

Dr. H. Sönmez –JEM719

Bölüm 6: ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİ



Şev Duraylılığı Analiz Yöntemlerine genel bakış

Şevlerin duraylılığın değerlendirilmesinde bir önceki bölümde ayrıntılı olarak sunulan **Kinematik Analiz Yöntemi** sadece kaya şevlerinde uygulanır. Bu yöntem yönelim ve dayanıma yönelik olarak sadece içsel sürtünme açısının dikkate alınarak süreksizliklerin kontrollünde gelişebilecek şevlerin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu nedenle tanımlamada kinematik anlamda düzlemsel (veya kama veya devrilme) türü duraysızlık potansiyeli vardır sonucuna götürür.

Çünkü bu yöntemde:

- i. Kayan bloğun ağırlığı
- ii. Kohezyon
- iii. Şevin geometrisi
- iv. Su basınçları
- v. Sismik kuvvetler
- vi. Dış yükler

NOT: Kinematik olarak süreksizlik denetimli koşulların oluşmamasını sağlamak tasarımda, uygulamada ve işletme süresince avantaj yaratır !

Ancak

gibi şevlerin duraylılığı açısından önemli parametreler dikkate alınmaz.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Limit denge yöntemi (deterministik yöntem)

Duraysızlık modeline göre kinematik analizde dikkate alınmayan tüm parametrelerin de dikkate alındığı ve bir kayma (yenilme) yüzeyi üzerindeki kütlelerin dengesinin kuvvet, moment veya her ikisinin de kullanılarak çözümlendiği yöntemdir.

Bu yöntemde kayam (yenilme) yüzeyi :

- i. Bir düzlem boyunca (düzlemsel) gelişebilir
- ii. İki düzlemin kesişme hattı üzerinde kama yüzeyi
- iii. İki boyutlu düzlemde dairesel yüzey
- iv. Dairesel olmayan (düzlemsel başlayıp dairesel veya tersi) yüzeyler şeklinde olabilir.

Her biri için ayrı limit denge çözümlene yöntemleri vardır.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Dairesel ve dairesel olmayan yüzeylerde kayma yüzeyi üzerindeki kütle dilimlere ayrılarak çözümlene yapılır. Burada amaç, kayma yüzeyini dilimlerin tabanında düz kırık doğrularla analize dahil etmektir. Bir dilime etkiyen kuvvetler yukarıda görülmektedir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Sayısal (Nümerik) Analizler

Limit denge analizleri kayma potansiyeli sunan kütlelerin yenilme yüzeyi boyunca dengesini kuvvet ve/veya moment dengeleri üzerinden çözümlenen yöntemlerdir. Kütlelerin içerisinde ve kayma yüzeyindeki dayanım ve deformasyon davranışları irdelenmez.

Limit denge yöntemlerindeki bu sınırlamaların aşılmasında sayısal analizler kullanılırlar. Şevlerde yenilme, deformasyon ve gerilme dağılımı gibi değerlendirmelerde kullanılan nümerik analizleri üç grup altında toplamak mümkündür.

- Sürekli (Continuum) modeller
- Süreksiz (Discontinuum) modeller
- Hibrit modeller

Dr. H. Sönmez –JEM719



Sürekli (Continuum) modeller: Sürekli modeller, toprak zeminler, masif kaya kütleleri, sağlam kaya malzemeleri, sık eklemli kaya kütleleri gibi jeolojik malzemelerin modellenmesi için en uygun sayısal çözümleme yaklaşımıdır.

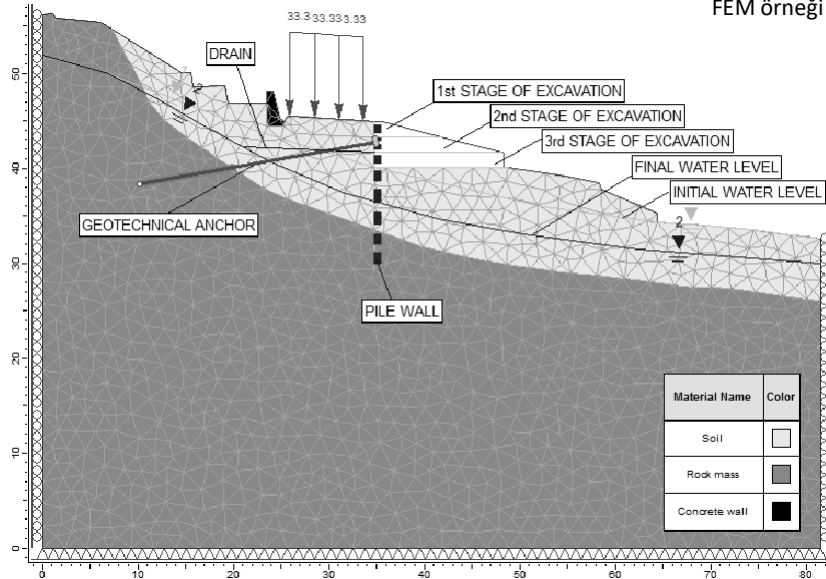
Bu modellerde kütle her yönde sürekli, diğer bir ifadeyle özellikleri kesintiye uğramaz. Bu modellerde sürekli özelliğe sahip kütlede sınırlı sayıda fay ve tabakalanma gibi süreksizlikle ara yüzeyler tanımlanabilir. Ancak çok sayıda süreksizliği çözümlemeye uygun değildir. Yeraltı suyu, dış yükler, dinamik yükler gibi etkiler modelle dahil edilebilir. Problemden kütle üçgen, dörtgen veya altıgen elemanlara ayrılır ve çözümler tüm düğüm noktaları (nodes) için yapılır. Kazı, dolgu, yükleme gibi aşamalı işlemler modellenebilir.

- ✓ Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model, FEM)
- ✓ Sonlu Farklar Modeli (Finite Difference Model, FDM)

Sürekli sayısal modellemede yaygın bilinen yazılımlar → Phase2 (roscience), FLAC2D, FLAC3D (Itasca 1997) and PLAXIS'dir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

FEM örneği



Dino Z., Josip P., Martine V.P. 2015. Parametric analysis of anchored bored pile wall as a part of landslide stabilization measures on the Grohovo road landslide, Croatia, Conference: IX-th Regional Conference of Students from Geotechnical Faculties, At Sofia, Bulgaria

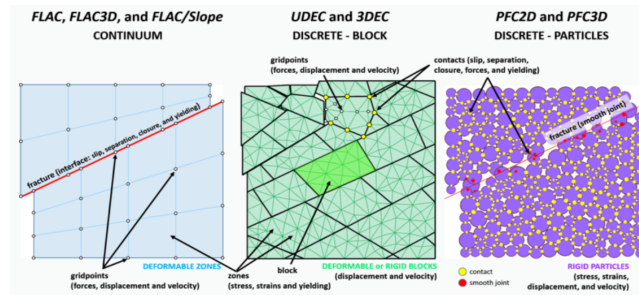
Dr. H. Sönmez –JEM719



Kesikli (Discontinuum) modellerde şevli oluşturan kaya kütleleri, rijit veya deforme olabilen bloklarla tanımlanır. Analizlerde süreksizliklerin normal ve kayma sertliği (stiffness) ile kontrol edilen süreksizliklerdeki kayma ve açılmalar değerlendirilir. Bu yöntem blokların birbirine göre deformasyonuna ve hareketine izin verir. Bu modellerden bazıları:

