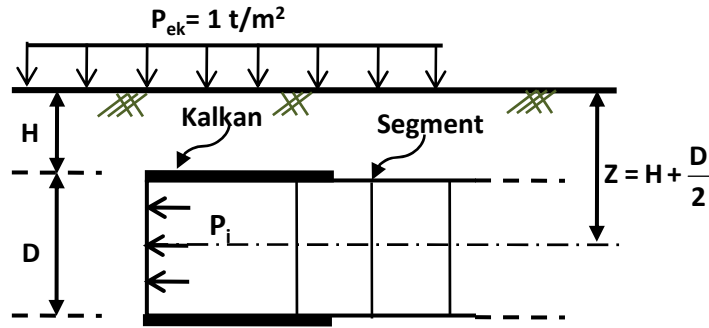
H=10 m için tünelin geçtiği formasyonun drenajsız kayma kohezyon değeri yaklaşık 17 t/m² ise arın basıncı $P_i=0$ olmaktadır. Bu ise, tünel arının kapalı moddan açık moda çalıştırılması anlamına gelmektedir. Drenajsız koşullarda sature kilin tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_b=2c_u$ olmaktadır.

Devamıdır...

Santrifüj deneylerin değerlendirilmesi sonucunda kilde açılan dairesel kesitli tünelin çökme modundaki arın basıncı – iksa basıncı –

$$P_i \geq P_{ek} + \gamma \left(H + \frac{D}{2} \right) - N_c \cdot c_u \quad , \text{Atkinson ve Mair, 1981' den alıntılan Milligan, Rogers, 2001, s. 574}$$

ile tanımlanmaktadır^(*). Aynı kaynakta tünel göçme modundaki stabilite sayısı, $N_c = f(\text{iksa ile arın arasındaki mesafesi, } d, \text{ örtü kalınlığı/tünel çapı, } H/D)$ ile verilmiştir (Bkz Şekil).



Yerüstü çökmelerini önlemek için c_u değeri güvenlik katsayısına bölünmelidir:

$$P_i = P_{ek} + \gamma \left(H + \frac{D}{2} \right) - N_c \left(\frac{c_u}{GK} \right)$$

^(*) Özellikle sığ tünellerde arına uygulanan basınç örtü tabakasında herhangi bir "kabarma" ya neden olmaması için

$$P_i \leq P_{ek} + \gamma \left(H + \frac{D}{2} \right) + N_c c_u$$

olmalıdır.

Devamıdır...

Kalkanlı makine ile kazı yapıldığından dolayı $d=0$ kabulü yapılabilir (*Eğer klasik madencilik yöntemi ile kazı yapılıyorsa, arkadaki iksa ile arın arasındaki geometrik mesafe d uygun bir şekilde değerlendirilmelidir*) ve

$H/D=(9/6,8)=1,32$ oranına karşı gelen $N_c= 7'$ dir. Problem verileri göz önünde tutulduğunda güvenlik katsayısı

GK= 2 için arın basıncı

$$P_i \geq 1 + 1,9 \left(9 + \frac{6,8}{2} \right) - \frac{7 \cdot 12,5}{2}$$

$$P_i \geq -19,19 \text{ t/m}^2$$

' dir.

$P_i < 0$ olması stabilite açısından arında herhangi bir **basınç uygulamasına gerek olmadığını** göstermektedir.

(Arın önündeki basınç da tünel makinesinin türüne göre basınçlı hava, kazılan malzemesin arında desteklenmesi

veya bentonitli bulamaç karışımı ile sağlanabilir).

Devamıdır...

