

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**  
**TÜNEL DERSİ**

**3. Bölüm**

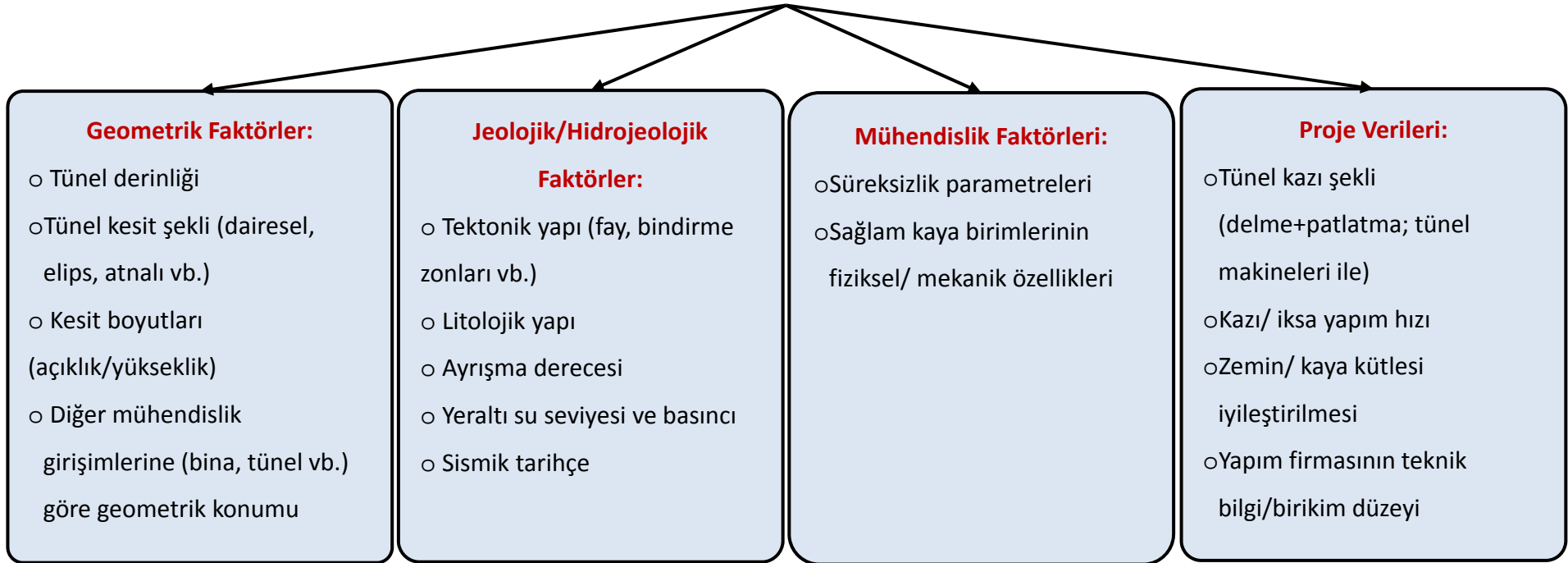
**(Kemerlenme olgusu, Tünel stabilite analizleri, Cidar  
yerdeğiştirme – iksa basınç karakteristikleri)**

**Prof. Dr. Müh. Ergin ARIOĞLU**

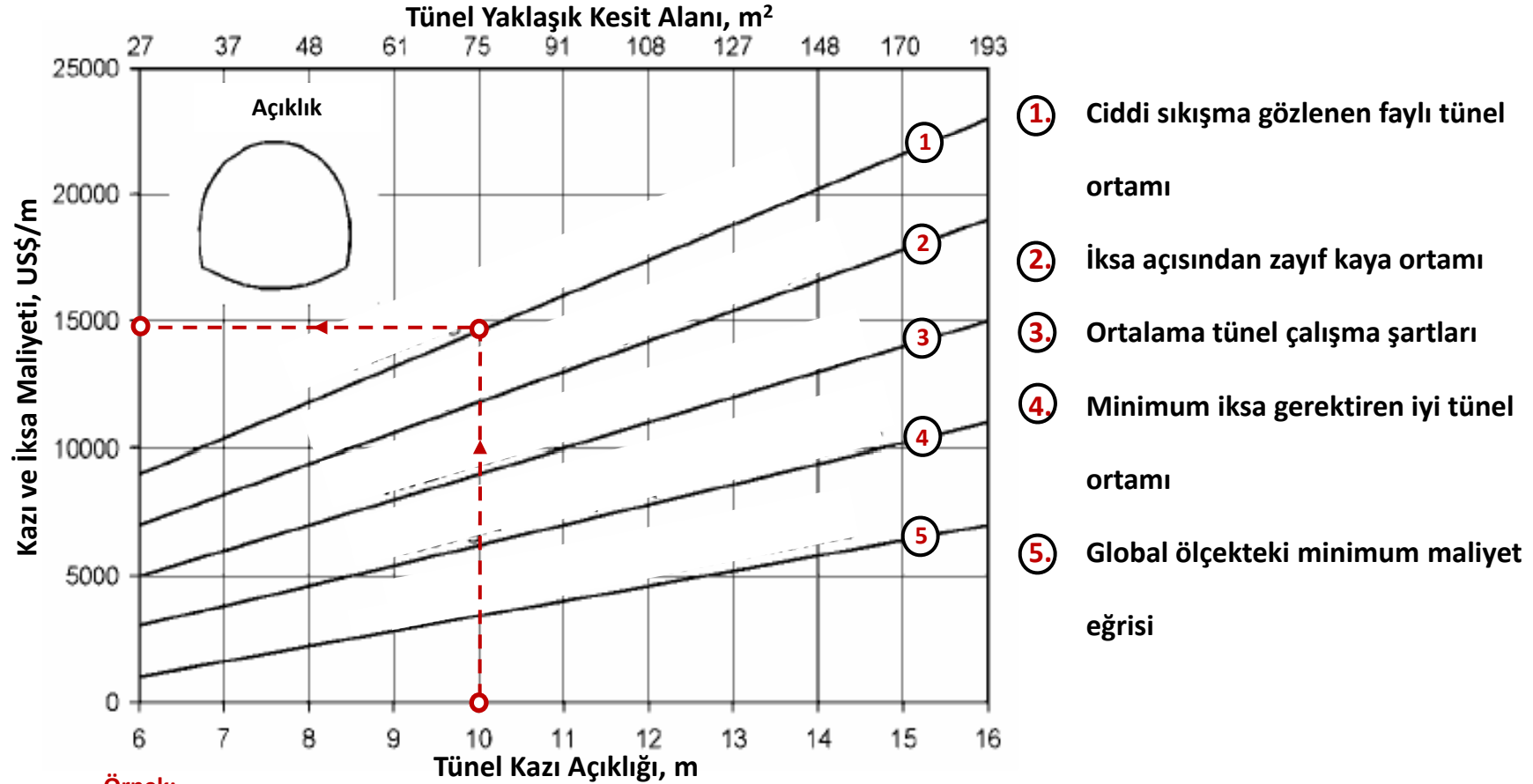
**Yapı Merkezi AR&GE Bölümü**

**2009**

## ❖ Tünel Stabilesine Etki Eden Temel Faktörler



## ❖ Tünel Kaya Kütle Ortamına Göre (Kazı + İksa) Giderinin Yaklaşık Kestirilmesi



### Örnek:

**Veriler:** Tünel kazı açıklığı 10 m; tünelin bir bölümü faylı zondan geçecektir.

**Çözüm:** Verilen şartlar için 1 m tünelin kazı + iksa masrafı yaklaşık 15.000 \$/m düzeyinde olmaktadır.

Bu maliyet 1999 US\$ cinsindedir. 2009' a göre maliyet değeri ise

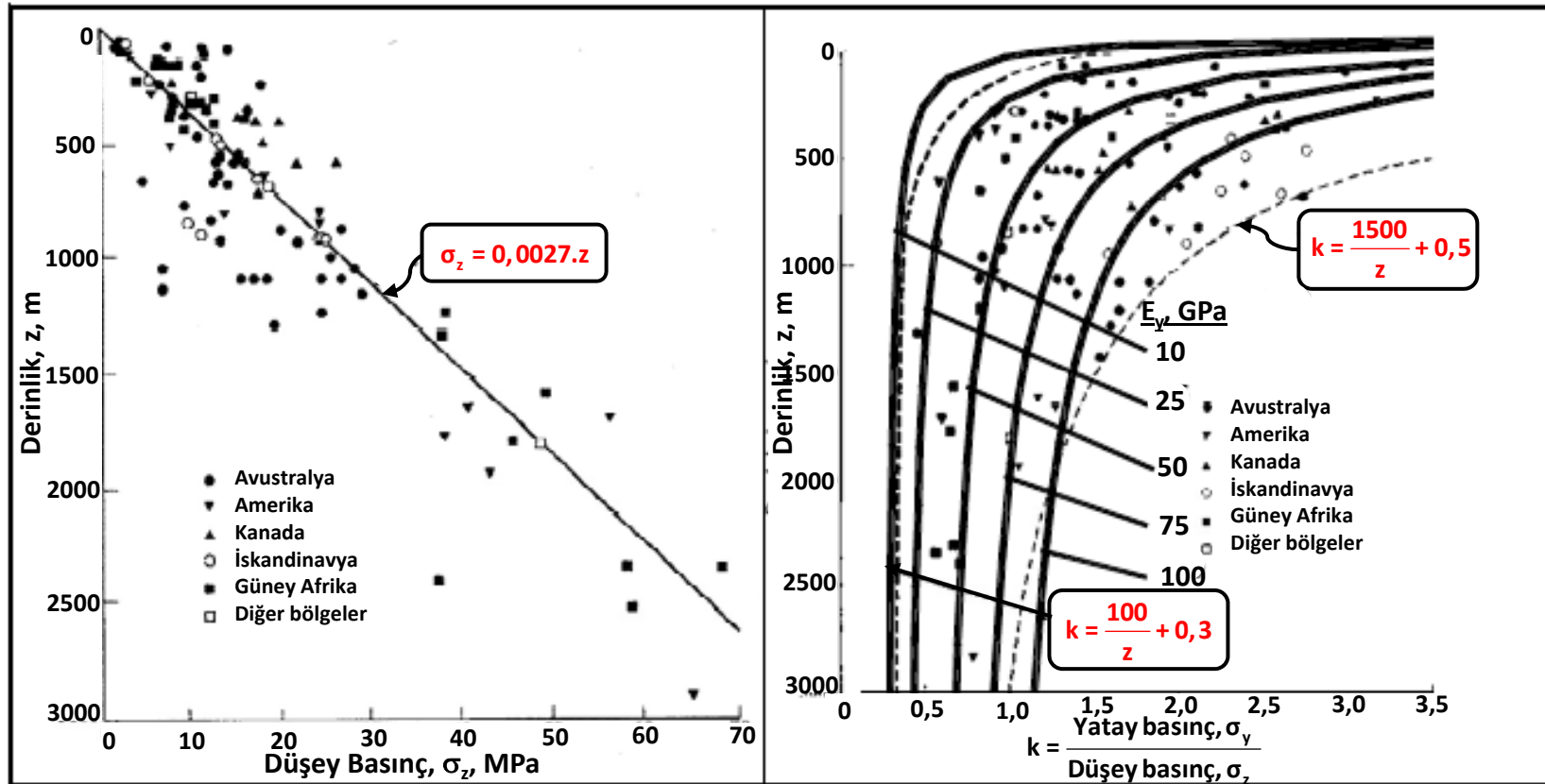
$$P_t = P_a (1 + i)^n = 15000 \cdot (1 + 0,04)^{10} \approx 22000 \text{ \$/m}$$