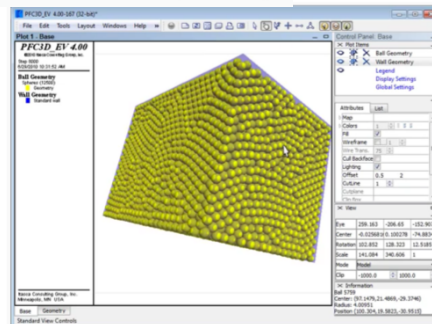
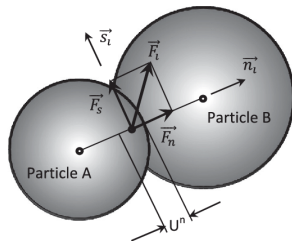
- ✓ Ayrık Elemanları Modeli (Distinct element method)
- ✓ Parçacık akış kodları (Particle flow codes)

Dr. H. Sönmez –JEM719



<https://www.itscainternational.com/software/distinct-element-method>

Particle flow codes



<https://www.youtube.com/watch?v=GQ-0cOETyS0>

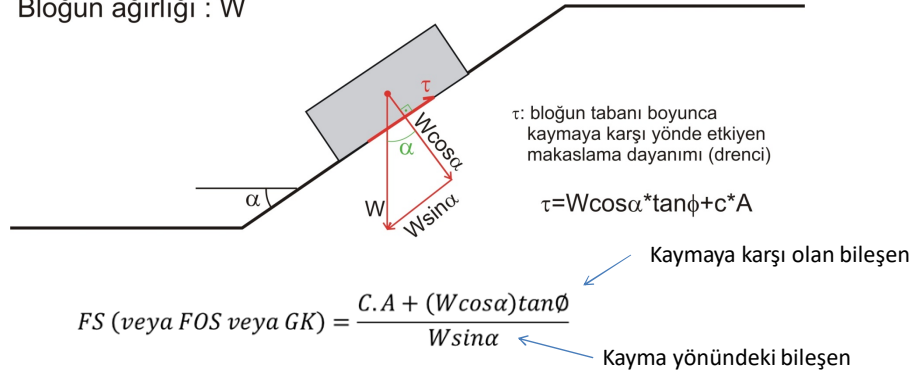
Dr. H. Sönmez –JEM719

Güvenlik Katsayısı Kavramı



Şevdeki potansiyel kayma yüzeyi boyunca gelişen makaslama dayanımı ile yüzey boyunca kayma yönündeki makaslama gerilmesinin oranıdır.

Bloğun ağırlığı : W



Dr. H. Sönmez –JEM719



- $FS=1$ denge durumu (Limit denge koşulu)
- $FS > 1$ duraylı
- $FS < 1$ duraysız

Deterministik anlamı için → OKEY

Girdi parametrelerindeki belirsizliklerden dolayı $FS > 1$ olup 1'e yaklaşan değerler tasarımda yeterli değildir. Örneği $FS=1.13$ olarak hesaplanan bir şevin yenilme olasılığı girdi parametrelerindeki belirsizliklere göre mümkün olabilir. Bunun için iki yaklaşım vardır.

- Tasarıma yönelik güvenlik katsayısı seçimi
- Olasılıksal analiz yaklaşımı

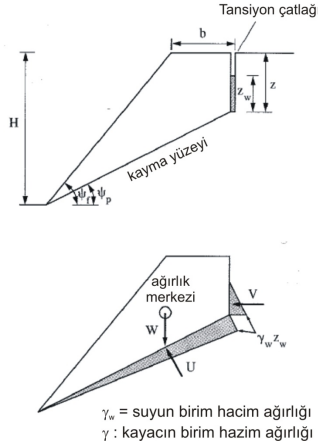
Güvenlik katsayısının seçimi ve olasılıksal analiz yaklaşımları sonraki bölümlerde ayrıca verilecektir.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Süreksizlik Denetimli Duraysızlıkların Limit Denge Analizleri

Düzlemsel Kaymanın Limit Denge Analizi



$$FS = \frac{c' (H - z) \csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{V \cos \psi_p + W \sin \psi_p}$$

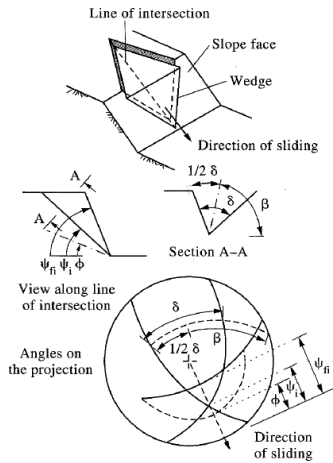
- FS = Güvenlik katsayısı
 c' = efektif kohezyon
 ϕ' = efektif içsel sürtünme açısı
 ψ_p = Kayma düzleminin eğimi
 W = kayan kütleinin ağırlığı
 U = Kayma yüzeyi boyunca yukarı yönlü etkiyen su basıncı
 V = Tansiyon çatlığındaki suyun neden olduğu kuvvet
 H = şev yüksekliği
 z = tansiyon çatlığının derinliği

Hudson ve Harrison (1997; Eberhardt, E. 2003'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

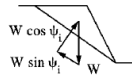


Kama Türü Kaymanın Limit Denge Analizi

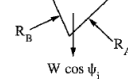
(Drene koşul ve sadece sürtünme (ϕ) direnci ile çözüm)

Forces on wedge

View perpendicular to line of intersection



View along line of intersection



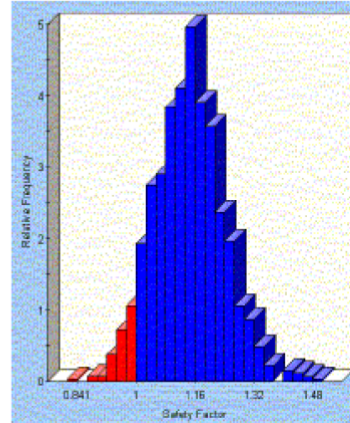
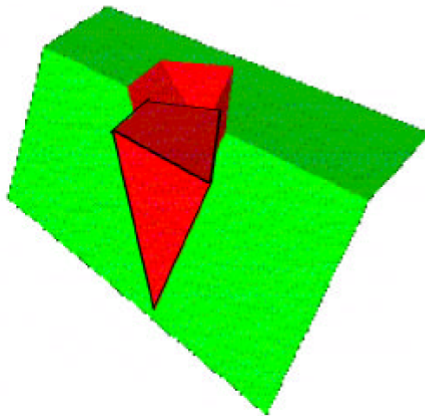
$$SF = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i}$$

$$\text{and } R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin (0.5 \delta)}$$

- Where: SF = safety factor
 ϕ = friction angle
 ψ_i = dip of the line of intersection
 W = weight of block
 β, δ = wedge geometry factors

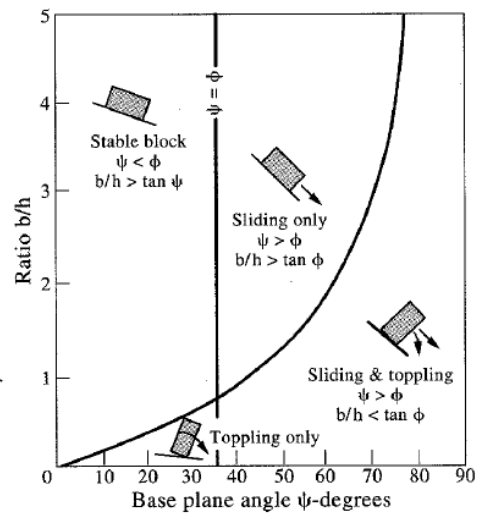
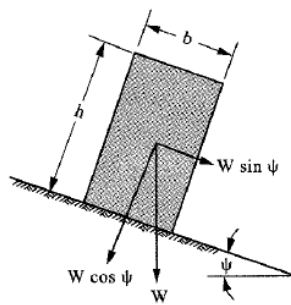
Hudson ve Harrison (1997; Eberhardt, E. 2003'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kama Türü Kaymanın Limit Denge Analizi