Yukarıdaki yaklaşımlar “**drenajsız**” durum için geçerlidir. Eğer, ortamın permeabilitesi $\geq (10^{-7} - 10^{-6})$ m/sn ve tünel net ilerleme hızı $\leq 0,1 - 1,0$ m/saat ise ortam “**drenajlı**” olarak alınmalıdır. Özellikle kil içinde kumlu mercceklerin bulunması da ortamın permeabilitesini önemli ölçüde arttırdığı unutulmamalıdır. Sonlu eleman çözümlerinin sonuçlarına göre “**drenajlı**” durumda ($\phi' > 20^\circ$ ve $d/D < 0,5$) arın basıncı

$$P_i = \gamma D \left(\frac{2 + 3 \frac{d}{D}}{18 \text{tg} \phi'} - 0,05 \right) - \frac{c'}{\text{tg} \phi'} \quad , \quad (\text{Vermeer, Ruse ve Marcher, 2002})$$

olarak verilmektedir. (d = İksanın tünel arınına olan uzaklığı. Makineli kazıda $d=0$ alınabilir. ϕ' = Drenajlı içsel sürtünme açısı, c' = Drenajlı kohezyon).

En uç çalışma koşulu ($c' \rightarrow 0$, $\phi' \approx 22^\circ$ ve $d/D=0,1$ durumunda) için arın basıncı yukarıdaki formülden problem verileri için $P_i = 3,44$ t/m² olarak hesaplanabilir.

Açık tünel modunda ($P_i=0$) maksimum tünel kazı çapı – $P_i < 0$ koşulu için –aşağıdaki ifade ile belirlenebilir:

$$D \leq \frac{9c'}{\gamma} \frac{1}{1 - 0,45 \text{tg} \phi'} \quad , \quad (\text{Vermeer, Ruse ve Marcher, 2002}).$$

Eğer kazı çapı bu ifadeden tanımlanan çaptan büyük ise tünel arını “kapalı” modda çalıştırılmalıdır. Eğer kazı madencilik yöntemleri ile yapılıyor ise arın basıncı belirli et kalınlığında püskürtme beton veya püskürtme beton + yatay şekilde zemin içine yerleştirilen arın çivileri ile sağlanabilir.

Devamıdır...

- Hacimsel zemin kaybı:

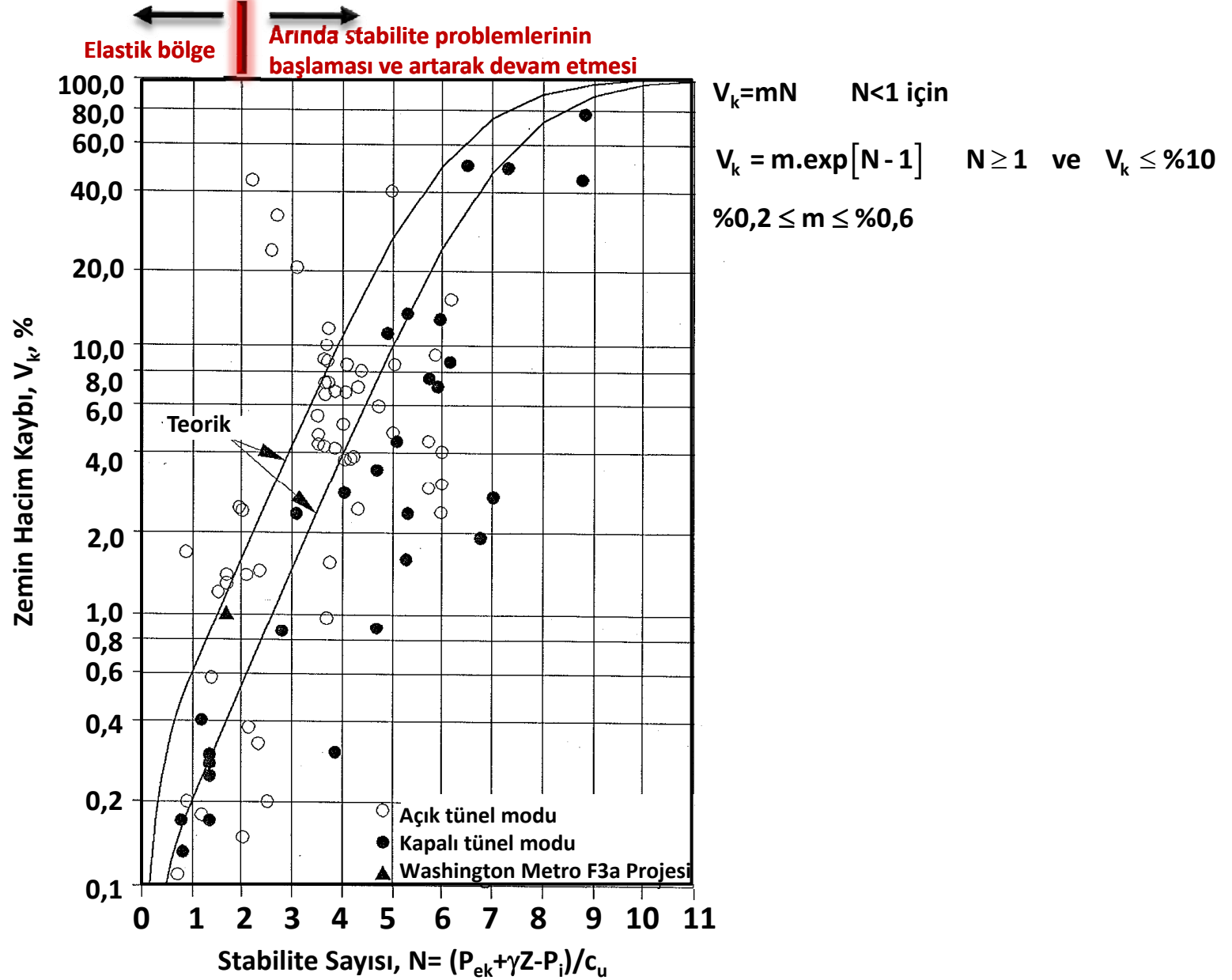
Anılan büyük “ V_k ”