i= Faiz oranı, n= Geçen süre

## ❖ Düşey ve Yatay Derinlik Basınçları:

- $\sigma_y = k \times \sigma_z$  ,  $k = 1$  hidrostatik basınç durumu
- $\left[ \frac{100}{z} + 0,3 \right] < k = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} < \left[ \frac{1500}{z} + 0,5 \right]$  , (Hoek, Marinos, 2000)
- $k = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} = 0,25 + 7 \times E_v \times \left( 0,001 + \frac{1}{z} \right)$  , (Shorey, 1994)

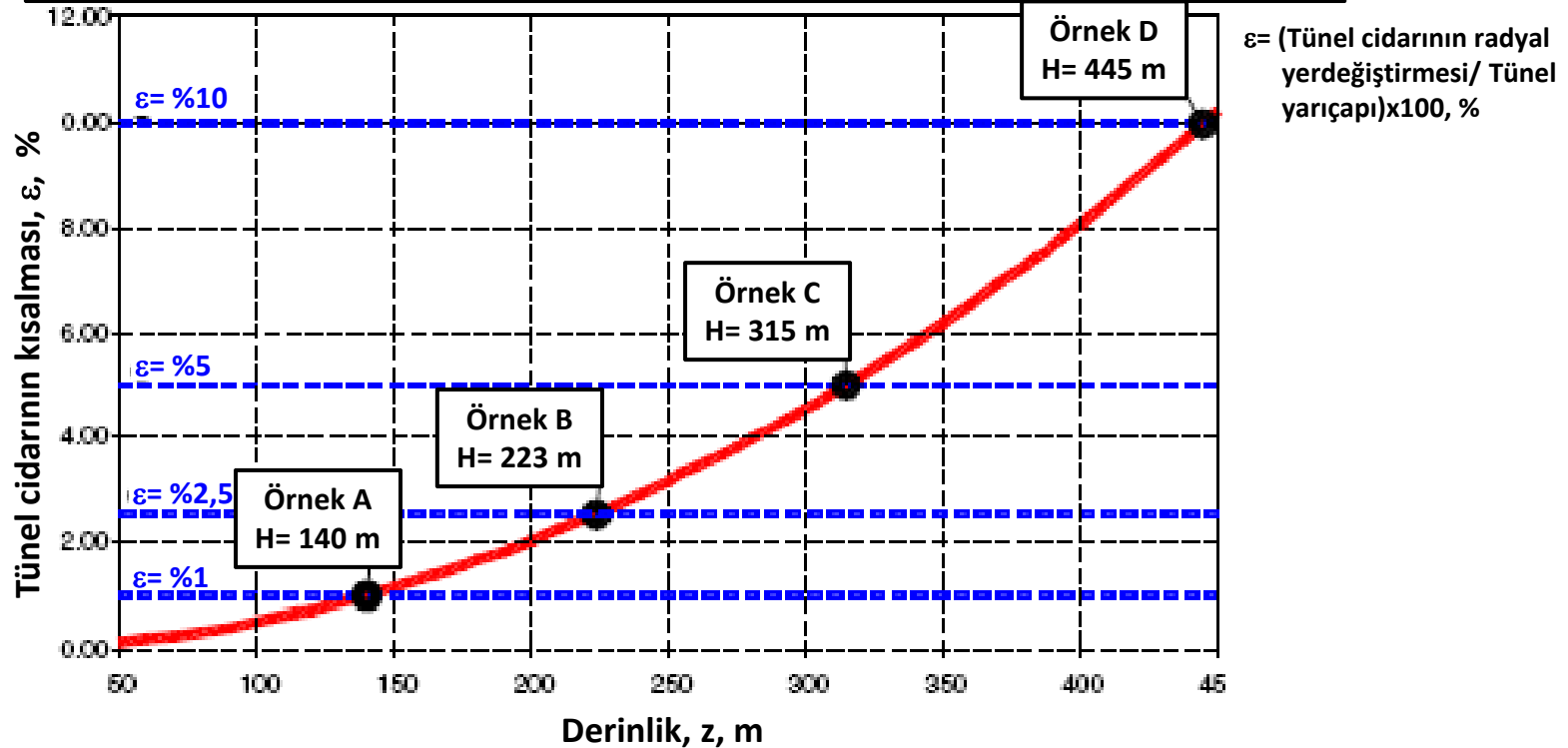
$E_v$  = Kaya kütleinin yatay yönde ölçülmüş elastik modülü, GPa



❖ Derinliğin ve  $k$ =Yatay basınç/ Düşey basınç oranının, Tünel Cıdarı Birim Kısalmasına Olan Etkisi (GSI= 30, iksa basıncı  $p_i=0$ )

❖ Geoteknik büyüklükler:

- Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı:  $\sigma_{lab} = 20$  MPa
- Poisson Oranı:  $\nu=0,3$
- Hoek – Brown malzeme sabitesi:  $m_i = 8$
- Dilatasyon açısı:  $\psi=0$
- Jeolojik dayanım indeksi: GSI= 30 (Çok zayıf kaya kütlesi)
- İçsel sürtünme açısı:  $\phi = 24^\circ$
- Kaya kütlesinin basınç dayanımı:  $\sigma_{v,b} = 1,7$  MPa
- Kohezyon:  $c = 0,55$  MPa
- Kaya kütlesinin elastik modül:  $E_m = 1400$  MPa



Kaynak: Antiga, Coppola, 2008, [http://www.sintic-ingegneria.it/Antiga\\_Coppola-WTC2008.pdf](http://www.sintic-ingegneria.it/Antiga_Coppola-WTC2008.pdf)

Devamıdır...

❖ Derinliğin ve Gerilme Oranının Dairesel Kesitli Tünel Konverjansı,  $\delta$  Üzerindeki Etkisi:

Tünel Derinliği, m	k=0,5	k=0,75	k=1, Hidrostatik basınç durumu	k=1,5	k=2
A – 140	0,81	0,85	1	2,09	3,94
B – 223	0,78	0,84	1	2,26	4,06
C – 315	0,78	0,83	1	2,14	3,69
D – 445	0,81	0,83	1	1,94	$\infty$
Ortalama	0,79	0,84	1	2,11	3,90

$$\Delta = \frac{\delta_{\text{mak}}}{\delta_{\text{teo}}}$$

k= Yatay gerilme/ Düşey gerilme oranı,  $k = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$

$\delta_{\text{mak}}$ = Verilen derinlik ve k gerilme oranı için maksimum konverjans miktarı (burada iksa basıncı  $p_i=0$  alınmıştır).

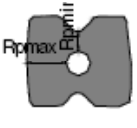
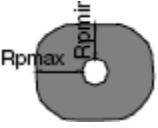

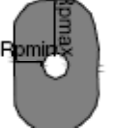

$\delta_{\text{teo}}$ = Verilen derinlik ve k=1 için galeri cidarındaki konverjans miktarı (Burada iksa basıncı  $p_i=0$  alınmıştır).

Konverjans,  $\delta$ = (Tünel cidarındaki toplam radyal yerdeğiştirme miktarı/ Kazı çapı) oranı

**Değerlendirme:**

- **k<1** olma durumunda konverjans miktarı, hidrostatik gerilme koşullarındaki konverjansın yaklaşık %80 mertebesinde. Bu oran derinlik etkisinden bağımsızdır.
- **k>1** gerilme koşullarında ise incelenen  $\Delta$  oranı derinlikten bağımsız olarak 2 ile 3,9 arasında değişmektedir.