Kama türü duraysızlık için olasılıksal limit denge analizi (Eberhardt, E. 2003'den)


Dr. H. Sönmez –JEM719

Devrilme Türü Kaymanın Limit Denge Analizi

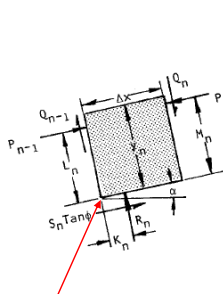
Eğimi yüzeyde bir bloğun kayma ve devrilme koşulları (Hoek ve Bray, 1991; Eberhardt, E. 2003'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

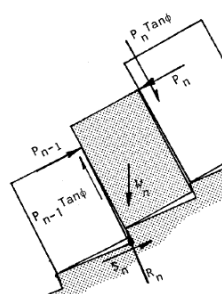
Devrilme Türü Kaymanın Limit Denge Analizi



Devrilme



Kayma



Dönme noktasına göre moment dengesi


$$P_{n-1} = \frac{P_n (M_n - \Delta x \tan \phi) + (W_n / 2) y_n \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha}{L_n}$$

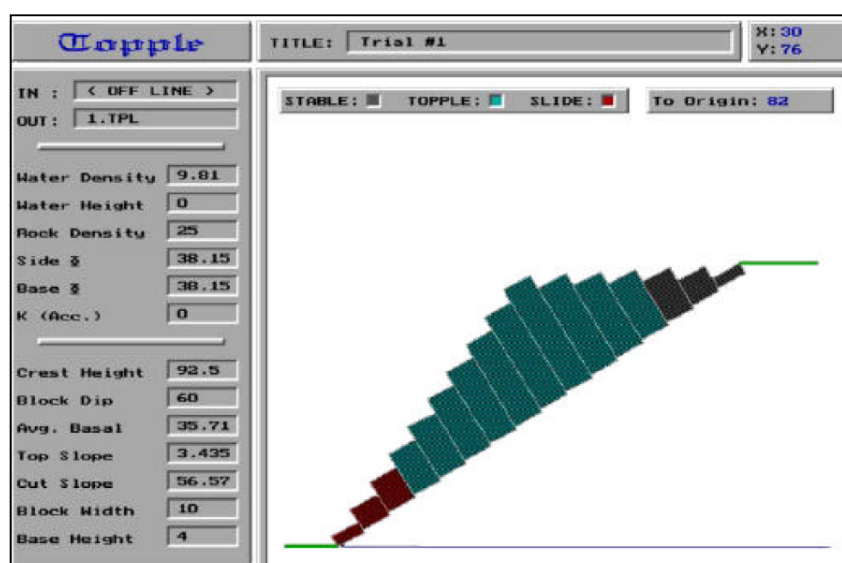
$$P_{n-1} = P_n - \frac{W_n (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \phi}$$

Devrilme ve kayma için limit denge koşulları (Hoek ve Bray, 1991; Eberhardt, E. 2003'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Devrilme Türü Kaymanın Limit Denge Analizi





Devrilme türü duraysızlık için limit denge analizi örneği (Eberhardt, E. 2003'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kısa ve Uzun Dönem Duraylılık Koşulları



- ✓ Toprak zeminlerde dış yükler veya kazı işlemleri gözenek suyu basıncında (u) değişime ve buna bağlı olarak taneler arasındaki etkin (efektif) gerilmede de ($\sigma' = \sigma - u$) değişime (artış veya azalış) neden olur. Bu Δu değişimi (artış + veya azalış -) suyun drene olmasına bağlı olarak zamana bağlı olarak sönümlenir.
- ✓ Dolayısıyla bir zeminin makaslama dayanımı da klasik Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ($\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi$) dikkate alındığında, zamana dolayısıyla drenaj koşullarına bağlı olarak değişecektir.
- ✓ Örneğin, permeabilitesi yüksek olan kum ve çakıl gibi zeminlerde drenaj çok kısa sürede ve kazı sırasında gerçekleşirken, kil gibi ince taneli ve çok düşük permeabiliteye sahip zeminlerde ise, drenajın gerçekleşmesi çok uzun hatta onlarca yıl sürebilir.
- ✓ Bu nedenle, şevlerin duraylılığı incelenirken makaslama dayanımı açısından, yükleme ve kazı koşulları ile inşaatın süresine bağlı olarak, drenajlı ve drenajsız koşullardan hangisinin daha kritik olabileceği konusu önem kazanır.

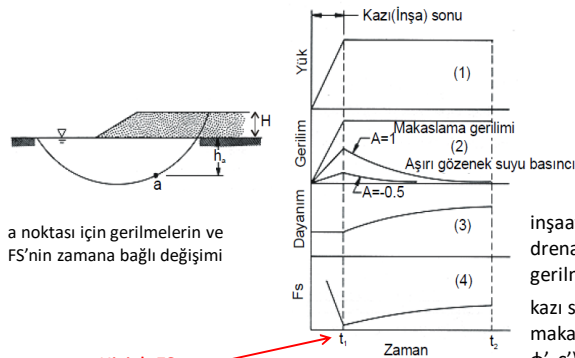
Dr. H. Sönmez –JEM719

Kısa Süreli Duraylılık Koşulu



Şevin oluşturulduğu malzemenin drene olması için yeterli sürenin olmadığı özellikle killi zeminlerde kazı veya bir yüzeye uygulanan dolgu imatları için inşaat sonunu duraylılık durumunu ifade eder.

Dolgu yapılan killi bir zemindeki duraylılığın zamana bağlı değerlendirilmesi



- İmalat sonunda (t_1) $\rightarrow \Delta u (+)$
 $\sigma'_n \rightarrow$ azalır
FS \rightarrow EN DÜŞÜK
- $t_2 \rightarrow \Delta u \approx 0$ (drene olarak)
 $\sigma'_n \rightarrow$ ARTAR ve $\tau \rightarrow$ ARTAR
FS \rightarrow ARTAR

inşaat veya kazı sonu için (t_1 zamanı) drenajsız makaslama dayanımı (toplam gerilme analizi; $\phi_u = 0, c_u$), kazı sonrası (t_2 zamanı) için de drenajlı makaslama dayanımı (etkin gerilme analizi; ϕ', c') kullanılır.

Kısa süreli duraylılık koşulu: (a) kil zemin üzerinde inşa edilen bir dolgunun kesiti ve (b) duraylılıkta zamana bağlı değişim (Wu, 1969; Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından).

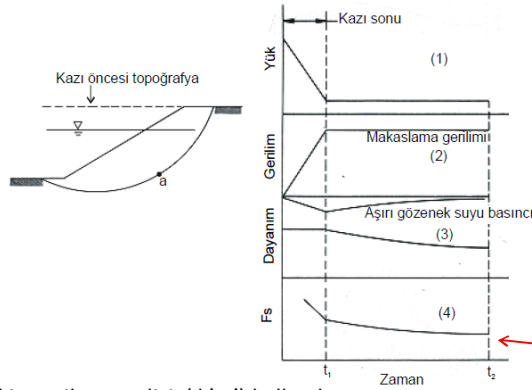
Dr. H. Sönmez –JEM719



Uzun Süreli Duraylılık Koşulu

Şevin oluşturulduğu malzemenin drene olması için yeterli sürenin olduğu Uzun süre boyunca duraylılığını koruması ve hizmet vermesi öngörülen otoyol ve demiryolu yarmaları, açık işletme şevlerin uzun dönemdeki duraylılık koşulunu ifade eder.

Kazı yapılan killi bir zemindeki duraylılığın zamana bağlı değerlendirilmesi



- imalat sonunda (t_1) $\rightarrow \Delta u (-)$
 $\sigma_n' \rightarrow$ artar
 $FS \rightarrow$ kazı sırasında yük azalmasına ($s_n \rightarrow$ azalma) güvenlik katsayısı azalır.
- $t_2 \rightarrow \Delta u \sim 0$ (drene olarak)
 $\sigma_n' \rightarrow$ AZALIR ve $\tau \rightarrow$ AZALIR
 $FS \rightarrow$ AZALIR

etkin gerilme analizi; (ϕ' , c') kullanılır.