$$V_k = \frac{V_t}{V} \times 100$$

olarak tanımlanabilir. V_t = Birim uzunluk için tünel yerüstü tasman eğrisinin tanımladığı hacim, V = Tünel kazı hacmi, dairesel kesitli tünel için $V = \frac{\pi D^2}{4} \times 1 = 0,785D^2$ ' dir.

Bu oranın büyük değer alması tünel kazı faaliyetinden sonuçlanan “**yerüstü tasman hareketi**” nin büyük olması demektir. Özellikle sığ tünellerde bina deformasyonları açısından zemin kayıp oranının “ V_k ” elverdiği ölçüde küçük olması istenir (Arioğlu, Ergin, 1992, 1993). Şekilde V_k değerinin tünel makine türüne ve stabilite sayısı ile değişimleri verilmiştir (Leca, 1989). Açıkta ki artan stabilite sayısı ile “ N ” daha değişik deyişle artan stabilite sorunlarıyla birlikte zemin kayıp oranı da artmaktadır. $1 < N < 2$ aralığında $V_k = f(N)$ ilişkisi doğrusaldır. Problem kabulünde $N = 1,5$ alınmıştır. Bu değere karşı gelen hacim kayıp yüzdeleri $V_k = \%0,3 - \%0,8$ aralığında yer almaktadır. Geçerken ifade edilmesi burada ilginç olacaktır. Örneğin $N = 6$ – ciddi arın stabilite sorunları mevcut – için $V_k = \%25 - \%50$ değeri elde edilmektedir.

Devamıdır...



Şekil – Kilerde $V_k = f(N)$ değişimleri
Kaynak: Leca, 1989

Devamıdır...

Kalkanlı tünel makineleri ile killerde açılan tünellerde oluşan hacim kayıp oranı

$$V_k = \frac{c_u}{E_u} \exp \frac{\gamma Z - P_i}{2c_u} , \quad (\text{Peck, 1969; Schmidt, 1974})$$

ile verilmektedir. E_u = Drenajsız elastik modül. Killerde $E_u = (200 - 700)c_u$ olarak alınabilir (Mitchell, 1983). Verilen ifadeden görüleceği gibi artan arın basıncı, P_i ile zemin kayıp oranı, V_k azalmaktadır. Burada $E_u = 450c_u$ alınmıştır.

Problem verileri ve sonuçlar dikkate alındığında $P_i = 5,8 \text{ t/m}^2$ için

$$V_k = \frac{12,5}{450 \times 12,5} \exp \frac{1,9 \times 12,4 - 5,8}{2 \times 12,5} = 0,0045 \quad (\%0,45)$$

bulunur.