❖ Derinliğin ve Gerilme Oranının Tünel Kazı Çevresinde Oluşan Plastikleşme Yarıçapına,  $R_p$  Etkisi

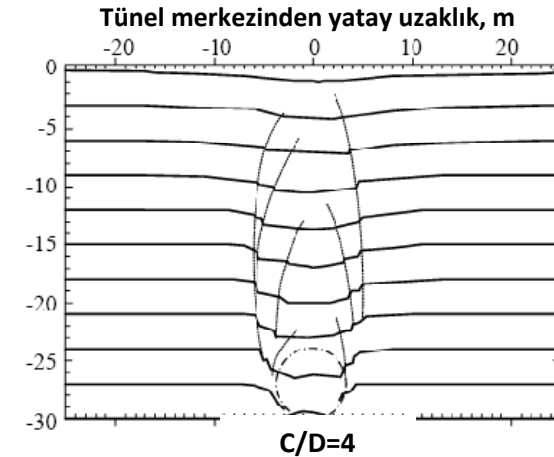
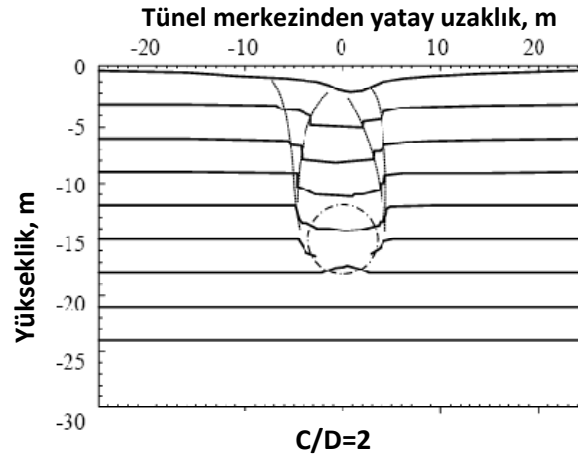
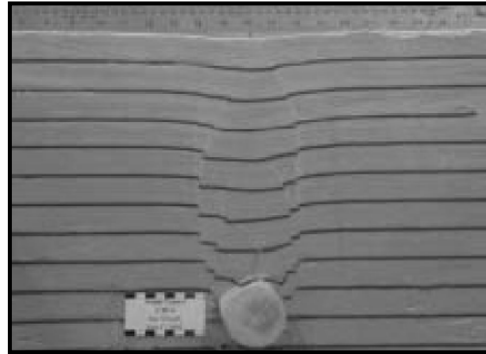
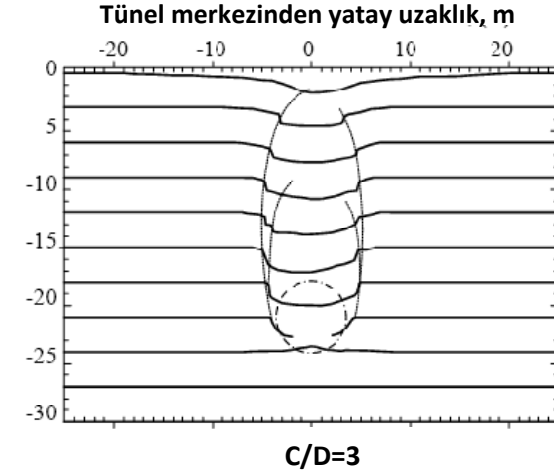
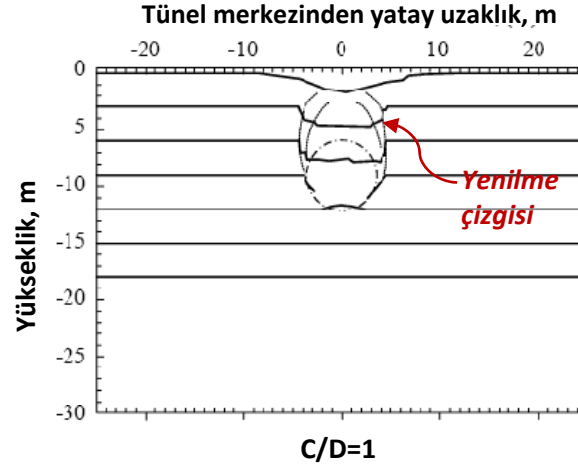
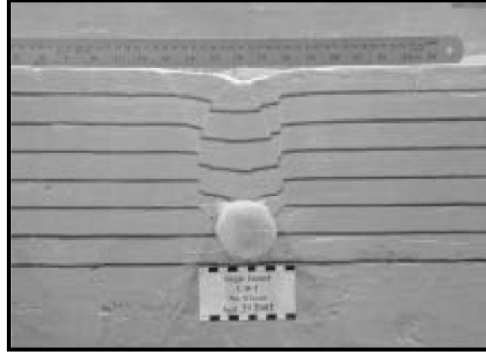
$\Delta R_p = \frac{\Delta R_p, k \neq 1}{\Delta R_p, k = 1}$		$k=0,5$	$k=0,75$	Hidrostatik basınç durumu $k=1$	$k=1,5$	$k=2$
						
A	$\Delta R_{p_{min}}$	0,45	0,70	1,00	0,79	1,06
	$\Delta R_{p_{mak}}$	1,11	1,04		1,47	3,79
B	$\Delta R_{p_{min}}$	0,42	0,66	1,00	0,85	1,11
	$\Delta R_{p_{mak}}$	1,11	1,04		1,47	4,97
C	$\Delta R_{p_{min}}$	0,44	0,67	1,00	0,87	1,08
	$\Delta R_{p_{mak}}$	1,16	1,07		1,57	6,27
D	$\Delta R_{p_{min}}$	0,44	0,65	1,00	0,86	$\infty$
	$\Delta R_{p_{mak}}$	1,17	1,08		1,50	

$R_p$ = Tünel kazı çevresinde oluşan plastikleşme – yenilme – yarıçapı,  $R_{p_{mak}}$ ;  $R_{p_{min}}$ = Sırasıyla maksimum ve minimum plastikleşme yarıçapı

**Değerlendirme:**

- $k=1$  Hidrostatik basınç durumunda, tüm derinliklerde tünelin etrafında oluşan plastikleşme – yenilme – zonunun enkesiti daireseldir.
- $k < 1$  gerilme durumunda ise hidrostatik basınç durumuna göre özellikle minimum yarıçaplarda göreceli olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Buna karşın, maksimum plastikleşme yarıçaplarında ise sözkonusu fark daha azalmaktadır.
- $k > 1$  gerilme durumunda ise özellikle  $R_{p_{mak}}$  değerleri hidrostatik basınç durumundaki plastikleşme yarıçapına göre artan tünel derinliği ile birlikte büyük ölçüde artmaktadır.

❖ Sature kumlu zemin/ Çok çatlaklı ayrışmış kaya kütlelerinde tünel etrafında gözlenen yenilme:



- C= Örtü tabakasının kalınlığı
- D= Tünel çapı
- İçsel sürtünme açısı: 38
- Deney sistemine uygulanan merkezkaç kuvvetinin şiddeti: 100g

- Kullanılan kum: Kuvars kumu, ortalama dane çapı:  $D_{50} = 0,18$  mm
- Oldukça üniform tane dağılımına sahip kum
- Rölatif sıklık: %68

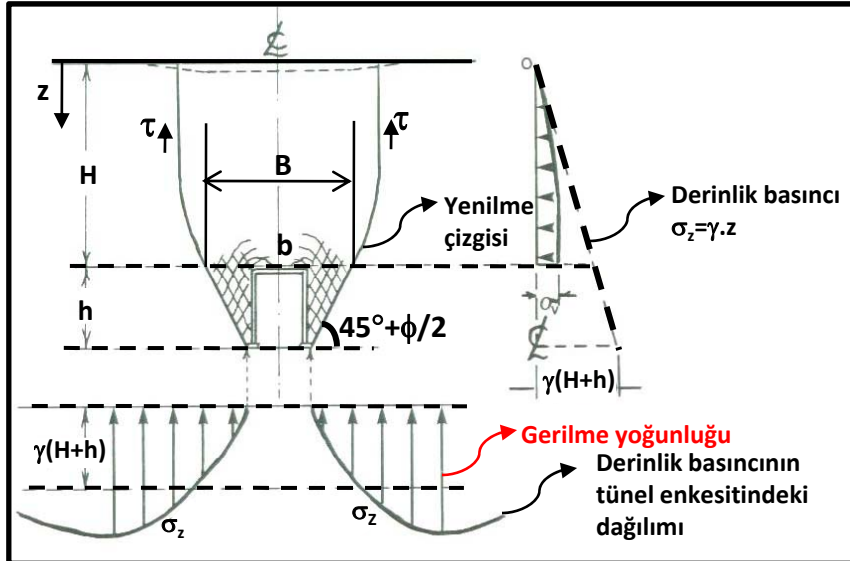


## ❖ Kemerlenme Teorisi

- Genel

Maden ve İnşaat Mühendisliğinde açılan galeri/ tünellerden gözlemlenen fiziksel bir gerçeğe göre, tünel iksasına etki eden basıncın “ $P_i$ ” büyüklüğü derinlik basıncı olarak tanımlanan  $\sigma_z = \gamma \cdot H$ ’ den daima küçüktür. Daha açık deyişle  $\left( \frac{P_i}{\sigma_z} = \frac{P_i}{\gamma H} < 1 \right)$ ’ dir. Bu olgu göçme mekanizması ile tanımlanan hacmin cidarlarında oluşan kayma gerilmelerinin,  $\tau$  varlığından kaynaklanır. Bu olaya “**kemerlenme**” denilir. Kemerlenme olgusunu sağlam fiziksel esaslara oturtarak statik model ile ilk defa açıklayan Rus Maden Mühendisi Prof. M.M. Protodiakonov 1925’ dir. Batı literatüründe ise Prof. K. Terzaghi 1943, 1951’ dir. Dünya ölçeğinde en kapsamlı tünel kitabının yazarı Prof. Széchy 1967, sayfa 204’ de iki yaklaşımın arasındaki kuvvetli benzerliği işaret edilmiştir. Kemerleme sonucunda tünel tavanında “basınç ferahlaması” oluşurken, yan cidarlarda ise “gerilme yoğunlukları” gözlenir. Gerilme yoğunluğunun büyüklüğü daima derinlik basıncından,  $\sigma_z$  daha büyüktür.