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

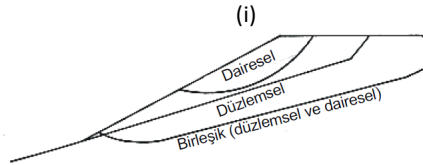
Dr. H. Sönmez –JEM719

İki boyutlu Limit Denge Analiz Yöntemleri



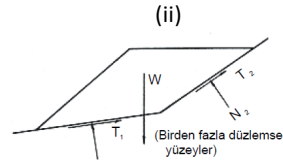
Şevlerdeki kayma yüzeyleri,

- Dairesel veya birleşik yüzeyler
- Bir veya birbirini izleyen birden fazla düzlemsel yüzeyler olmak üzere başlıca iki grupta değerlendirilebilir.



Dairesel ve birleşik yüzeyler,

- toprak zeminlerde
- yumuşak kayalarda
- ileri derecede eklemli ve çok ayrılmış kayalarda
- atık malzemelerinde



Düzlemsel veya çok yüzeyli kaymalar ise,

- (süreksizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinde)
- kayaların üzerinde bulunan killi seviyeler boyunca
- düşük dayanımlı zayıf malzemenin üzerine yığılmış atıklarda ve toprak harmanlarında

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

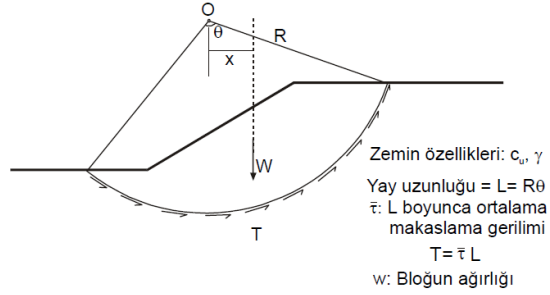
Dr. H. Sönmez –JEM719

Toplam Gerilme Analizi ($\phi_u=0$ analizi)



Kil zeminlerde kazı işleminin tamamlandığı sıradaki duraylılık koşulunun (kısa süreli duraylılık) değerlendirilmesi ($c_u, \phi_u = 0$)

$\phi_u=0$ YÖNTEMİ



O etrafındaki moment: Kaymaya neden olan moment = Wx
 Kaymaya neden olan kuvvet = TR

Yenilme ölçütü $s=c_u$

Makaslama dayanımı $\tau=s/F$ $\tau=c_u/F$ (F: güvenlik katsayısı)

Denge koşulunda $Wx=TR$

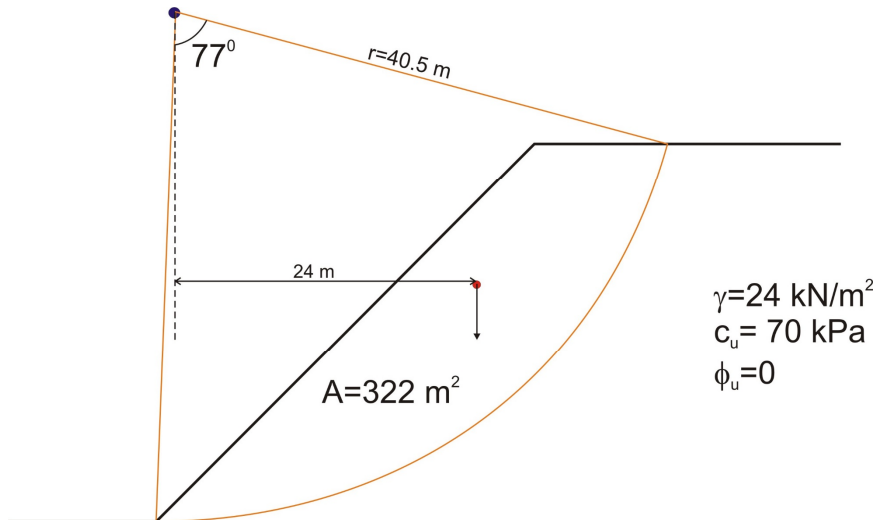
$$Wx = \frac{c_u LR}{F} \quad F = \frac{c_u LR}{Wx}$$

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Fellenius (1918; Nash, 1987'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

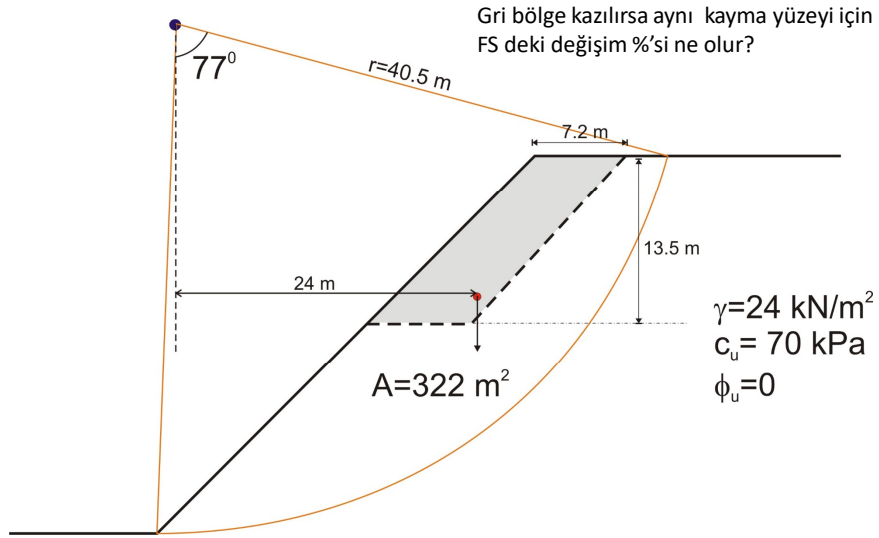
Örnek Problem-1



Dr. H. Sönmez –JEM719



Örnek Problem-2

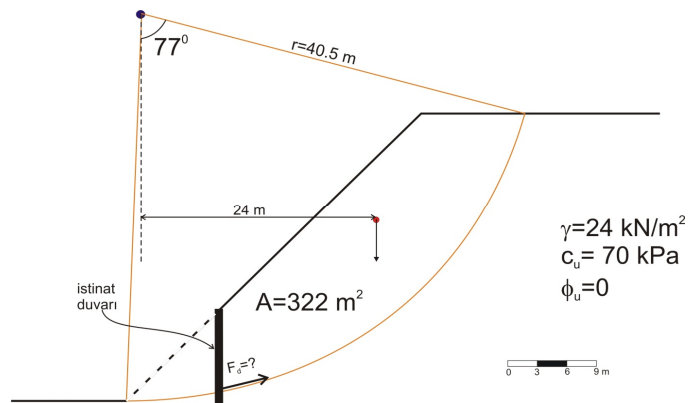


Dr. H. Sönmez –JEM719



Örnek Problem-3

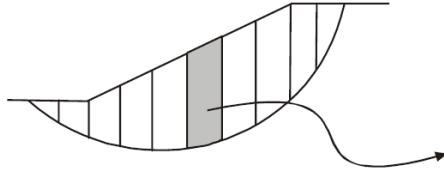
Potansiyel kayma yüzeyine ait güvenlik katsayısının 1.5 düzeyine ulaştırılması amacıyla topuk bölgesine yakın konumlu aşağıdaki şekilde gösterilen istinat duvarının yapılması planlanmaktadır. Potansiyel kayma yüzeyi için 1.5 güvenlik katsayısına ulaşılabilmesi için istinat duvarının potansiyel kayma yüzeyinin duvarı kestiği noktada kayma yüzeyi boyunca karşılaması gereken kuvveti bileşeni (F_d) hesaplayınız.



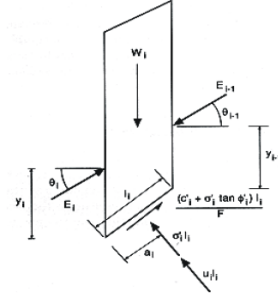
Dr. H. Sönmez –JEM719

EFEKTİF GERİLME ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bir dilime etkiyen kuvvetler ve limit denge analizlerindeki eşitliklerle bilinmeyenlerin sayısal durumu



Dilimlere etkiyen kuvvetler,
 W : Dilimin ağırlığı
 S : Dilim tabanında etkiyen makaslama kuvveti ($S = \tau l$)
 P : Dilim tabanında etkiyen normal kuvvet
 U : Dilim tabanında etkiyen su basıncı
 X : Düşey yönde etkiyen dilimler arası kuvvet
 E : Yatay yönde etkiyen dilimler arası kuvvet
 l : Dilim tabanının uzunluğu



(Prof. Dr R. Ulusay'ın JEO 620 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719

**Sadece kuvvet dengesi dikkate alındığında**

n tane dilim için:

Eşitlik	Bilinmeyenler	Sayısı
n: yatay yöndeki denge	F	1
n: düşey yöndeki denge	P	n
	X	n-1
	E	n-1
2n tane eşitlik	Bilinmeyen:	3n-1
	$3n-1-2n = n-1$	

kuvvet ve moment dengesi dikkate alındığında

n tane dilim için:

Eşitlik	Bilinmeyenler	Sayısı
n: yatay yöndeki denge	F	1
n: düşey yöndeki denge	P	n
n: moment dengesi	P'nin konumu	n-1
	X	n-1
	E	n-1
	E'nin konumu	n-1
3n tane eşitlik	Bilinmeyen:	5n-2
	$5n-2-3n = 2n-2$	

Problemin çözümü için bazı kabullerin yapılması gerekiyor !

(Prof. Dr R. Ulusay'ın JEO 620 ders notlarından)

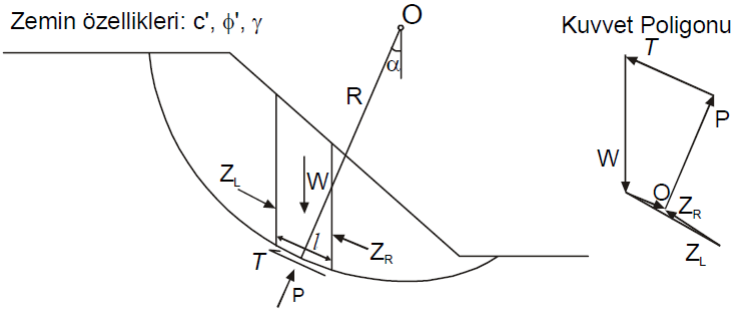
Dr. H. Sönmez –JEM719

(1) İsveç dilim (veya Ordinary veya Fellenius) Yöntemi

- Kayma dairesinin merkezine göre kaymaya karşı ve kaydırıcı kuvvetlerin moment dengesini dikkate alır ve **sadece dairesel kaymalar** için uygulanır.
- Dilime etkiyen karşılıklı dilimler arası kuvvetler eşit ve dilim tabanına paralel kabul edilir.
- Düşük (tutucu) güvenlik katsayısı verir. Özellikle düşük eğimli (flat) ve yüksek gözenek suyu basıncı olan şevlerde hatalı sonuçlar verir.
- Bishop gibi eşitliğin her iki tarafından güvenlik katsayısı bulunan iteratif (tekrarlı) çözümlerde başlangıç güvenlik katsayısı için kullanılabilir.

(Prof. Dr R. Ulusay'ın JEO 620 ders notlarından ve Turner ve Schuster 1996'dan düzenlenmiştir.)

Dr. H. Sönmez –JEM719



İsveç dilim yönteminde dilimlere etkiyen kuvvetler ile bunların konumları ve kuvvet poligonu (Nash, 1987; Prof. Dr R. Ulusay'ın JEO 620 ders notlarından)

$$T = \frac{1}{F} (c'l + (P - u'l)\tan\phi')$$

$$\sum W \sin\alpha = \sum \frac{1}{F} (c'l + (P - u'l)\tan\phi')$$

O noktasına göre moment dengesi:

$$\sum W r \sin\alpha = \sum TR$$

$$F = \frac{\sum (c'l + (P - u'l)\tan\phi')}{\sum W \sin\alpha}$$

P=Wcos α (tabana dik etkiyen kuvvet)

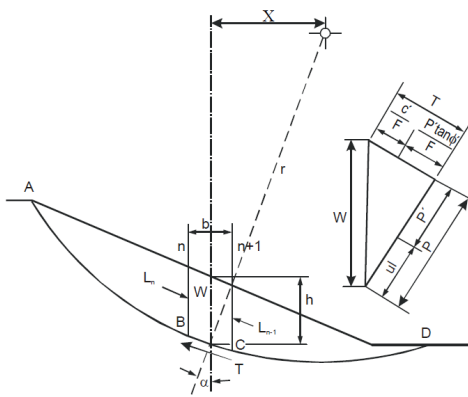
$$F = \frac{\sum (c'l + (W \cos\alpha - u'l)\tan\phi')}{\sum W \sin\alpha}$$

Dr. H. Sönmez –JEM719

(2) Bishop Yöntemi

- ✓ Bishop (1955) tarafından önerilen bir yöntemdir.
- ✓ Sadece moment dengesinin sağlandığı yöntem → Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi
- ✓ Moment ve kuvvet dengelerinin sağlandığı yöntem ise → Karmaşık Bishop Yöntemi
- ✓ Dilim yan yüzeylerine etkiyen kuvvetler (L) yatay kabul edilir.
- ✓ Kuvvet çözümlemesi düşey yönde (ki burumda dilimin yan yüzeyine etkiyen kuvvetler –L- çözüme dahil olmaz) yapılırken, ayrıca moment dengesi de sağlanır.
- ✓ Basitleştirilmiş Bishop yönteminde dilim yan yüzeylerindeki makaslama kuvvetleri de ihmal edilir.
- ✓ Sadece **dairesel kayma yüzeylerinin analizi** yapılabilir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Basitleştirilmiş Bishop yöntemi

W : dilimin ağırlığı
P : dilimin tabanında etkiyen normal kuvvet
T : dilimin tabanında etkiyen makaslama kuvveti
Z : dilimin yüksekliği
B : dilimin genişliği
L : dilim taban yayının (BC) genişliği (B ve C arasındaki doğru parçasının uzunluğu)
α : P kuvvetinin düşeyle yaptığı açı (dilim tabanının eğimi)
X : dilimin ortasından dönme merkezi O'ya olan uzaklık

$$F = \frac{R}{\sum Wx} \sum \left[\frac{c'l + (W - ul \cos \alpha + \frac{c'l \sin \alpha}{F}) \tan \phi'}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{F}} \right]$$

$$x = R \sin \alpha, \quad b = l \cos \alpha \quad \text{ve} \quad \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma z} = r_u \quad \text{eşitlikteki}$$

$$F = \frac{R}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[(c'b + W - (1 - r_u) \tan \phi') \frac{\sec \alpha}{(1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F})} \right]$$

Eşitliğin her iki tarafında güvenlik katsayısı (F) var. Çözümlemede başlangıçta eşitliğin sağ tarafındaki F için bir değer kabul edilir (genellikle Fellenius ile hesaplanan F kullanılır) ve hesaplana F ile eşitliğin sağ tarafına girilen F karşılaştırılır. Eğer fark 0.001'in altında değişse hesaplanan değer sağ tarafa F olarak kullanılır ve eşitlikte F tekrar hesaplanır ve tekrar sağ taraftaki F ile karşılaştırılır. Bu iteratif işlem fark 0.001'in altına inene kadar yapılır.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Basitleştirilmiş Bishop yöntemi için örnek bir hesaplama çizelgesi

Dilim No	z (m)	b (m)	W = zb	c' (°)	sin α	Wsin α (1)	c'b (2)	W(1-r _u)tan ϕ ' (3)	2 + 3 (4)	sec α	tan α	(5)		4 x 5 (6)	
												sec α		F =	F =
												F =	F =	F =	F =

- ❖ Bishop yöntemi Fellenius çözümünden daha yüksek güvenlik katsayıları üretir. Ayrıca her iki yöntem için belirlenen kritik yenilme dairelerinin merkezleri de çakışmaz.