- Terzaghi Yaklaşımı:



Devamıdır...

- Kaya Kütleli/ Kohezif Zemin İçinde Açılan Tünellerde Tavan Basıncı:

$$p_i = \frac{B \cdot \left( \gamma - \frac{2c}{B} \right)}{2K \tan \phi} \left( 1 - e^{-K \tan \phi \frac{2H}{B}} \right) + q e^{-K \tan \phi \frac{2H}{B}}$$

B= Kemerlenme genişliği – açıklığı –

$$B = 2 \left[ \frac{b}{2} + h \tan \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

b= Tünel kazı açıklığı

h= Tünel kazı kesitinin yüksekliği

$\gamma$ = Kaya/ zemin' in yoğunluğu

$\phi$ = Geçilen kaya kütleinin/ zeminin içsel sürtünme açısı

c= Geçilen kaya kütleinin/ zeminin kohezyon değeri

$K = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$  . Genellikle K= 1 alınmaktadır.

$\sigma_y, \sigma_z$ = Sırasıyla yatay ve derinlik – düşey – basıncın büyüklükleri

H= Tünel derinliği

q= Yeryüzündeki surşarj yüklemesi (trafik, bina temelleri, diğer mühendislik girişimlerinden aktarılan basınçlar)

Devamıdır...

Örneğin, çok ayrışmış kaya kütlelerinde açılan derin bir tünelin tavanına etki eden iksa basıncı

$$p_i = \frac{\gamma B}{2 \operatorname{tg} \phi} = \frac{\gamma \left[ b + 2h \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \right]}{2 \operatorname{tg} \phi} ; \quad (c \approx 0 \text{ ve } K = 1 \text{ için geçerlidir}).$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki formülden açıktır ki iksa – tavan – basıncı

- o Artan açıklık boyutlarıyla artar.
- o Azalan içsel sürtünme açısıyla da artmaktadır.

**Örnek:**

- o Tünel kazı çapı:  $D = 6,8 \text{ m}$
- o Çamurtaşı/ silttaşı içsel sürtünme açısı:  $\phi \approx 25^\circ$

İksa basıncı istenmektedir.

**Çözüm:**

Eşdeğer kazı kesiti  $F_e$  kavramından hareketle kare kesitli açıklık boyutu tünel çapı  $D$  cinsinden şöyle yazılabilir:

$$b = h$$

$$F_e = b^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$b = 0,88 \cdot D = 0,88 \times 6,8 = 6 \text{ m}$$

*Devamıdır...*

Tavan basıncı:

$$p_i = \frac{2,6 \left[ 6 + 2 \times 6 \tan \left( 45^\circ - \frac{25}{2} \right) \right]}{2 \tan 25} = 38 \text{ t/m}^2$$

olarak bulunur.

Bu değer başka bir yaklaşım ile tahkik edilmelidir.

Arıoğlu, Ergin, 1992 ve 1995' e göre

$$p_i = \left[ 2,81 \cdot \exp(-0,0281 \cdot RQD) \right] \gamma \cdot D$$

' dir (Bkz Şekil).

Ayrılmış kaya kütlelerinde kaya kalite göstergesi rahatlıkla  $RQD \approx \%15$  alınabilir. Ve olası tavan basıncı

$$p_i = \left[ 2,81 \cdot \exp(-0,0281 \times 15) \right] 2,6 \cdot 6,8 = 32,6 \text{ t/m}^2$$

mertesinde hesaplanır.

Limit denge kavramına dayanan Ellstein, 1986 yaklaşımına göre sığ tünellerde iksa basıncı

$$\frac{P_i}{\gamma D} = \frac{H}{D} + \frac{2}{3} - \frac{C}{\gamma D} (4 + \sqrt{2})$$

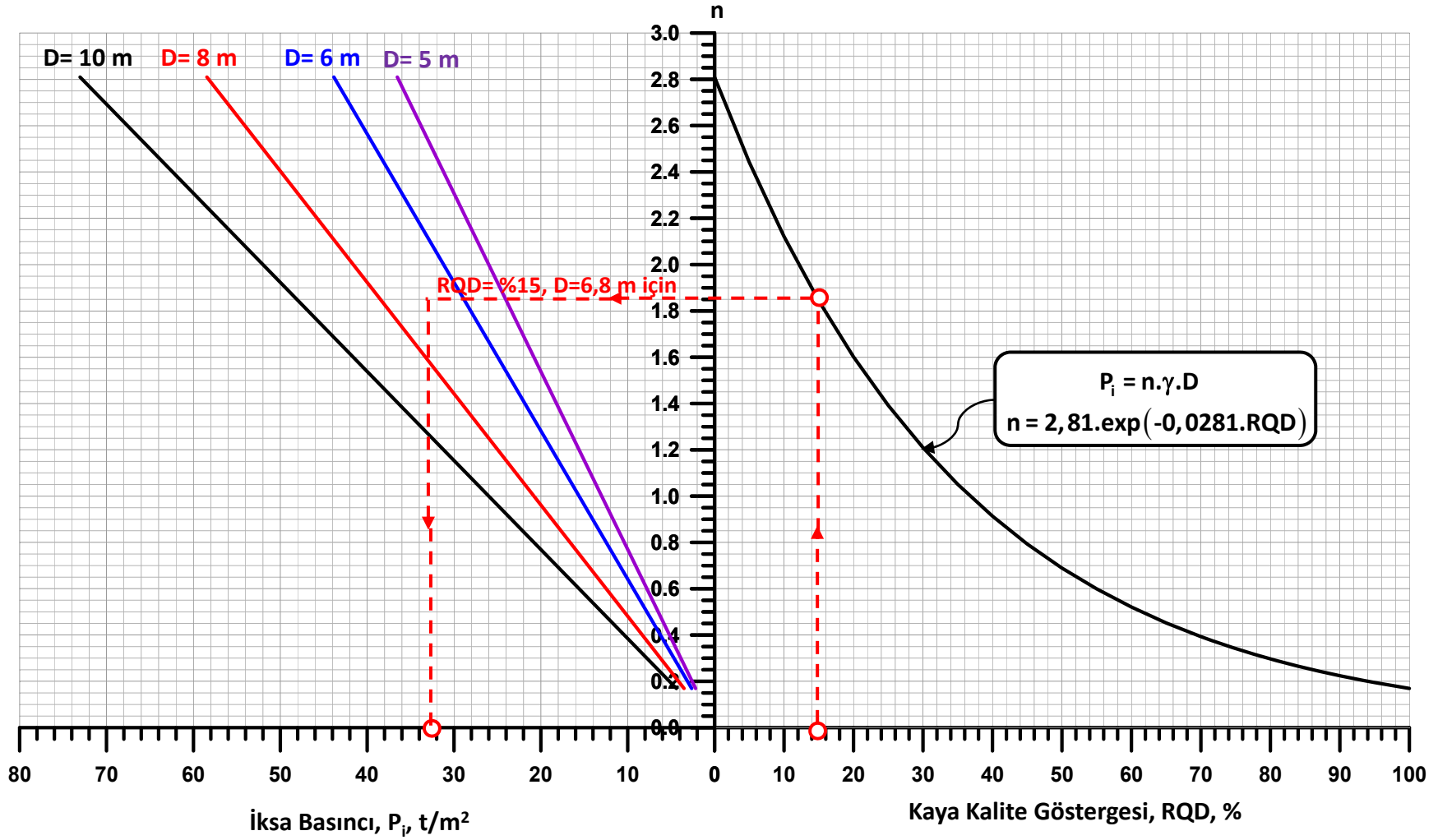
ile hesaplanabilir (Antão, 1997). Kohezyonsuz ( $c \approx 0$ ) zemin/ kaya – ayrılmış, çok çatlaklı – kütlelerinde