Dr. H. Sönmez –JEM719

(3) Spencer Yöntemi



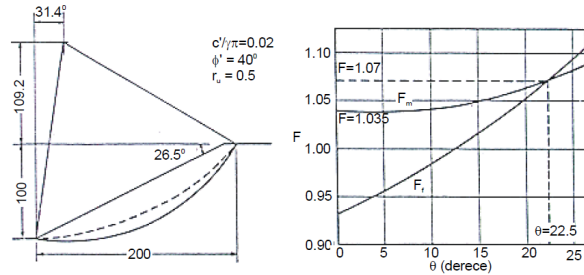
- ✓ Spencer (1967) tarafından önerilmiştir.
- ✓ Dilimlerin yan yüzeyine etkiyen kuvvelerin sabit bir θ açısı ile etkiği kabul edilir.
- ✓ Hem moment hemde kuvvet dengesini sağlar.
- ✓ Dairesel ve dairesel olmayan yüzeyler için uygulanabilir.

Bu yöntemde 2 farklı güvenlik katsayısı hesaplanır. Bunlar,

(a) Moment dengesi için F_m

(b) Dilimler arası kuvvetlere paralel yöndeki kuvvetlerin dengesi için F_f

olup, moment dengesi eşitliği Bishop yöntemindekiyle aynıdır. Analizlerde kullanılan θ değerlerine göre $F_f - F_m$ grafiği çizilir ve $F = F_m = F_f$ koşulu, diğer bir ifadeyle $F_f - \theta$ ve $F_m - \theta$ eğrilerinin kesim noktası incelenen kayma yüzeyinin güvenlik katsayısını verir



F_f ve F_m 'nin θ açısına bağlı değişimi (Spencer, 1967)

Dr. H. Sönmez –JEM719



(4) Morgensten-Price Yöntemi

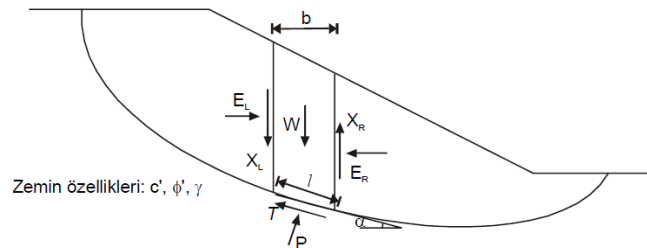
- Morgensten ve Price (1965) tarafından önerilen bu yöntem de dairesel ve dairesel olmayan kayma yüzeylerine uygulanır.
- Bu yöntemde kuvvetlerin, dolayısıyla gerilmelerin kayma yüzeyi boyunca sürekli değiştiği kabul edilir.
- Her dilimin tabanında etkiyen düşey ve yatay yöndeki kuvvetler çözümlenerek denge eşitlikleri elde edilir.

Dr. H. Sönmez –JEM719



(5) Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi

- Janbu (1973) tarafından önerilen bu yöntem, dairesel olmayan kayma yüzeyleri (dairesel başlayıp düzlemsel vb. şekilde devam) için kullanılır.
- Yöntemin basitleştirilmiş versiyonunda dilimlerin yan yüzeylerine etkiyen makaslama kuvvetlerinde $X_R = X_L$ koşulu ve dilimler arası kuvvetlerin de (X ve E) sıfır oldukları kabul edilir.
- Yatay yöndeki kuvvetlerin dengesi araştırılır ve düzeltilmemiş güvenlik katsayısı (F_0) hesaplanır ve f_0 düzeltme faktörü ile çarpılarak kayma yüzeyinin güvenlik katsayısı hesaplanır.

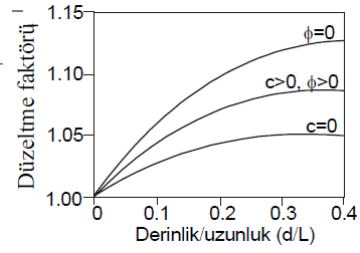
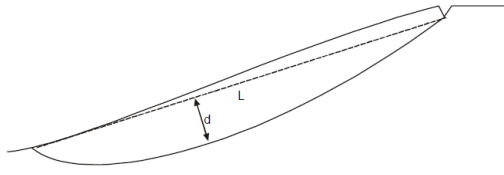


Dr. H. Sönmez –JEM719



$$F_0 = \frac{\sum (c'l + (P - ul) \tan \phi') \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha} \quad P = \left[W - \frac{1}{F} (c'l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha) \right] / m_\alpha$$

$$m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F} \right)$$



$$F = F_0 \times f_0$$

Eşitliğin her iki tarafında da güvenlik katsayısı olduğu için fark 0.001'in altına inene kadar iteratif işlem yapılır.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Etkin Gerilme Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntemin adı	Kayma yüzeyinin şekli	Sağlanan denge koşulları	Dilimler arası kuvvetlerle ilgili kabuller
Fellenius	Dairesel	Moment	Bileşke tabanına paralel
Basitleştirilmiş Bishop	Dairesel	Moment	Yatay
Karmaşık Bishop	Dairesel	Moment ve kuvvet	Dağılıma bağlı
Spencer	Dairesel ve daireysel olmayan	Moment ve kuvvet	Sabit eğim
Morgensten-Price	Dairesel ve daireysel olmayan	Moment ve kuvvet	$X/E = \lambda f(x)$
Basitleştirilmiş Janbu	Dairesel olmayan	Kuvvet	Yatay- düzeltme faktörü
Karmaşık Janbu	Dairesel olmayan	Moment ve kuvvet	İtke hattı yaklaşımı

Dr. H. Sönmez –JEM719

Değişik etkin gerilim analiz yöntemleriyle hesaplanmış güvenlik katsayısı değerlerinin karşılaştırılması (Fredlund ve Krahn, 1977)



Örnek No.	Parametreler	Fellenius Yöntemi	Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi	Spencer Yöntemi			Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi	Karmaşık Janbu Yöntemi	Morgenstern-Price Yöntemi	
				F	θ	λ			F	λ
1	2:1 şev, H=12 m, $\phi = 20^\circ$, c=29 kPa	1.928	2.080	2.073	14.81	0.237	2.041	2.008	2.076	0.254
2	1no. ile aynı, ince zayıf seviye ($\phi=10^\circ$, c=0)	1.288	1.377	1.873	10.49	0.185	1.448	1.432	1.378	0.159
3	1 nı ile aynı, sadece $r_u=0.25$	1.607	1.766	1.761	14.33	0.255	1.735	1.708	1.765	0.244
4	2no.lu ile aynı, sadece her iki malzeme için $r_u=0.25$	1.029	1.124	1.118	7.93	0.139	1.191	1.162	1.124	0.114
5	1 no. ile aynı, sadece piezometrik seviye hariç	1.693	1.834	1.830	13.87	0.247	1.827	1.776	1.833	0.234
6	2 no ile aynı, sadece her iki malzeme için piezometrik seviye hariç	1.171	1.248	1.248	6.88	0.121	1.333	1.298	1.250	0.097

Dr. H. Sönmez –JEM719

En küçük güvenlik katsayısının (F) karşılaştırılması



(i) Fellenius yöntemi:

- ✓ Özellikle derinden geçen kayma yüzeyleri için tutucu bir yöntem olup, yüksek su basınçlarının gelişmesi halinde gerçekte olması gerekenden %60'a varan daha düşük güvenlik katsayıları verir. Bu nedenle pek tercih edilmez.
- ✓ Su içermeyen şev koşulunda (drene olmuş şev) hata payı nispeten düşüktür.

(ii) Bishop yöntemi:

- ✓ Bu yöntemle hesaplanan güvenlik katsayısı, dilimler arası kuvvetlerle ilgili olarak yöntemin içerdiği varsayımlara karşı fazla duyarlı değildir.
- ✓ Karmaşık yöntemlerle hesaplanan güvenlik katsayılarına %0.1 gibi bir farkla çok yakın güvenlik katsayıları elde edilir. Bu nedenle, hesaplama aşamalarının daha basit olması da gözetilerek, en tercih edilen yöntemdir.

(iii) Tüm denge koşullarını dikkate alan yöntemler:

- ✓ Tümü hemen hemen aynı güvenlik katsayılarını verir ve bunlar arasındaki farklar $\pm\% 5$ civarındadır.

(iv) Janbu yöntemi sadece dairesel olmayan yüzeylere uygulandığı için, karşılaştırma yapılırken buna dikkat edilmeli ve dairesel kayma yüzeyleri için genel bir yaklaşım olarak kullanılmamalıdır.

(Prof. Dr R. Ulusay'ın JEO 620 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719

En Kritik Yenilme Yüzeyi, En Düşük Güvenlik Katsayısı Kavramları



- ✓ Bir şevde sonsuz sayıda yenilme yüzeyi ve her bir için farklı güvenlik katsayıları hesaplanabilir.
- ✓ Şevin duraylılığını kontrol eden **en düşük güvenlik katsayısı** olup, en düşük güvenlik katsayısının elde edildiği yüzey de **en kritik yenilme yüzeyi** olarak tanımlanır.

Bunların el ile yapılacak hesaplamalarla belirlenmesi mümkün değildir. Bu güçlüğün aşılmasında dünden bugüne aşağıdaki belirlemenin yapılması mümkündür.

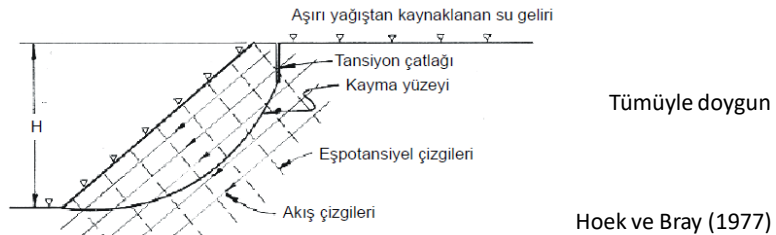
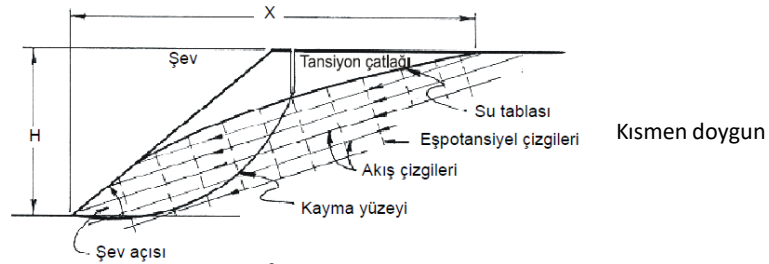
- ❖ Bilgisayarların ve ilgili yazılımların olmadığı veya erişiminin sınırlı olduğu yıllardaki yaklaşımlar
- ❖ Günümüzde bilgisayar yazılımları ile yapılan analizler

Dr. H. Sönmez –JEM719

Hoek ve Bray 1977'nin Dairesel Kayma Abakları



- Tek basamaktan oluşan genel şev profili
- Potansiyel yenilme yüzeyi topuktan geçen dairesel yüzey boyunca gelişir.



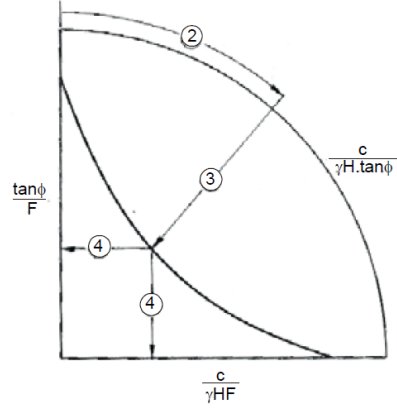
Dr. H. Sönmez –JEM719

Yöntemin uygulama aşamaları



Aşama-1: Su durumuna göre grafik numarasının belirlenmesi

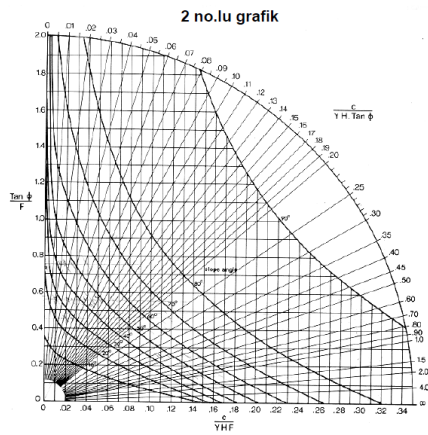
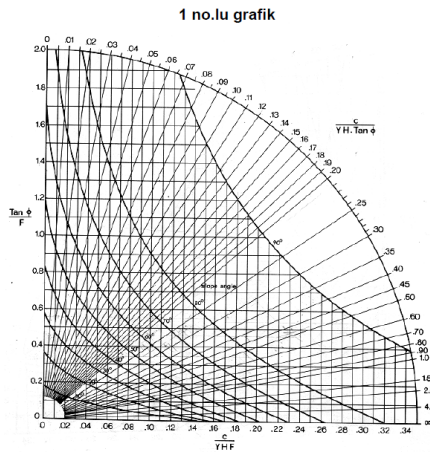
YERALTISUYU DURUMU	GRAFIK NO.
	1
DRENE OLMUŞ ŞEV	
	2
YÜZEYDEKİ SUYUN ŞEV TOPUĞUNA = 3 X ŞEV YÜKSEKLİĞİ OLAN UZAKLIĞI	
	3
YÜZEYDEKİ SUYUN ŞEV TOPUĞUNA = 4 X ŞEV YÜKSEKLİĞİ OLAN UZAKLIĞI	
	4
YÜZEYDEKİ SUYUN ŞEV TOPUĞUNA = 2 X ŞEV YÜKSEKLİĞİ OLAN UZAKLIĞI	
	5
TAMAMEN DOYĞUN ŞEV	



- Aşama 2:** $(c/\gamma H \tan \phi)$ hesaplanarak işaretlenir.
Aşama 3: Şev açısı eğrisine kadar uzatılır.
Aşama 4: düşey $(\tan \phi / F)$ veya yatay $(c / \gamma H F)$ ekseninden birine ulaşılarak belirlenen değerden F hesaplanır.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Yönteme ait grafikler