$$P_i = \gamma D + \frac{2}{3} \gamma D = 1,66 \gamma D$$

olup, örnekteki veriler için istenen büyüklük

$$P_i = 1,66 \times 2,6 \times 6,8 = 29,3 \text{ t/m}^2$$

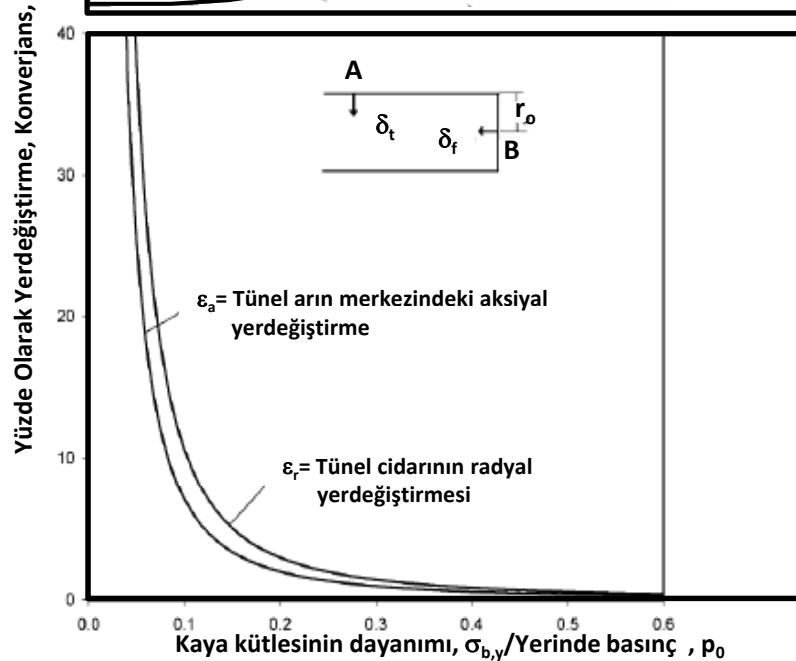
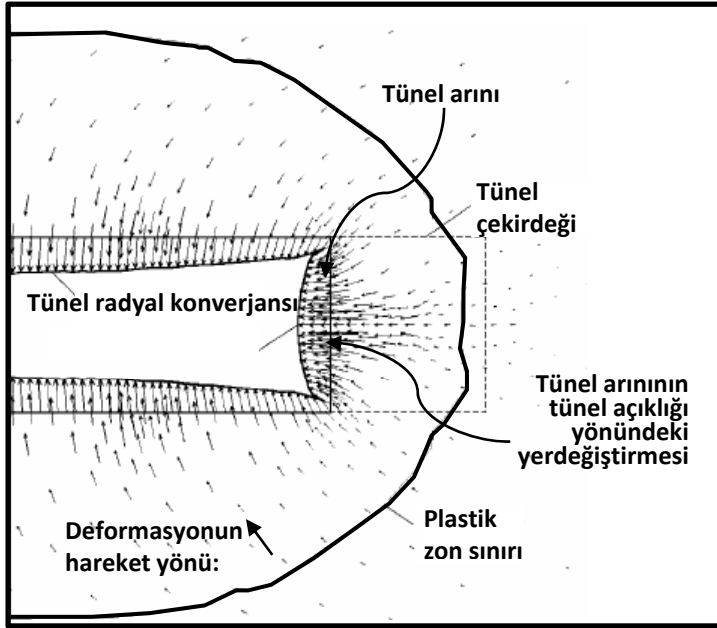
bulunur.



Şekil – RQD kavramına dayandırılan iksa basıncı abağı ( $\gamma$ = Kaya birim ağırlığı,  $\gamma=2,6$  t/m<sup>3</sup>,  $n$ = Yük veren faktörü,  $D$ = Tünel kazı çapı)

Kaynak: Arioğlu, Ergin, 1992, 1995.

## ❖ Hidrostatik Basınç Altındaki Dairesel Kesitli Tünel Cidarlarının Deformasyonu



$$\epsilon_a = 0,10 \cdot \left[ \left( 1 - \left( \frac{p_i}{p_0} \right) \right) \right] \cdot \frac{\sigma_{yb}}{p_0} \cdot \frac{-(3(p_i/p_0)+1)/(3,8(p_i/p_0)+0,54)}{p_0}, \%$$

$$\epsilon_r = 0,15 \cdot \left[ \left( 1 - \left( \frac{p_i}{p_0} \right) \right) \right] \cdot \frac{\sigma_{by}}{p_0} \cdot \frac{-(3(p_i/p_0)+1)/(3,8(p_i/p_0)+0,54)}{p_0}, \%$$

$\epsilon_r$  = Tünel cidarının radyal kapanması – yerdeğiştirme -

$\epsilon_a$  = Tünel arın merkezindeki aksiyal yerdeğiştirme

$p_0$  = Derinlik basıncı,  $p_0 = \gamma \cdot H$

$\gamma$  = Tünel ortamının açıldığı kayanın yoğunluğu

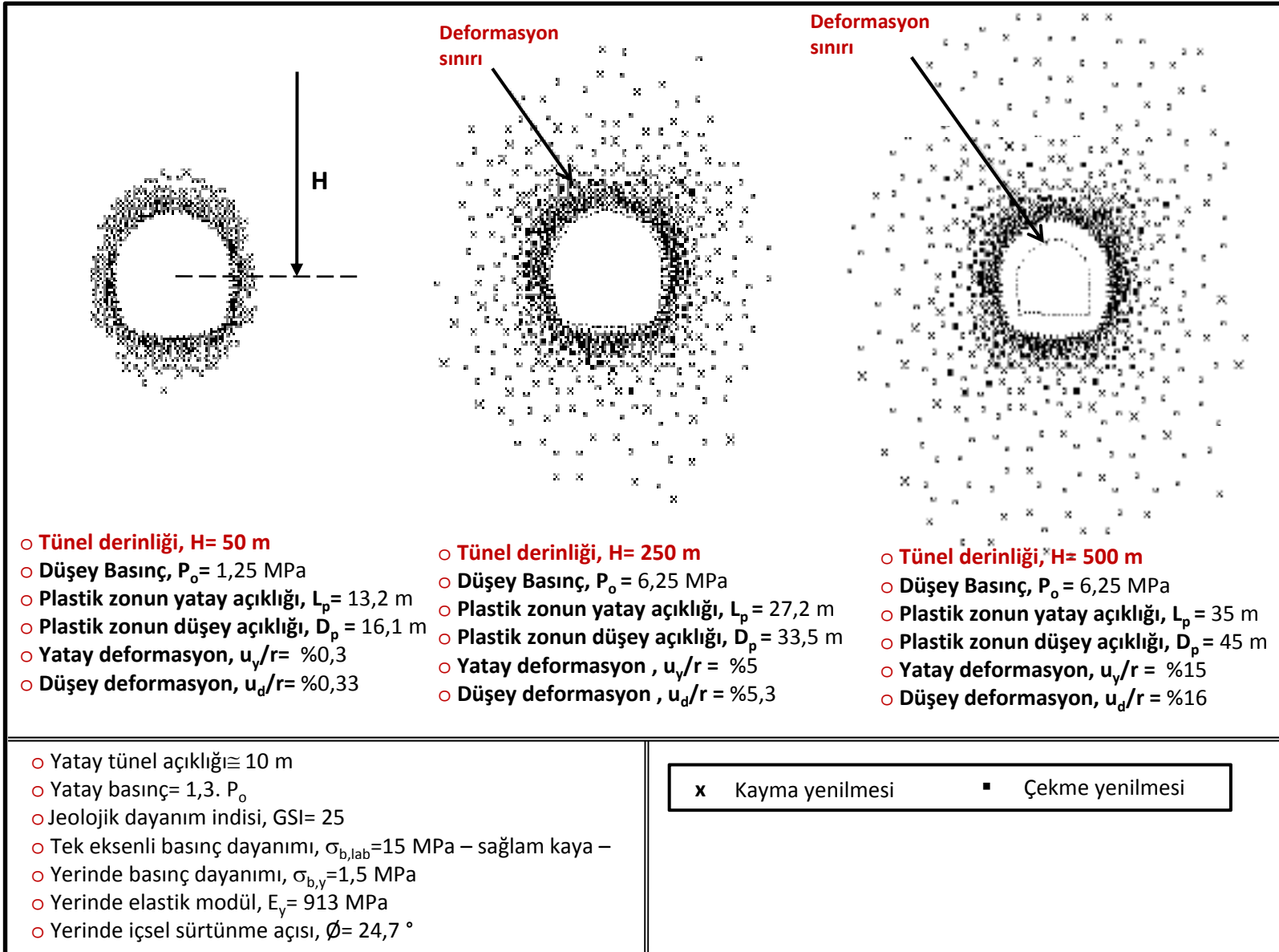
$H$  = Tünel aks derinliği

$p_i$  = Tünelde uygulanan iksa sistemleriyle – püskürtme beton, tavan saplaması, çelik bağ vb. – uygulanan toplam basınç

$\sigma_{yb}$  = Kaya kütleinin tek eksenli basınç dayanımı

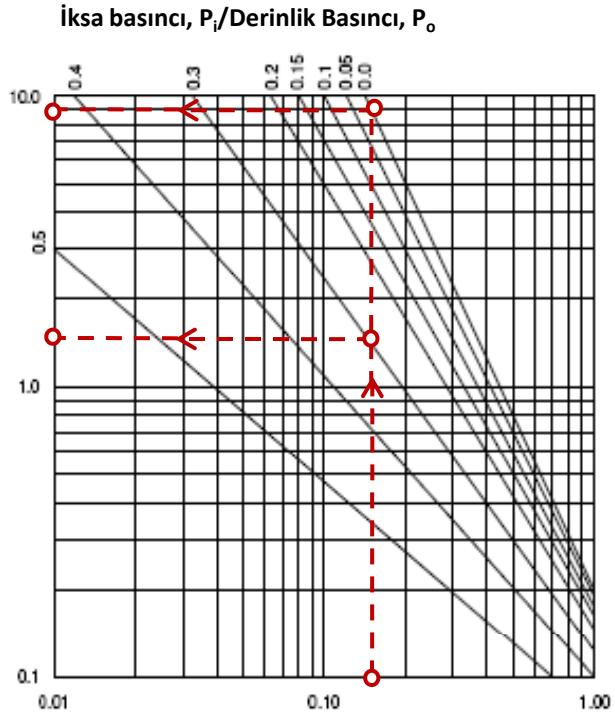
$r_0$  = Tünel kazı yarıçapı

## ❖ Derinliğin Tünel Stabilitesine Etkisi



## ❖ İksa Basıncının Radyal Yerdeğiştirme Üzerine Etkisi

Radyal Tünel Kapanması – yerdeğiştirmesi – /Tünel Çapı x 100, %



Kaya Kütlelerinin Dayanımı/Derinlik Basıncı,  $\sigma_{b,y}/P_o$

( $P_o$ = Derinlik basıncı,  $P_i$ = İksa basıncı,  $\sigma_{b,y}$ =Kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı)

**Örnek:** Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı  $\sigma_{b,y}= 0,2$  MPa, tünel derinliği,  $H= 50$  m, geçilen formasyonun birim hacim ağırlığı  $\gamma= 2,6$  t/m<sup>3</sup> için iksasız ve iksa basıncının  $0,39$  MPa olma durumunda (radyal tünel kapanması/tünel çapı) oranını hesaplayınız.