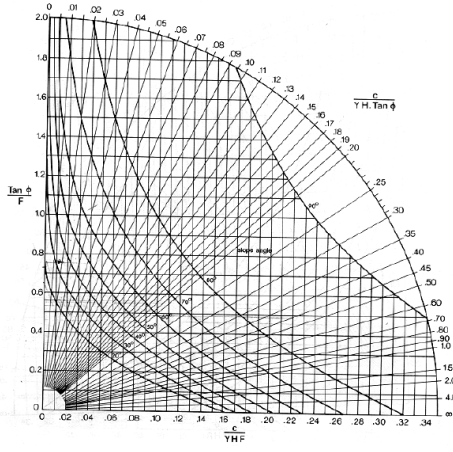


Dr. H. Sönmez –JEM719

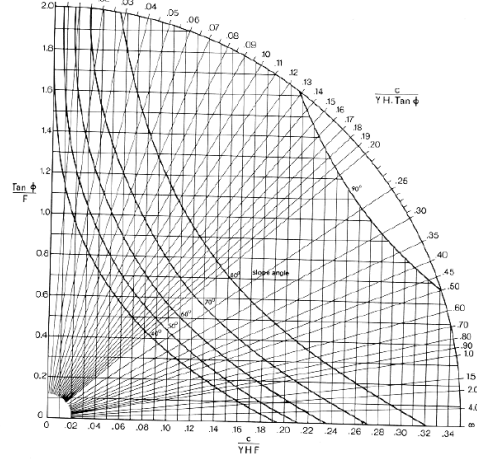


Yönteme ait grafikler

3 no.lu grafik



4 no.lu grafik

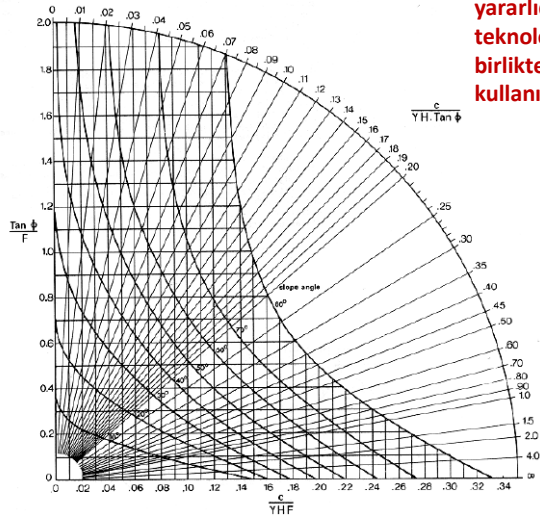


Dr. H. Sönmez –JEM719

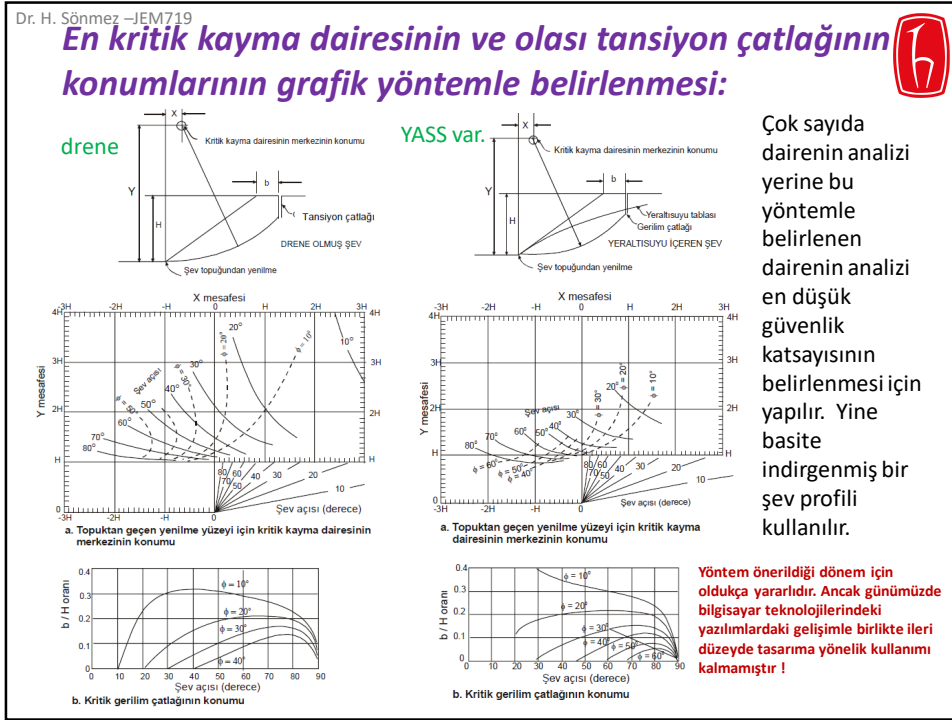


Yönteme ait grafikler

5 no.lu grafik



Yöntem önerildiği dönem için oldukça yararlıdır. Ancak günümüzde bilgisayar teknolojilerindeki yazılımlardaki gelişimle birlikte ileri düzeyde tasarıma yönelik kullanımı kalmamıştır !

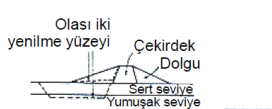


Dr. H. Sönmez -JEM719

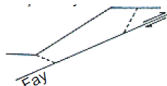
İki veya Çok Yüzeyle Ötelenmeli Kaymalar



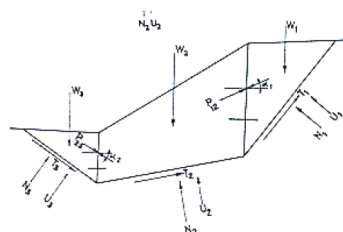
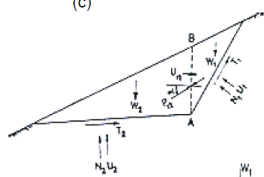
- ✓ Dolgu şevlerindeki kaymalar
- ✓ Zayıf bir taban malzemesi üzerindeki atıklar ve dolgu barajları gövdelerindeki kaymalar
- ✓ Tabakalanma, fay vb. gibi birbirini kesen süreksizlik yüzeyleri boyunca gelişen kaymalar



(c)



(d)



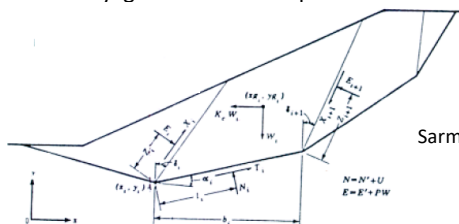
- ✓ İki veya daha fazla sayıdaki düzlemsel yüzey birleşerek yenilme yüzeyini oluşturur.
- ✓ Bu yöntem ayrıca aktif-pasif kama türü duraysızlık olarak da bilinir.

Dr. H. Sönmez -JEM719

Analiz Yöntemleri:

- Seed ve Sultan (1967) tarafından önerilen yöntem
- U. S. Army Corps. of Engineers (1970) tarafından önerilen yöntem
- Sarma (1973, 1979) tarafından önerilen yöntem
- Huang (1983) tarafından önerilen yöntem

Sarma Yöntemi daha yağın kullanıma sahiptir.



Sarma yönteminde bloklar arası kuvvetler

- ✓ Kritik sismik katsayı (FS=1) sağlayan hesaba dayanır
- ✓ İvme değerine bağlı olarak FS grafiksel sunumu yayındır.
- ✓ $K_c=0$ için statik durumdaki FS elde edilir.
- ✓ FS değeri, bloklar arasında etkiyen kuvvetlerin eğimine (δ_i) karşı duyarlı olup, $\delta_i = 0$ yaklaşımı tutucu, $\delta_i = \phi$ yaklaşımı ise yüksek güvenlik katsayılarının hesaplanmasına neden olur.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Eğrisel Yenilme Zarflarının Şev Duraylılığı Analizlerinde Kullanımı



Her bilim tabanındaki normal gerilme düzeyi için anlık içsel sürtünme açısı ve anlık kohezyon hesaplanarak analizlerde kullanılır.