**Çözüm:**

○  $P_o = \gamma \cdot H = 2,6 \text{ t/m}^3 \times 50 \text{ m} = 130 \text{ t/m}^2 = 1,3$  MPa

○  $\sigma_{b,y}/P_o = 0,2 / 1,3 \approx 0,15$

○ **İksasız olma durumu:**  $P_i = 0 \rightarrow P_i/P_o = 0$  ise

Radyal tünel kapanması/tünel çapı= % 9 – çok yüksek kapanma –

○ **İksa basıncının (tavan saplama, püskürtme beton vs.)  $P_i = 39$  t/m<sup>2</sup> –  $P_i = 0,39$  MPa – alınması durumu:**

○  $P_i = 0,39$  MPa  $\rightarrow P_i/P_o = 3,9 / 13 = 0,3$  ise

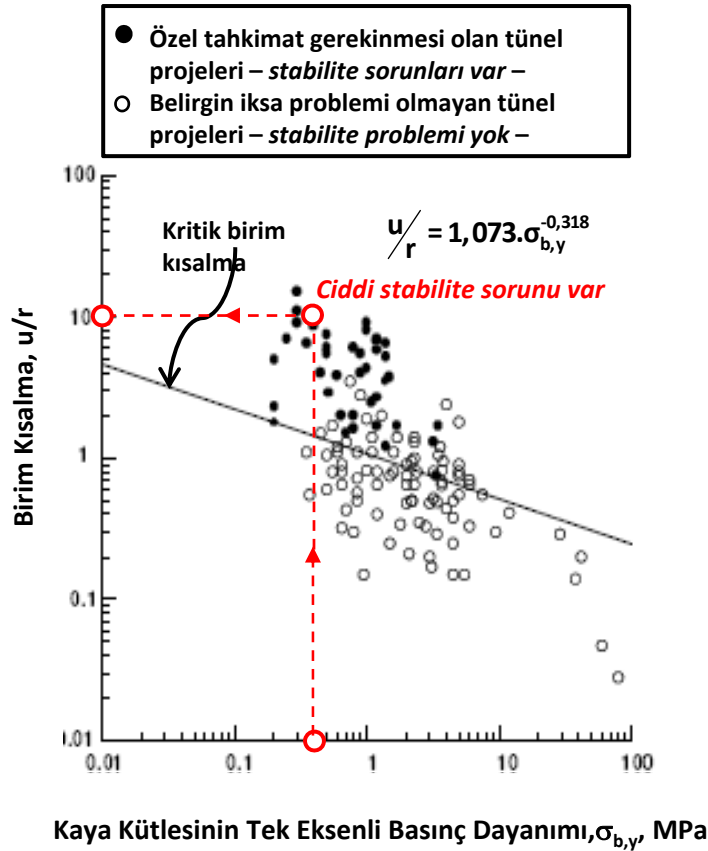
○ Radyal tünel kapanması/tünel çapı= % 1,5

○ **Değerlendirme:**

Verilen geoteknik koşullarda tahkimat uygulanmama durumunda düşey radyal yerdeğiştirme tünel yarıçapının %10' u mertebesindeyken, iksa uygulanması durumunda aynı deformasyon büyüklüğü tünel çapının %1,5' u mertebesine indirilmektedir. Buradan açıkça görüleceği gibi uygun iksa seçimiyle tünel deformasyonları istenilen limitler içinde kontrol edilebilmektedir.



## ❖ Kritik Tünel Birim Kısalması Kavramı – Çeşitli Tünel Projelerine Uygulamaları



**Örnek:** Geçilen formasyonun yerinde dayanımı  $\sigma_{b,y} = 0,4$  MPa, tünel derinliği  $H = 150$  m, birim hacim ağırlığı  $\gamma = 2,6$  t/m<sup>3</sup> olan ve uygulanan iksa basıncı  $P_i = 0,4$  MPa olan bir tünelde, stabilite sorununun olup olmadığını Sakurai diyagramı ile tahkik ediniz. (Tünel en kesiti dairesel kabul edilecektir).

**Çözüm:**

- Derinlik basıncı:  $P_o = \gamma \cdot H = 2,6 \times 150 = 390$  t/m<sup>2</sup> (3,9 MPa)
- $\sigma_{b,y}/P_o = 0,4 / 3,9 \cong 0,1$
- İksa basınç oranı:  $P_i/P_o = 0,4 / 3,9 \cong 0,1$
- Hoek diyagramından tünelin birim kısalma büyüklüğü yaklaşık %10 olarak belirlenmiştir.

○ **Değerlendirme:** Yandaki Sakurai diyagramından yerinde tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_{b,y} = 0,4$  MPa ve birim kısalma,  $u/r = \%10$  değerlerinin tanımladığı nokta, “kritik birim kısalma” değerinin çok üzerinde kalmaktadır. Daha açık deyişle verilen geoteknik, geometrik koşullar ve iksa basıncı için ciddi bir stabilite problemi beklenmelidir. **Bu durumda mühendis tünel içinde uyguladığı iksa basıncını arttırmak yoluyla radyal kapanma değerini daha aşağı değere çekebilir.**

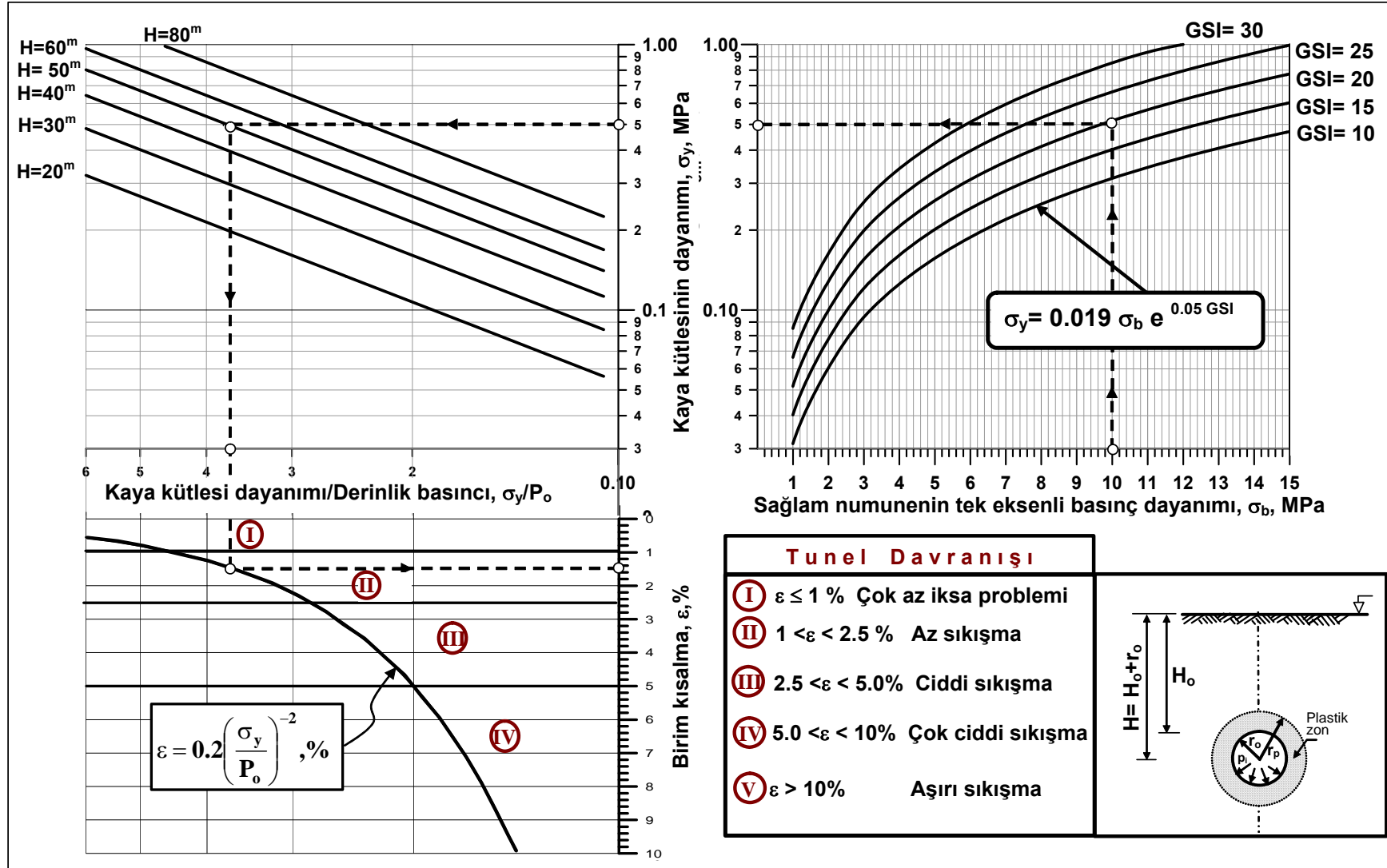
## ❖ $\varepsilon = u_i / r_0$ Değerlerine Göre Tünel Stabilitesi ve Önerilen İksa Sistemleri

Birim kısalma, $\varepsilon$ ,%	Stabilite durumu	İksa türleri
< 1	Çok az stabilite sorunu söz konusu olabilir.	Çok basit tünel koşulları, az yoğunluklu tavan saplamaları ve püskürtme beton
1 – 1.5	Tünel kazısı etrafında “plastikleşme zonu” oluşur. Düşük düzeyde “sıkışma” söz konusu	Tavan saplamaları + Püskürtme beton kaplama. Kimi durumlarda hafif ağırlıklı olarak çelik bağlar gerekli olabilir.
2 – 2.5	“Sıkışma”nın düzeyi daha belirgindir. Genellikle kazının “arın stabilitesi” önemli bir sorun oluşturmaz	İksanın hızlı bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Püskürtme beton kaplaması içinde ağır profilli çelik bağların yerleştirilmesi genellikle gerekebilir.
5 - 10	Çok ciddi “sıkışma” ile birlikte “arın stabilite” sorunu önemli olmaktadır.	Yukarıdaki belirtilen iksa sistemine ek olarak arın güçlendirme elemanlarının ve tavanda önsürenlerin kullanımı genellikle gerekir.
> 10	Sıkışmanın yanı sıra “arın stabilite” sorununun düzeyi artmıştır.	Aşırı sıkışma nedeniyle tavanda önsüren ve arında güçlendirme iksa elemanlarının kullanımı gerekmektedir. Sıkışmanın denetimi açısından püskürtme beton kaplaması içinde esnek çelik bağ kullanımı tercih edilebilir.

$u_i$ = Tünel radyel yerdeğiştirmesi,  $r_0$ = Kazı yarıçapı

**Kaynak:** Hoek, Marinos ,2000

## ❖ İksa Basıncı $p_i=0$ için Tünel Stabilite Abağı



( GSI= Jeolojik dayanım indisi, H= Tünel aks derinliği,  $r_o$ = Tünel yarıçapı,  $r_p$ = Plastik zonun yarıçapı,  $\varepsilon = u_i/r_o$ =(Tünel cidarının radyal yerdeğiştirmesi/tünel yarıçapı), derinlik basıncı  $P_o$ ' nün hesabında  $P_o = \gamma \cdot H$  birim hacim ağırlık  $\gamma = 2.65 \text{ t/m}^3$  alınmıştır).

## ❖ Tünel Sıkışma Hareketlerinin Düzeyi

Singh, 1995' e göre

○ Tünel Derinliği:

$$H > 275 N^{0,33} \cdot D^{0,1}$$

$$H > 350 Q^{0,33}$$

} Sıkışma hareketi sözkonusu

○ Az sıkışma .....Kapanma  $\frac{\epsilon_t}{D} \cdot 100 = \%1 - 3$

○ Orta sıkışma .....Kapanma  $\frac{\epsilon_t}{D} \cdot 100 = \%3 - 5$

○ Yüksek sıkışma.....Kapanma  $\frac{\epsilon_t}{D} \cdot 100 > \%5$

$\epsilon_t$ = Tünel cidarının birim kısılması

D= Tünel kazı çapı

## ❖ Tünel Stabilitesi Abağı

### • Stabilite Sayısı:

$$S = \frac{\sigma_t}{\sigma_{y,b}} = \frac{2\gamma H}{\sigma_{y,b}}$$

$\sigma_t$  = Tünel cidarındaki teğetsel gerilme (tünel kazı kesiti daireseldir)

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

$$\sigma_{y,b} = 7\gamma \left( \frac{\sigma_{lab}}{100} \right) \cdot Q^{0,333} \quad , \text{ MPa}$$

$Q > 10$  ve  $\sigma_{lab} > 100$  MPa durumunda  $\left( \frac{\sigma_{lab}}{100} \right)$  terimi 1 alınacaktır.

$\sigma_{lab} < 100$  MPa ise  $\left( \frac{\sigma_{lab}}{100} \right)$  terimi düzeltme faktörü olarak

kullanılacaktır. (Grimstad ve Bhasin, 1996)

$\sigma_{lab}$  = Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı, MPa

$$\sigma_{y,b} = 7\gamma \cdot Q^{0,333} \quad , \text{ MPa}$$

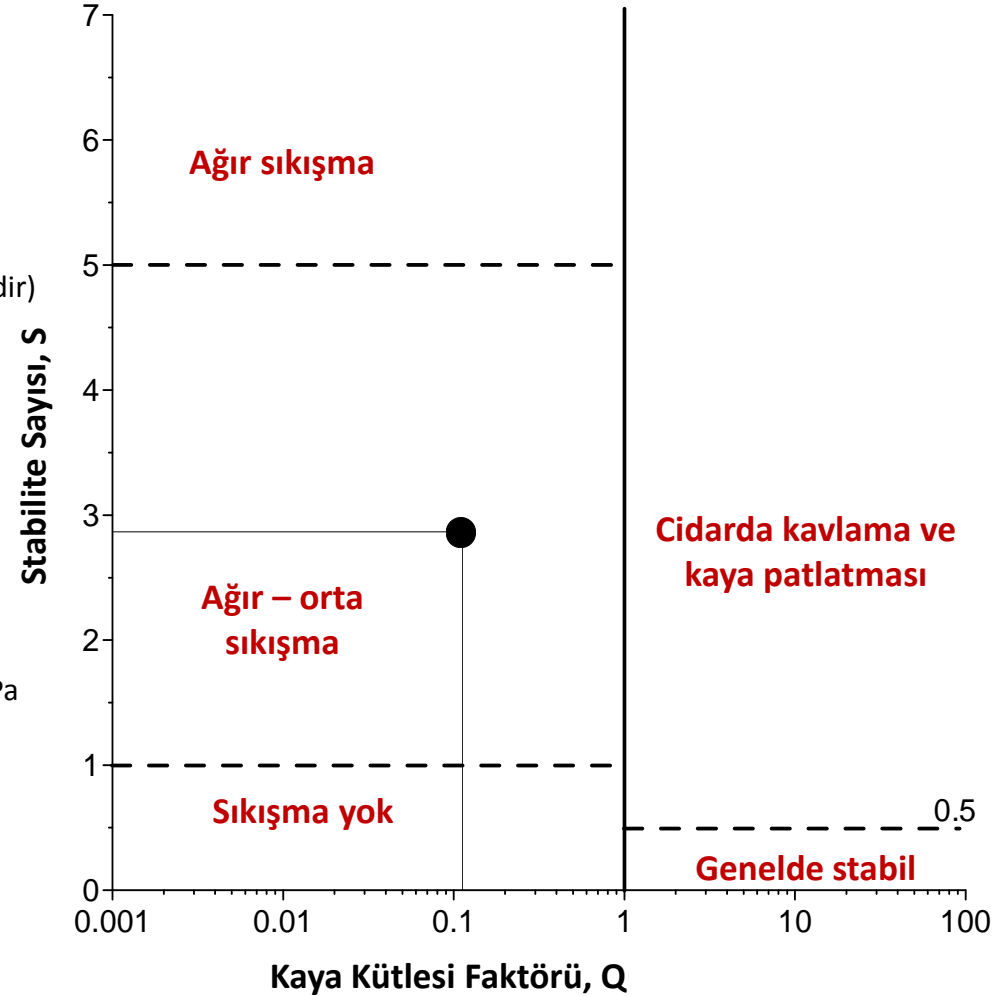
$Q < 10$ ,  $2 \text{ MPa} < \sigma_{lab} < 1000 \text{ MPa}$

$J_w = 1$  ve  $J_r/J_a < 0,5$

(Singh vd., 1997).

$\gamma$  = Kayanın yoğunluğu,  $t/m^3$

$H$  = Tünel derinliği



Devamıdır...

• Kaya Kalite Faktörü: Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

RQD= Kaya kalite göstergesi

$J_n$ = Çatlak - süreksizlik - takımı sayısı

$J_r$ = Çatlak pürüzlülük sayısı

$J_a$ = Çatlak ayrışma - bozunma - sayısı

$J_w$ =Çatlak su azaltma faktörü

SRF= Gerilme azaltma faktörü

Örnek:

- Tünel derinliği: H= 500 m
- Kaya yoğunluğu:  $\gamma=2,6 \text{ t/m}^3$  – kumtaşı –
- Kaya kütle kalite faktörü:  $Q \approx 0,1$
- Tek eksenli basınç dayanımı:  $\sigma_{lab} = 60 \text{ MPa}$

Çözüm:

- Kaya kütle kalite faktörü:

$Q = 0,1 < Q = 10$  olduğundan Singh vd. 1997 amirik bağıntısı kullanılacaktır.

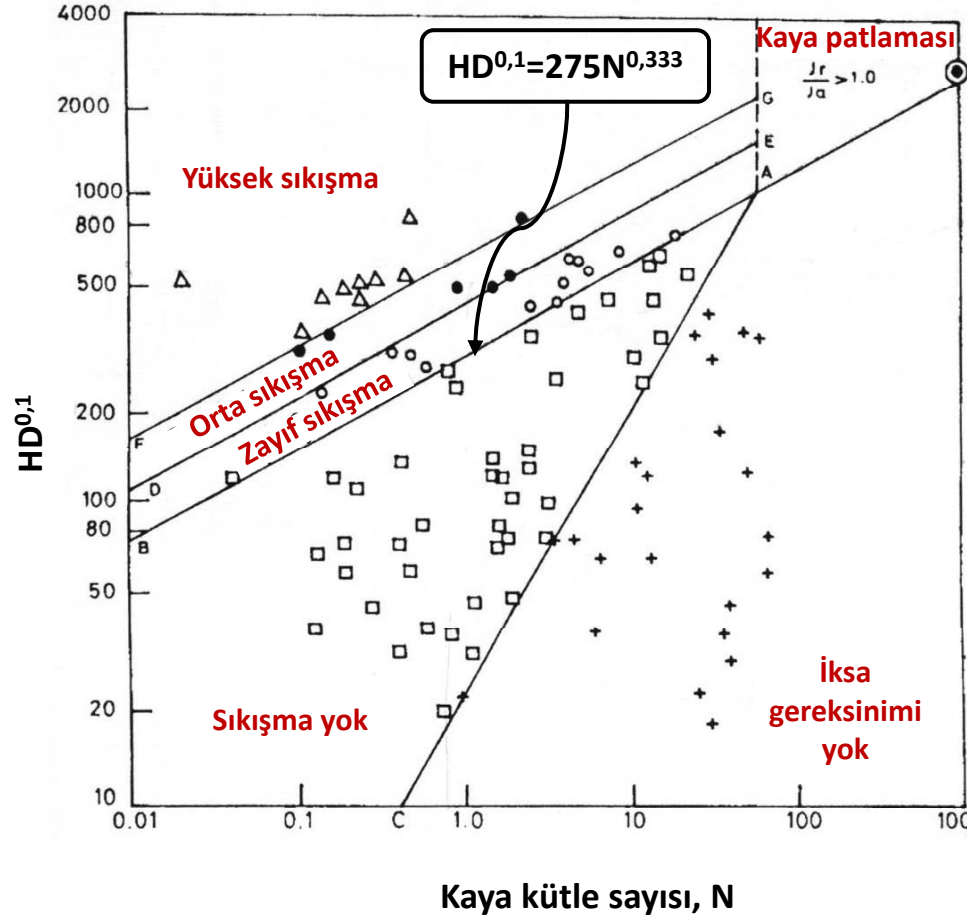
$$\sigma_{y,b} = 7\gamma \cdot Q^{0,333} = 7 \times 2,6 \times (0,1)^{0,333} = 8,45 \text{ MPa} = 845 \text{ t/m}^2$$

- Stabilite sayısı

$$S = \frac{\sigma_t}{\sigma_{y,b}} = \frac{2\gamma H}{\sigma_{y,b}} = \frac{2 \times 2,6 \times 500}{845} \approx 3,1$$

**Değerlendirme:**  $Q = 0,1$  ve  $S = 3,1$  değerlerine göre Grimstad ve Bhasin, 1996 abağından sıkışmanın düzeyi “Orta - Ağır” olarak elde edilmektedir. Bkz Grimstad ve Bhasin abağına)

## ❖ Tünel/galerilerde sıkışma hareketinin düzeyini belirleyen $HD^{0.1} = f(N)$ değişimleri



### • Kaya kütle sayısı:

$$N = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_w$$

Kaiser vd., 1986; Goel vd., 1995

RQD= Kaya kalite göstergesi

$J_n$ = Çatlak - süreksizlik - takımı sayısı

$J_r$ = Çatlak pürüzlülük sayısı

$J_a$ = Çatlak ayrışma - bozunma - sayısı

$J_w$ =Çatlak su azaltma faktörü

H= Tünel derinliği, m

D= Tünel kazı çapı, m

### Değerlendirme:

Verilen geometrik boyut (H, D) ve kaya kütle sayısı, N' den tünel/ galerilerde "sıkışma" hareketinin düzeyi belirlenir.

## ❖ Kaya Patlama Stabilite Sorununun Belirlenmesi

### Genel bilgiler

Kaya ortamlarda açılan tünellerde stabilite sayısı

$$S = \frac{\sigma_{y,b}}{\sigma_t} = \frac{F_b \cdot \sigma_{b,lab}}{(A \cdot k - 1) \sigma_z}$$

ile ifade edilmektedir (Arioğlu, Ergin, Arioğlu, B., Girgin, C., 1999), (Arioğlu, Ergin, Girgin, C., 1998).

Burada:

$\sigma_{y,b}$  = Kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı

$\sigma_t$  = Tünel yan cidarındaki teğetsel gerilmenin büyüklüğü

$\sigma_z$  = Düşey gerilmenin büyüklüğü,  $\sigma_z = \gamma \cdot H$

$F_b$  = Tünel boyutu ve laboratuvar örnek boyutuna,  $d_{lab}$ , bağlı “ölçek faktörü” olup

$$F_b = \left( \frac{d_{lab}}{D_t / CF} \right)^{0.2}$$

ile bellidir (Arioğlu, Ergin ve Girgin, 1998)

$\sigma_{lab,b}$  = Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı

$D_t$  = Tünel kazı çapı

$CF$  = Süreklilik katsayısı, az çatlaklı masif kayalar için  $CF > \sim 6$ , sık çatlaklı parçalanmış kayalar için  $CF > \sim 100$  değerini almaktadır (Palmstöm, 1996)

$A$  = Tünelin kesit formu ile ilgili katsayı, dairesel tüneller için 3, atnalı ve dikdörtgen kesitli tüneller için sırasıyla 3.2 ve 1.9 değerlerini almaktadır.

$k$  = “yatay gerilme/düşey gerilme”nin oranı olup, kristalli kayalarda açılan tünellerde derinliğe bağlı olarak

$k = 5.13 \cdot H^{-0.16}$ ,  $H(m)$  ile verilmektedir (Arjang, 1998).



**Devamıdır...**

Masif-kırılgan kayaç kütlelerinde açılmış tünellerde gözlenen yenilme modlarına göre stabilite sayısının aldığı değerler Çizelgede belirtilmiştir (Palmström, 1996).

**Çizelge – Stabilite Sayısı**

Stabilite değeri "S"	Yenilme modu
> 2.5	Tünel stabil-Herhangi bir gerilme problemi yok
2.5-1	Yüksek gerilme-Hafifçe gevşeme
1-0.5	Hafif kaya patlaması veya dökülmeler
< 0.5	Ağır kaya patlaması

- **Stabilite sayısının hesaplanması**

Örnek ile açıklanırsa;

- Tünel derinliği:  $H = 7,50$  m
- Tünel kesit şekli: Dairesel,  $A = 3$
- Tünel kazı çapı:  $D_t = 6,5$  m
- Kaya ortamı çok az çatlaklı
- Kaya yoğunluğu:  $\gamma = 2,7$  t/m<sup>3</sup>
- Sağlam kaya numunesinin tek eksenli tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_{b,lab} = 1300$  kgf/cm<sup>2</sup>
- Laboratuar kaya numunesinin çapı:  $d_{lab} = 0,05$  m

Devamıdır...

Çözüm:

$$k = 5.13 \times (750)^{-0.16} = 1.779$$

$$F_b = \left( \frac{0.05^m}{6.5^m / 5} \right)^{0.2} \cong 0.5$$

$$S = \frac{0,5 \times 1300}{(3,2 \times 1,779 - 1) \times 2,7 \times 750} = 0.68$$

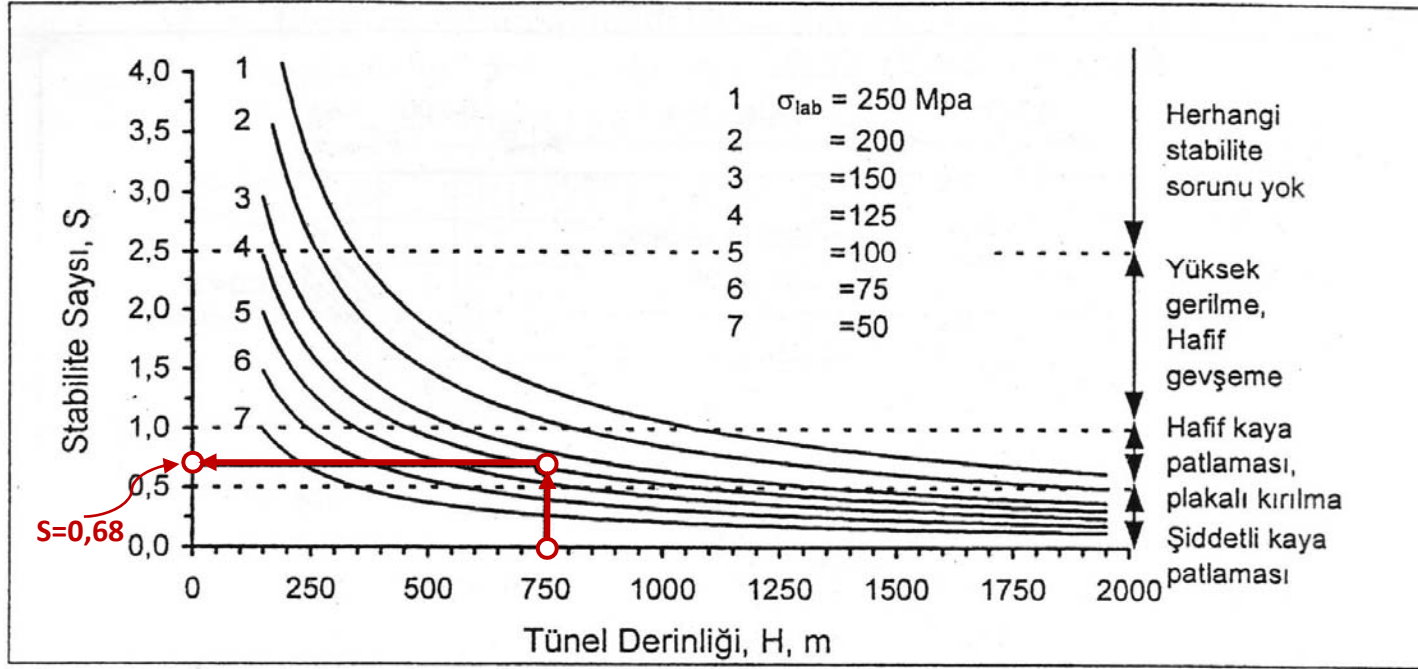
bulunur.

**Değerlendirme:**

Stabilite sayısının, S değerlendirilmesi izleyen şekilde verilen  $S = f(\sigma_{lab}, H)$  abağından yapılabilir. Buna göre tünel cidarında “hafif kaya patlaması” beklenmektedir.

Devamıdır...

## ❖ Kaya Patlama Düzeyinin Belirlenmesi



Şekil Stabilite sayısının farklı kayaç basınç dayanımlarında derinlik ile değişimleri

(σ<sub>lab</sub> = Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı)