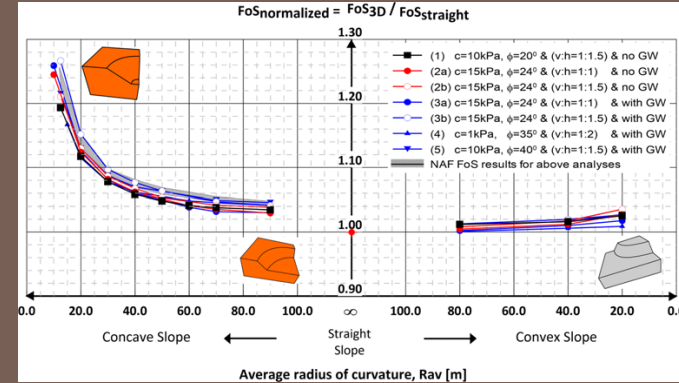
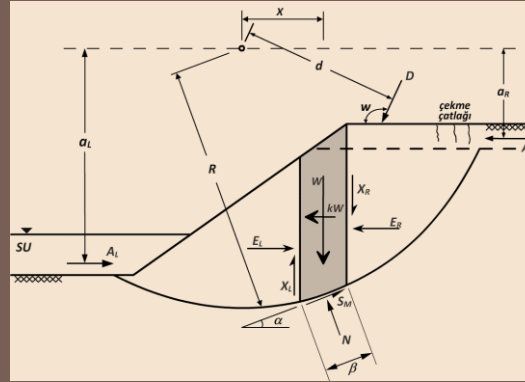
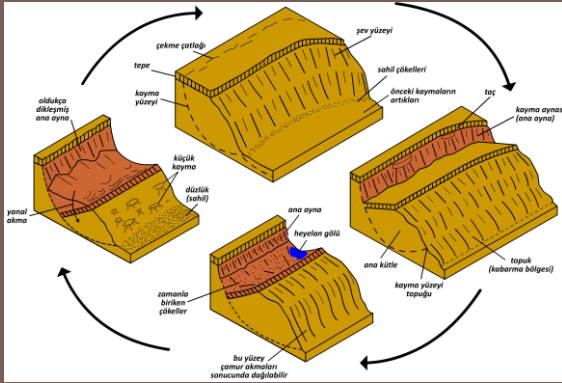


TMMOB  
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI  
İSTANBUL ŞUBESİ  
Geoteknik Eğitim Kursu - 2016

# ŞEVLERİN STABİLİTESİ



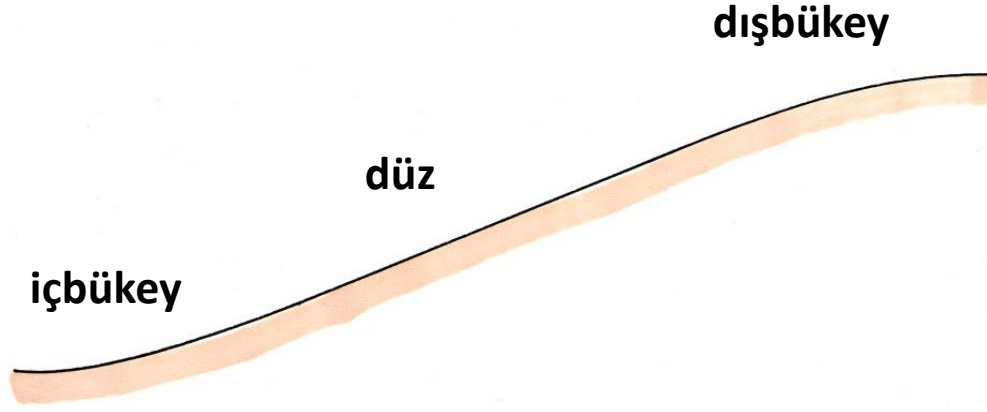
20/11/2016

Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

İstanbul Üniversitesi - İnş. Müh. Bölümü - Geoteknik AD Öğretim Üyesi

## Yeniler için ana başlıkların üstünden geçilecek, tecrübeliler için yeni yaklaşımlardan bahsedilecek...

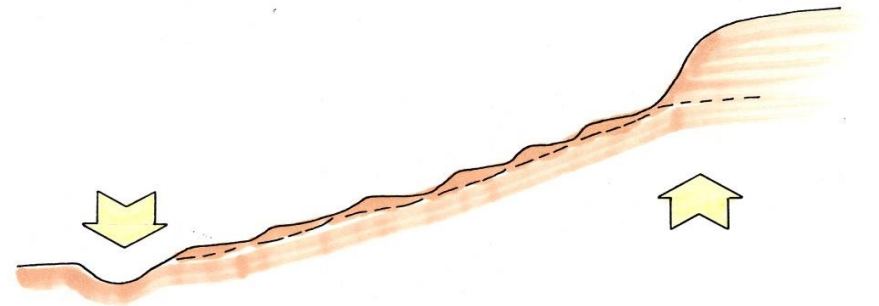
- Güvenlik Katsayısı
- İstanbul'dan Tipik Örnekler
- Esaslar
  - Arazi İncelemesinin Esasları, Parametre Seçimi, Deneyler
  - Yeraltı Suyu, Geri Analiz
  - Sismik Yükler Altında Tasarım
- Analiz Yöntemleri
  - Limit Dengeye Dayalı Yöntemler
  - Limit Denge Yaklaşımının Eksiklikleri
- Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanımı
- İyileştirme Teknikleri
  - Kazıklar
  - Aletsel Gözlem Esasları



**Buldukları çevre ile dengeli şevlerin tipik profili içbükey, düz ve dışbükeydir.**

**Dengede olmayan şevler ise yukarıdaki tanıma uymazlar ya da dalgalı bir profile sahiptirler.**

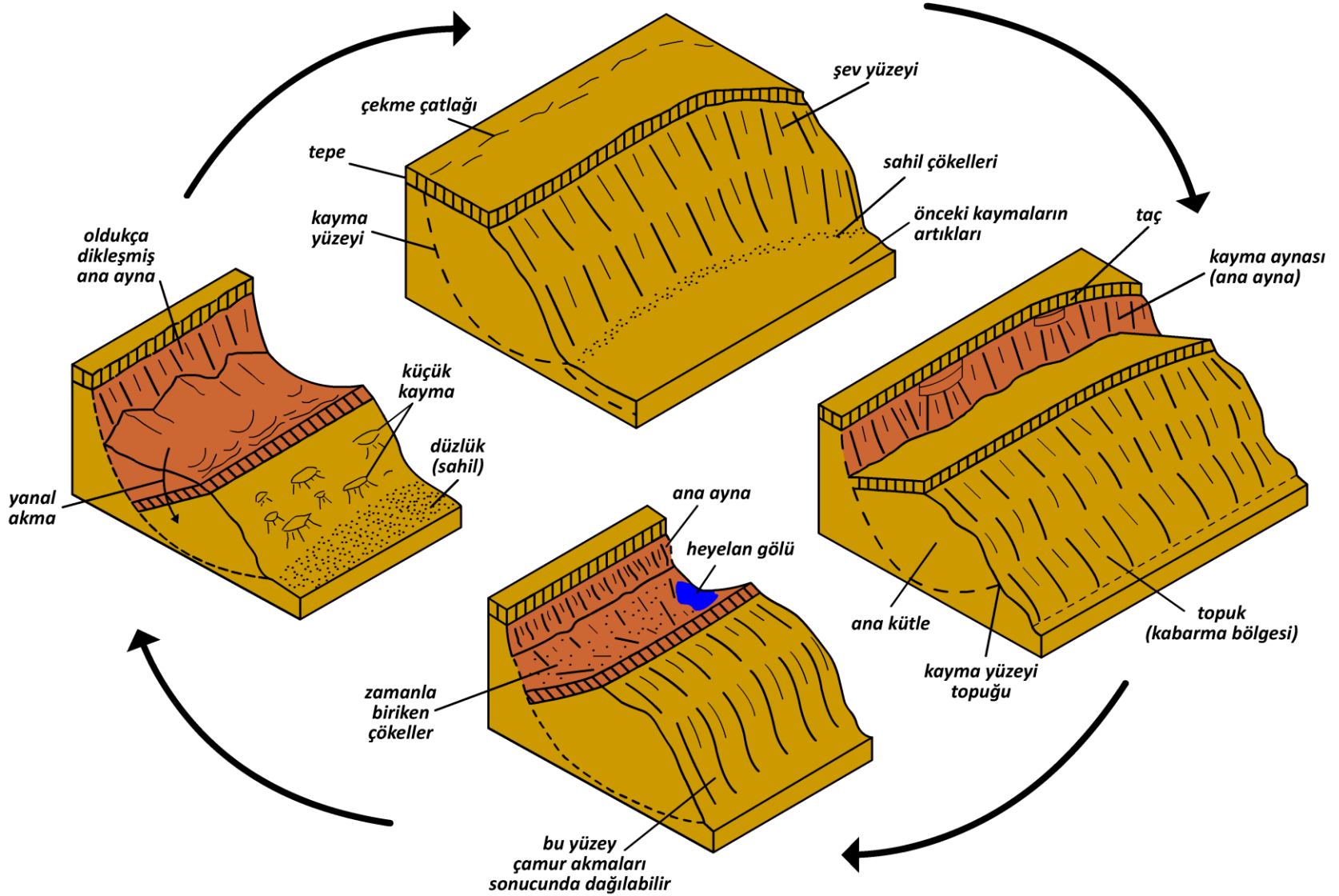
***(Rogers, sunumundan)***





# Eğimli bölgelerde gözlenen döngü

5



- Birçok inşaat faaliyetinin içinde dolgu ve yarma işleri doğal olarak yer almakta ve şev stabilitesi de göz önüne alınması gereken önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.
  - Liman, rıhtım ve dalgakıran projeleri
  - Karayolu ve demiryolu projeleri
  - Tünel portalları
  - Barajlar
- Afet İşleri verilerine göre ülkemiz bakımından depremden sonra gelen en tehlikeli afet heyelanlardır. Karadeniz, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bu konuda en riskli bölgelerdir.

Doğal Afet Türü	Yıkılmış Ünite Sayısı	Toplamın Yüzdesi
Depremler	495,000	76
Heyelanlar	63,000	10
Su Baskınları	61,000	9
Kaya Düşmeleri	26,500	4
Çığ Düşmeleri	5,154	1
TOTAL	650,654	100



# Heyelan Türleri

7

## Heyelan tehlikesine maruz iller

Derece	İl	Olay Sayısı	Riske maruz Nüfus
1	Trabzon	272	16,500
2	Kastamonu	229	13,800
3	Zonguldak	204	12,250
4	K.Maraş	201	12,100
5	Erzurum	155	9,300
6	Rize	151	9,100
7	Malatya	141	8,500
8	Sivas	137	8,200
9	Ankara	131	7,900
10	Erzincan	125	7,500
11	Sinop	120	7,300
12	Çorum	117	7,200
13	Bingöl	115	6,900
14	Artvin	114	6,850
15	İçel	108	6,500
<i>Toplam</i>		<i>2,320</i>	<i>139,900</i>

Kaynak: Afet İşleri Genel Müdürlüğü

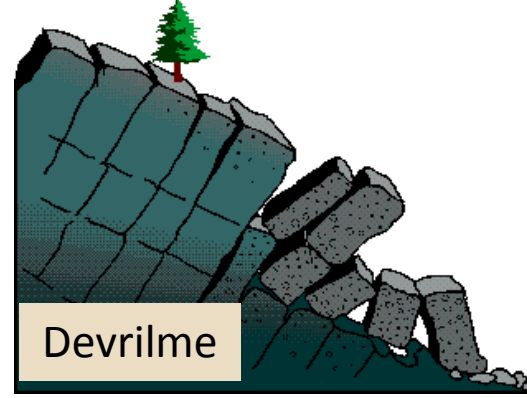
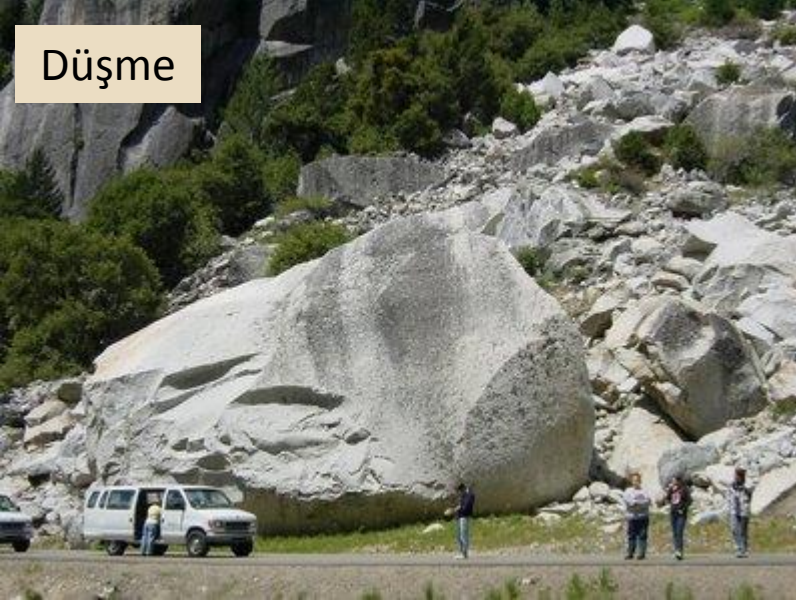
## Kaya düşmesine maruz iller

Derece	İl	Olay Sayısı	Riske maruz Nüfus
1	Kayseri	34	10,000
2	Niğde	28	8,400
3	Erzincan	20	6,000
4	Aksaray	18	5,400
5	Karaman	17	5,100
6	K.Maraş	16	4,800
7	Adıyaman	16	4,800
8	Sivas	14	4,200
9	Bitlis	13	3,900
10	Diyarbakır	12	3,600
11	Nevşehir	12	3,600
12	Mardin	10	3,000
13	Malatya	9	2,700
14	Hakkari	9	2,700
15	Kars	7	2,100
<i>Toplam</i>		<i>235</i>	<i>70,300</i>

# Heyelan Türleri

8

Düşme



Devrilme



Akma

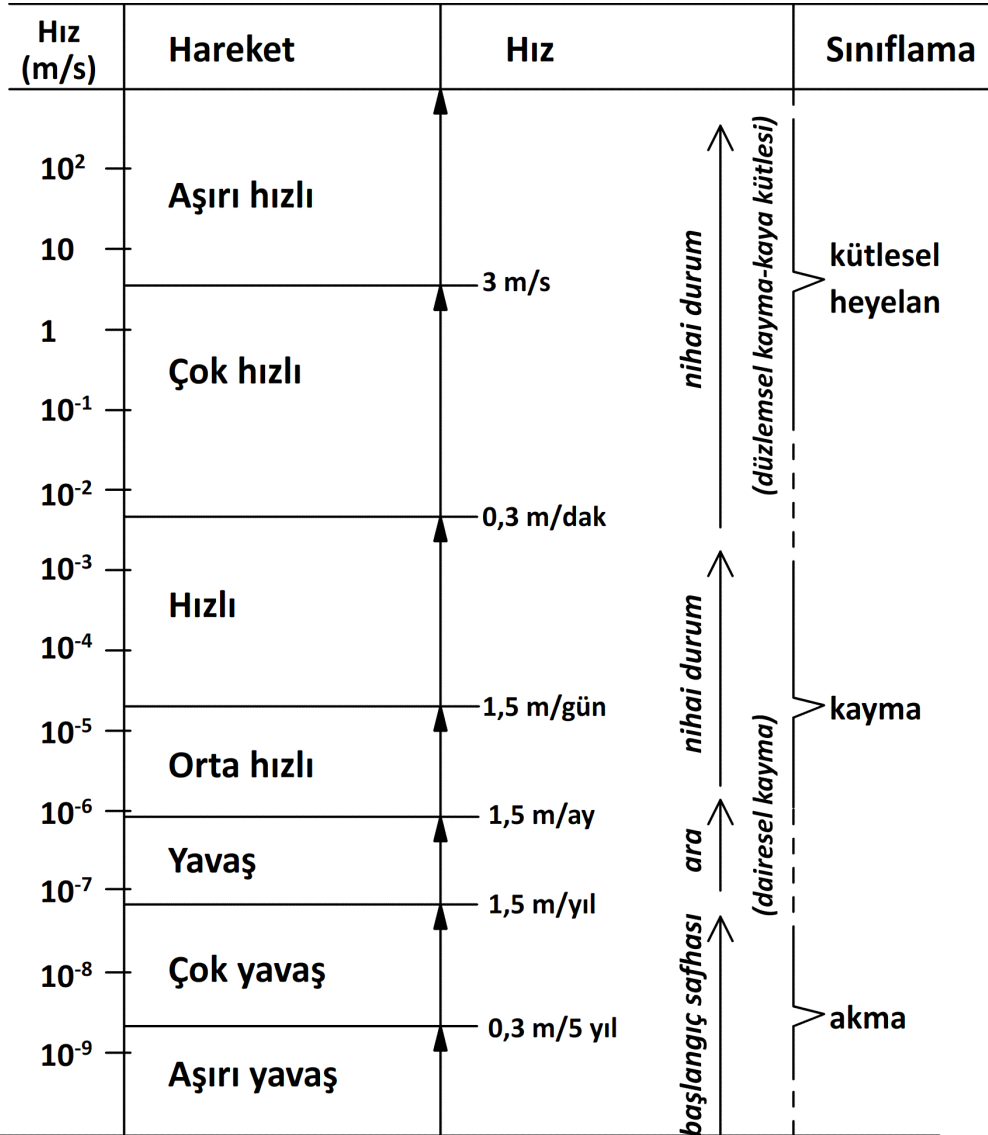
Kayma





# Heyelan Hızı

9



Şev hareketlerini tetikleyen ve hızını arttıran faktörler:

- Topoğrafya
- Zemin koşulları
- Hava durumu-iklim
- Sismik aktiviteler
- İnşaat faaliyetleri

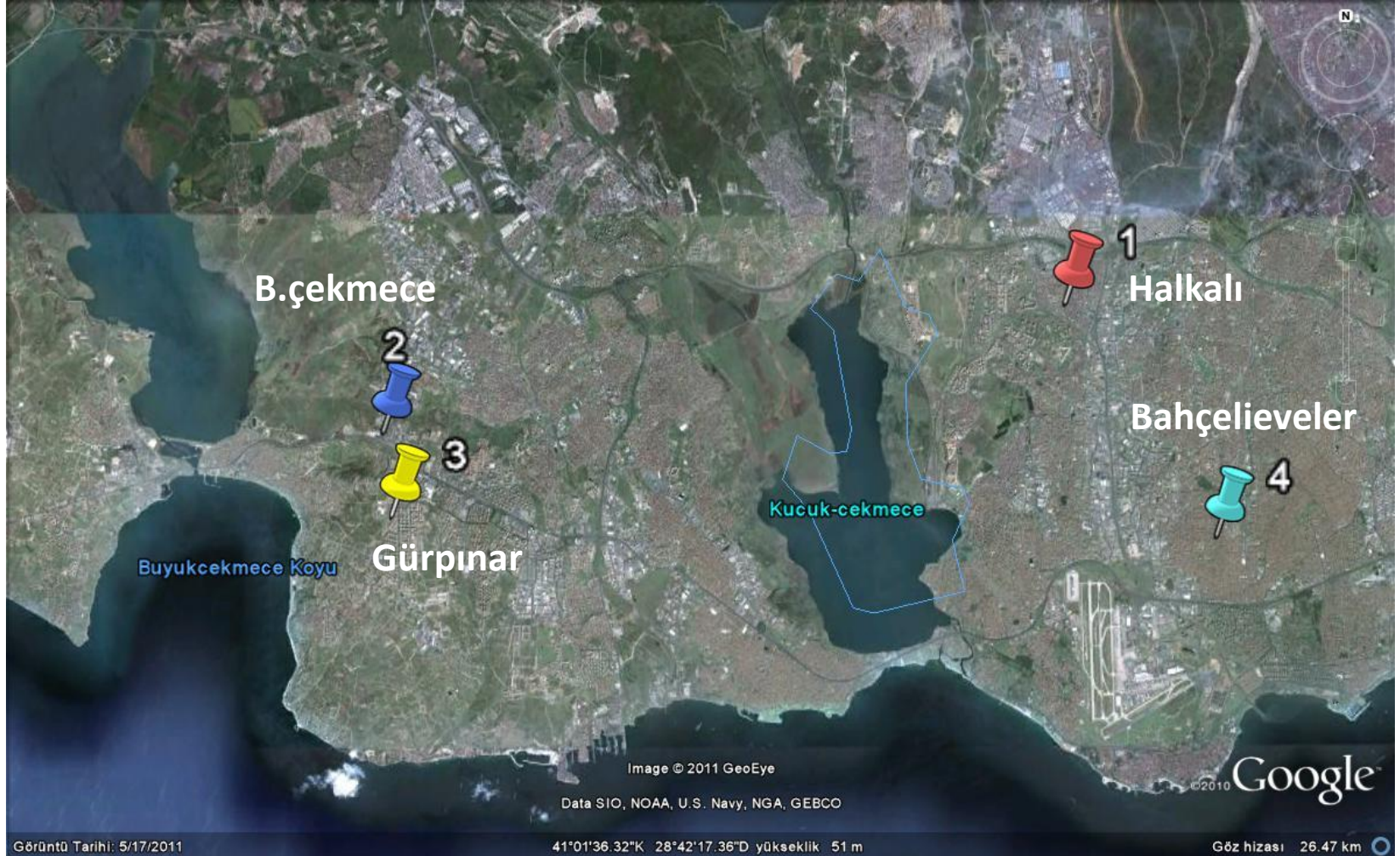
- Yeryüzünün dalgalı yapısı nedeniyle düzenli olarak heyelanlar oluşmaktadır.
- Metropollerdeki nüfus artışına paralel olarak güvenli yerleşim alanlarının azalmasıyla hemen hemen her tür zemin üzerinde inşaat yapmak bir ihtiyaç haline gelmiştir.
- Örneğin, İstanbul'un batısında yer alan yamaçlarda heyelan potansiyeli yüksektir.
  - Büyükçekmece-Beylikdüzü-Avcılar kıyı şeridi
  - Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölü kıyısı
  - Avcılar'da ilçesinde özellikle Ambarlı mevki
  - Esenyurt yerleşim bölgesi
  - Esenler-Güngören-Bahçelievler-Bağcılarda derin kazılar



# İstanbul için Örnekler

11

İstanbul içinde farklı yerleşim türlerinde oluşan, ölçek ve mekanizmaları farklı heyelanlar:

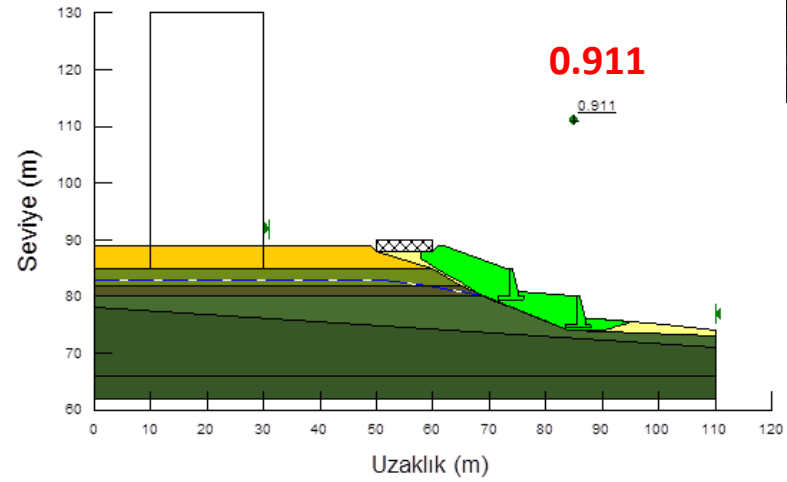




# Vaka – 1 : Halkalı

12

Aralık 2004





# Vaka – 1 : Halkalı

13

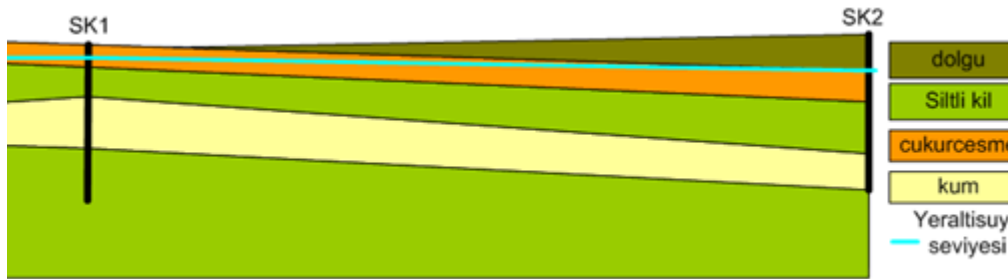
Mart 2005





# Vaka – 2 : Büyükçekmece

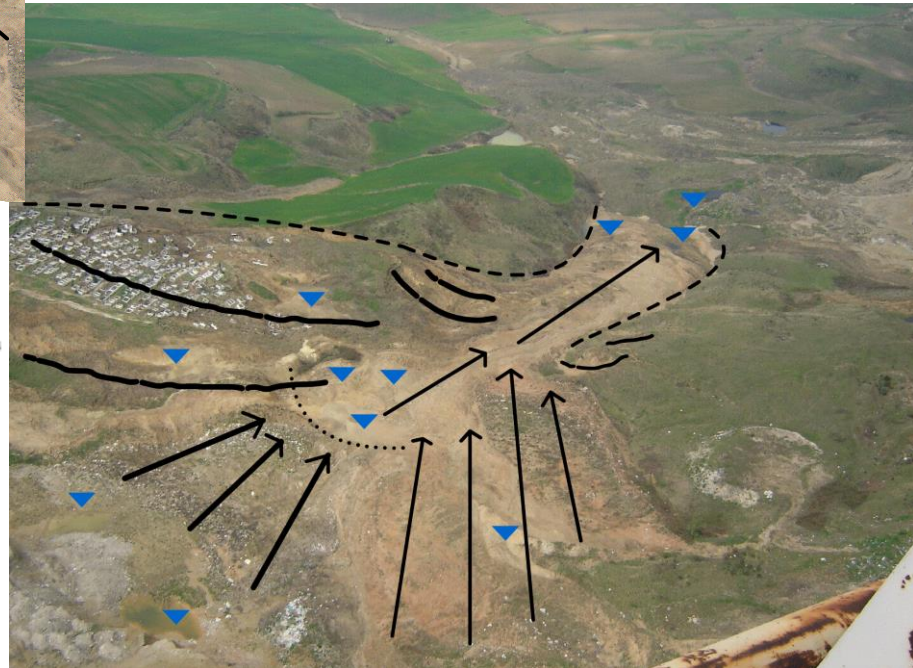
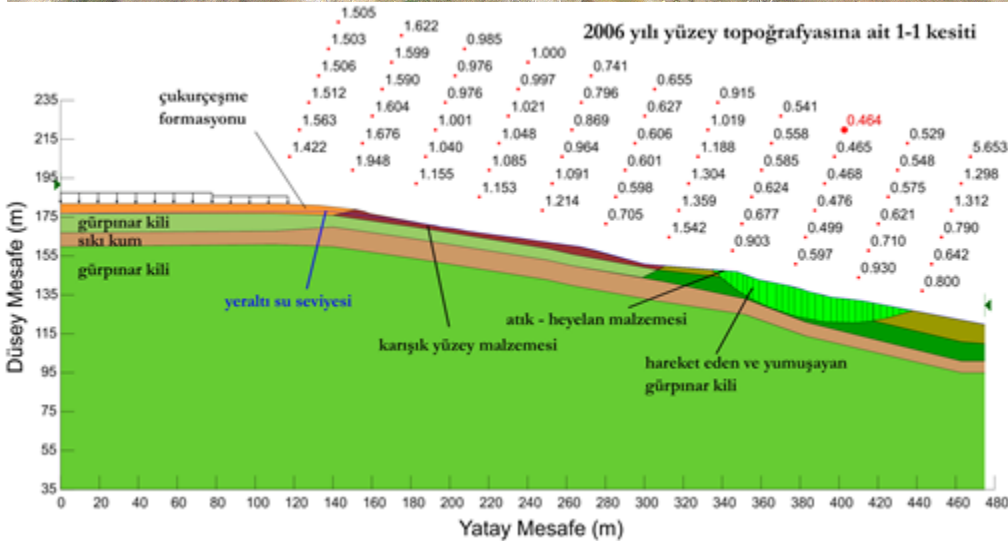
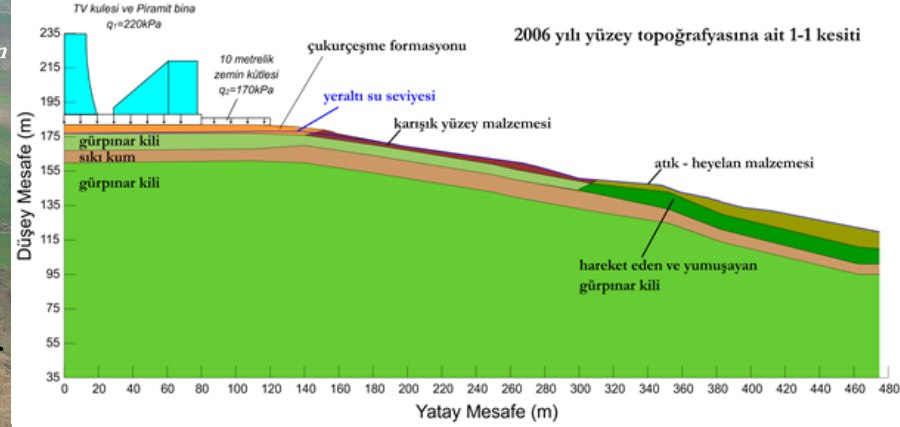
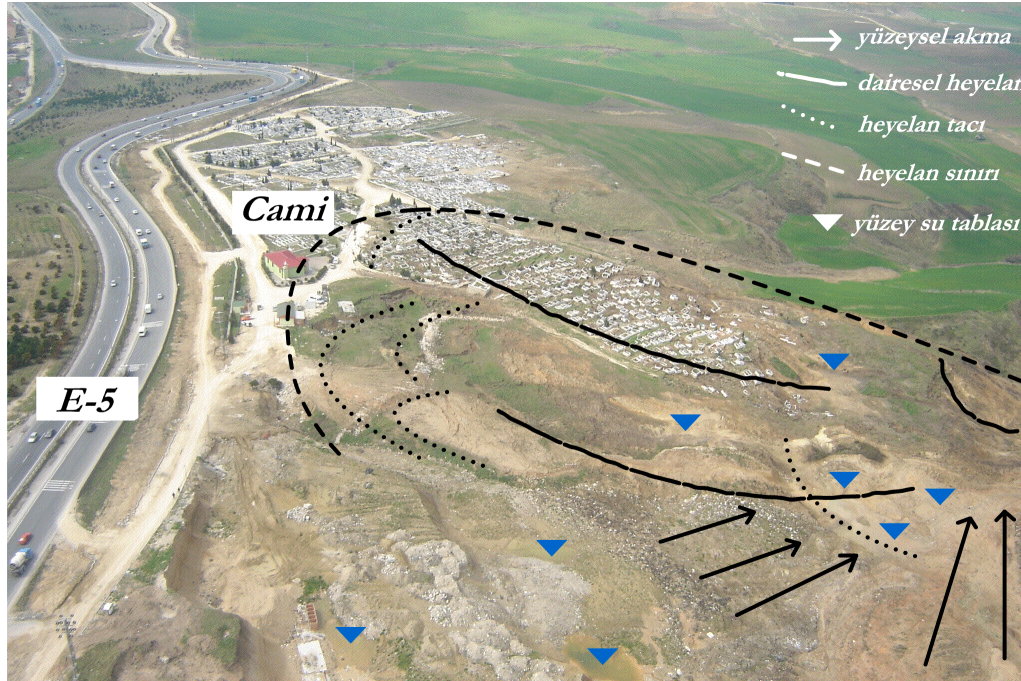
14





# Vaka – 2 : Büyükçekmece

15





# Vaka – 3 : Gürpınar

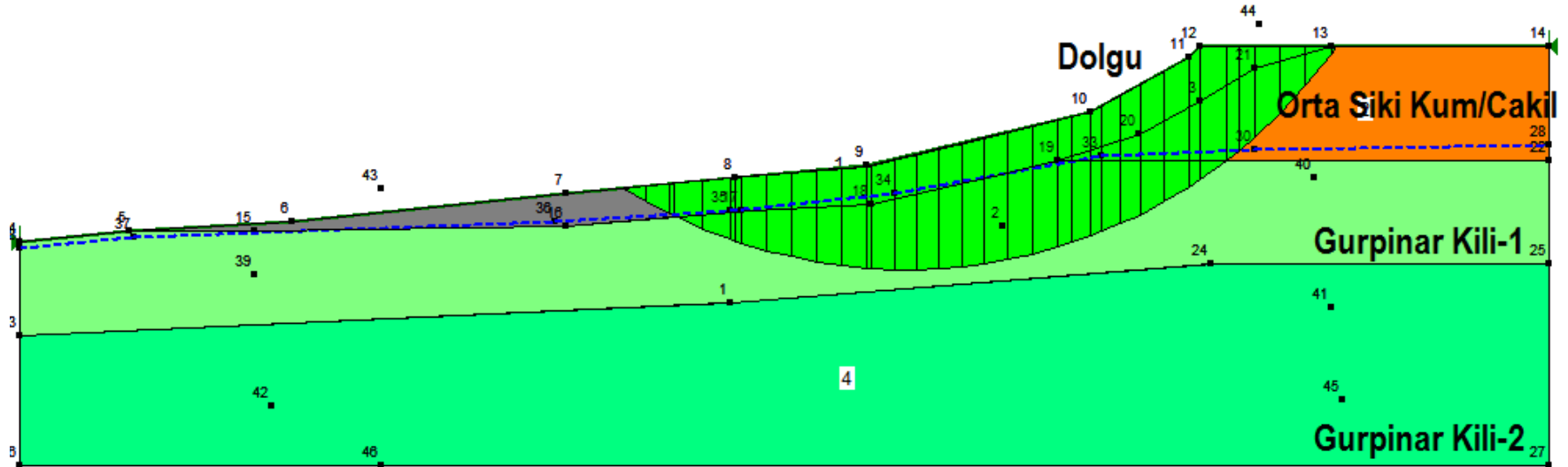
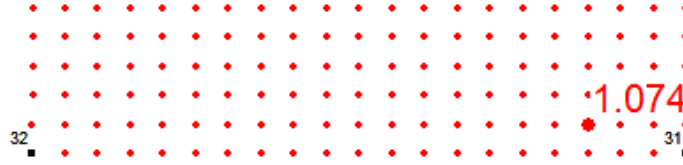
16





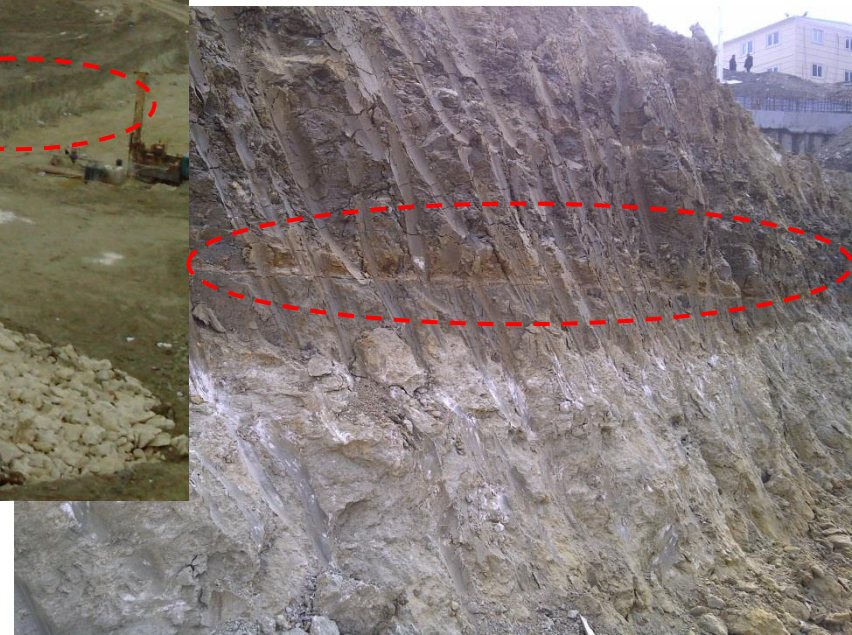
# Vaka – 3 : Gürpınar

17



# Vaka – 4 : Bahçelievler

18



# Herhangi bir Şev kesitini çözebilmek için ...

19

Bir Şev tasarımı için...

- ▣ Arazide durum tespit alıŐması.
- ▣ Kapsamlı arazi etütleri ve ölçüm çalıŐmaları (topografik ölçümler, deplasman, boşluk suyu basıncı vb).
- ▣ Ofis alıŐmaları-hesaplar ve rapor hazırlanması

Şev analizleri bakımından çok kritik üç soru vardır!

1. Bölgede daha önce heyelan gözlenmiŐ mi?
2. Yeraltı su seviyesi hangi derinliktedir ve mevsimsel deęiŐimi nedir?
3. ÇalıŐma alanı deprem bölgesinde midir?

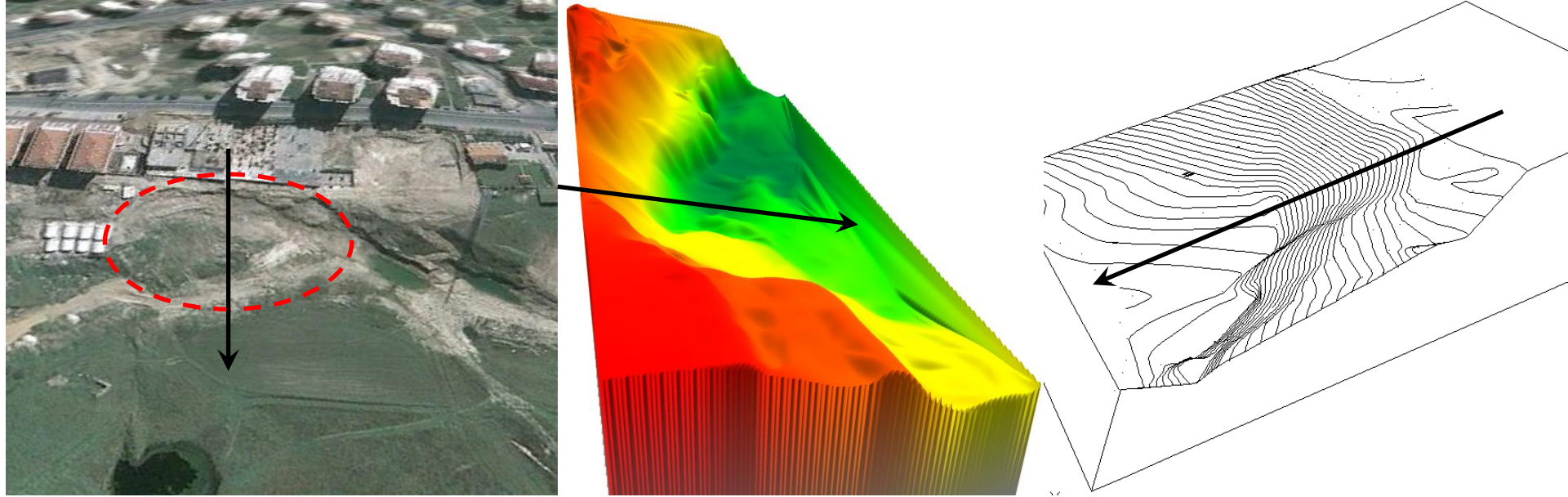


# Herhangi bir Şev kesitini çözebilmek için ...

20

Bir eğimli yüzeyin kayma potansiyelini hesaplamak için:

- topoğrafyasının (kot, plankote) bilinmesi
- kritik bir bölgeden uygun bir kesit alınması gerekir.



- İyi bir arazi ve laboratuvar çalışması yapılarak zemin tabakaları ve özellikleri ile yeraltı su seviyesi belirlenmelidir.



# Herhangi bir Şev kesitini çözebilmek için ...

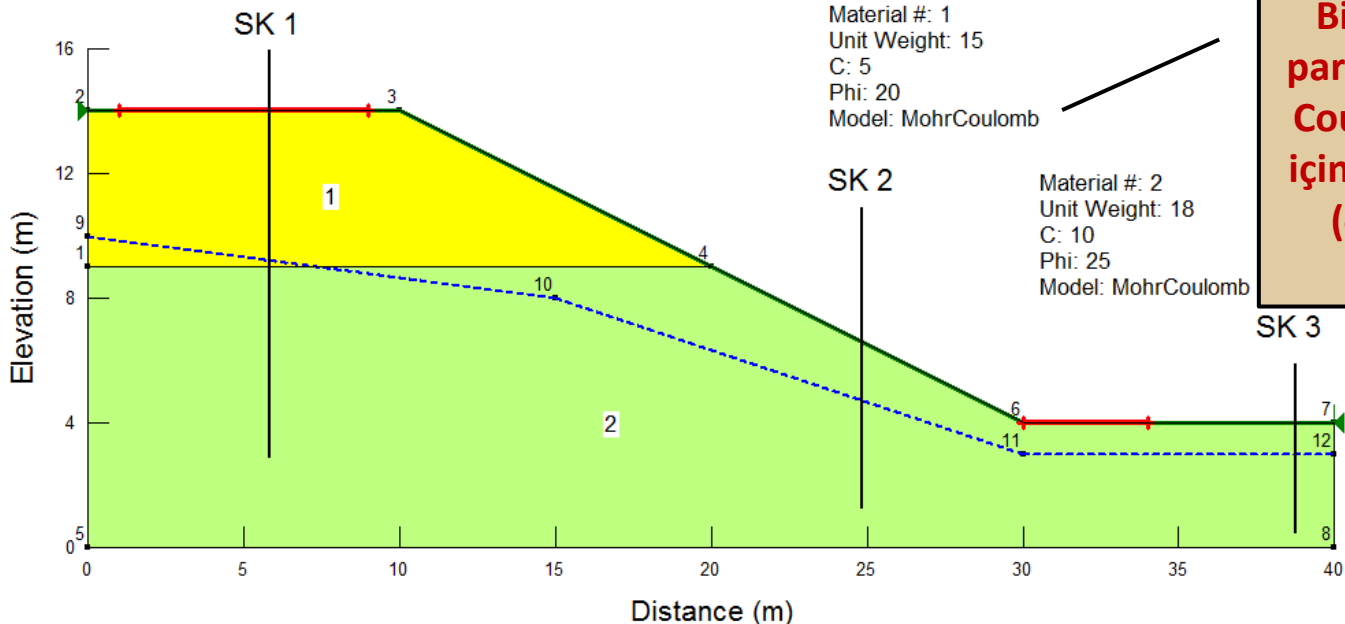
21

Diğer önemli husus ise özelliklerini ve sınırlarını iyi bildiğiniz bir yazılımdır. Günümüzde Şev analizleri mutlaka bir yazılım yardımıyla yapılmaktadır.



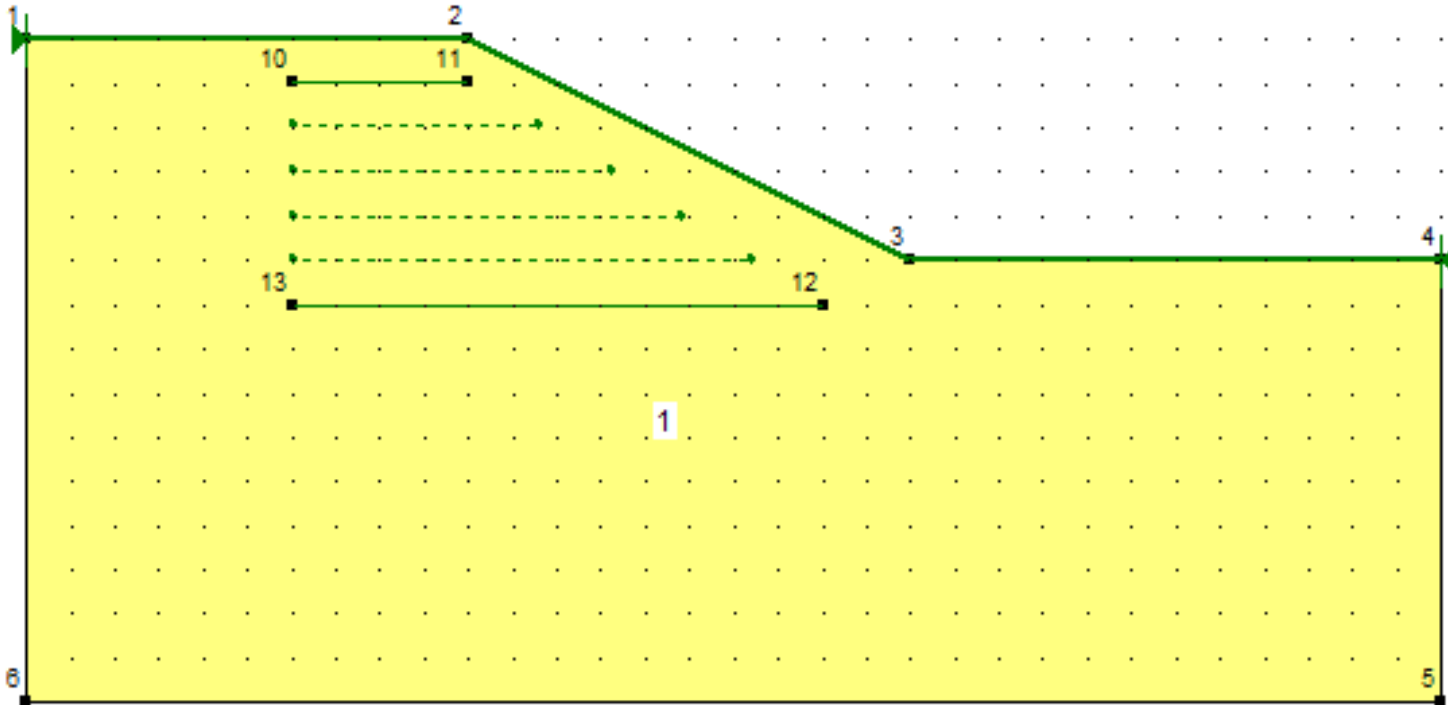
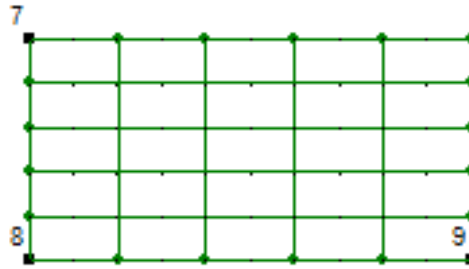
*Şev kaymalarının çok önemli olduğu Hong Kong'da bir yazılımın kullanılabilmesi için, söz konusu yazılımın o iŐi kontrol eden idare tarafından onaylanması-akredite edilmesi gerekmektedir.*

Tüm bu bilgiler bir arada kullanılarak Şev kesiti modellenir.



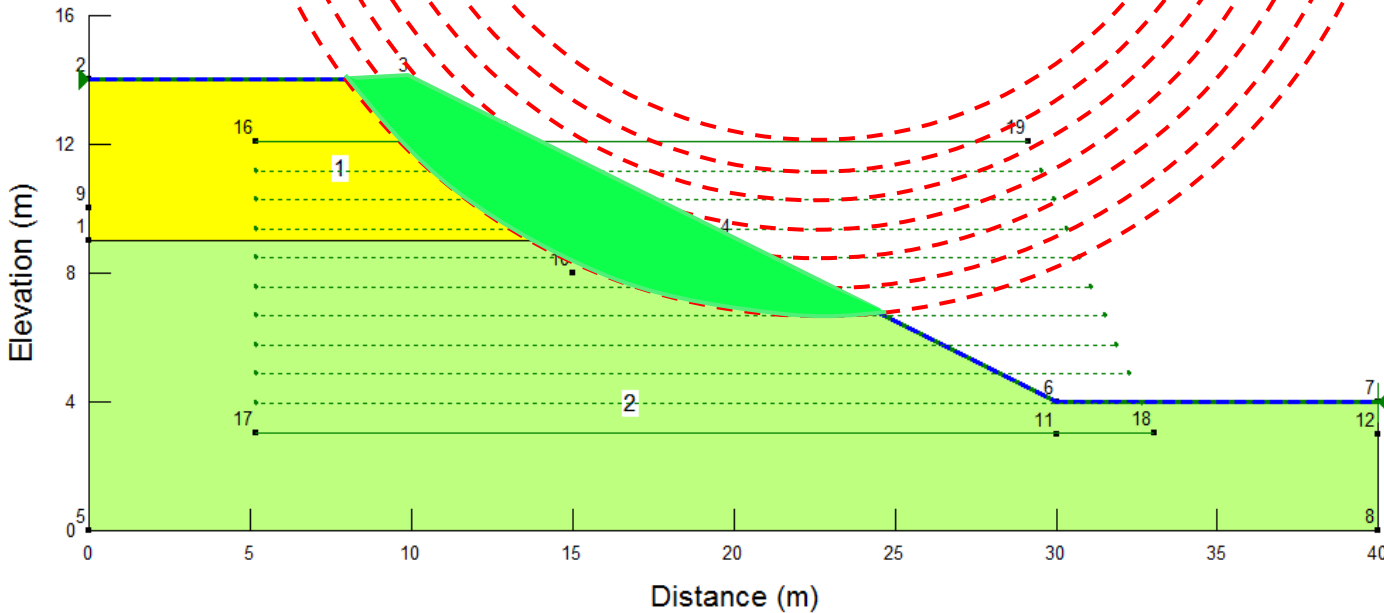
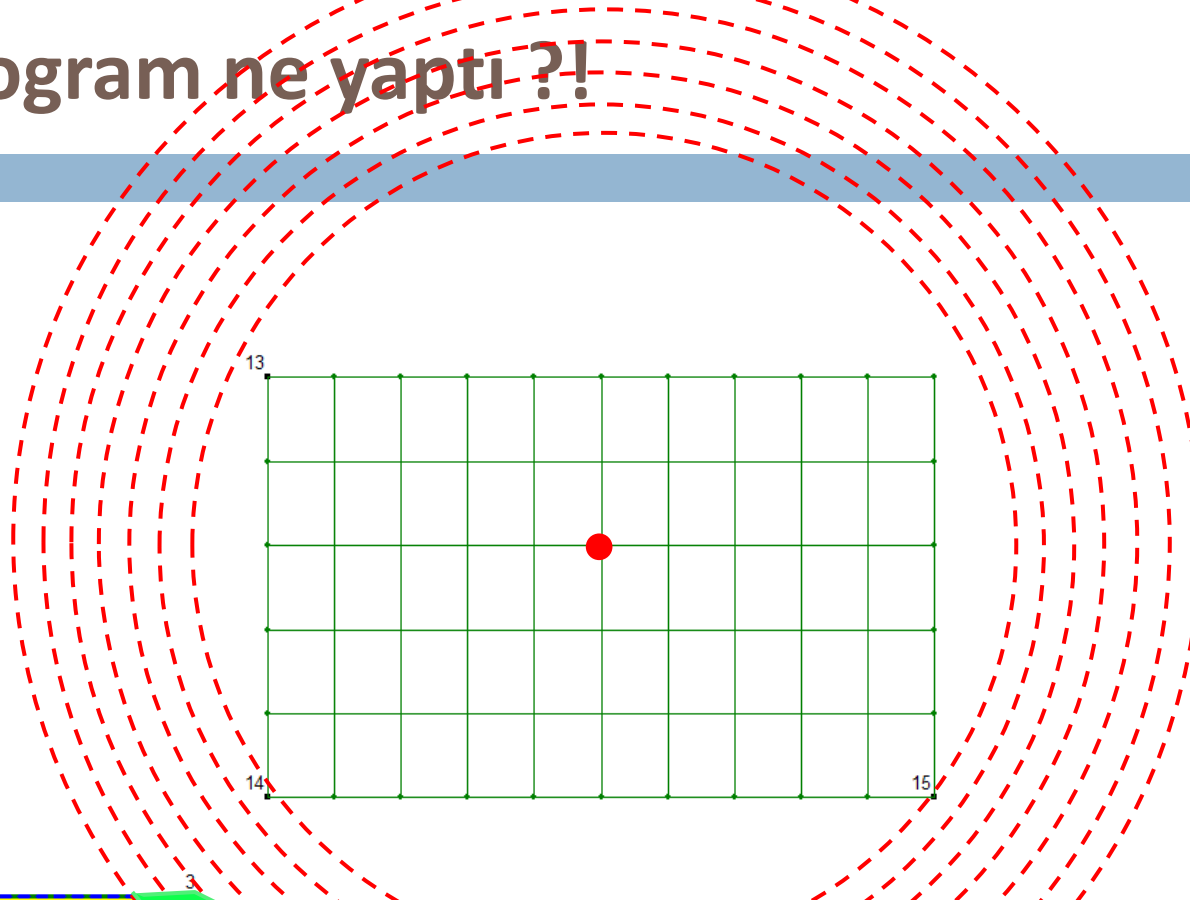
# Basit bir örnek çözelim...

22



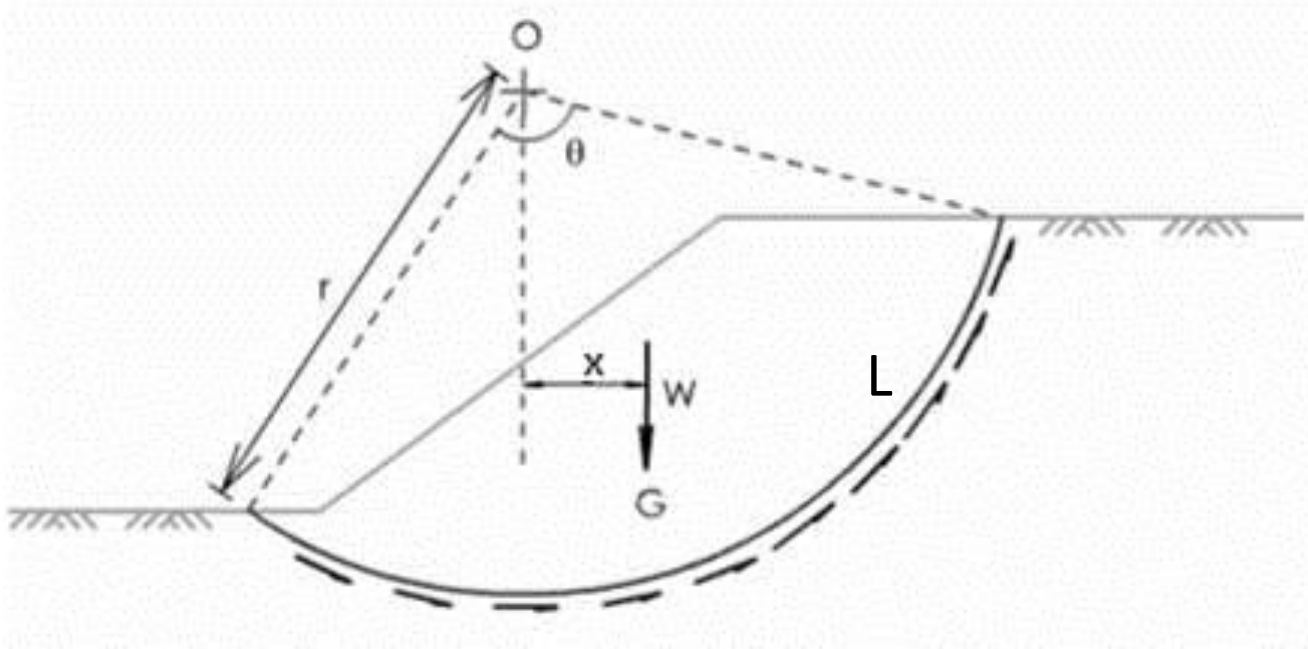
# Program ne yaptı ?!

23



# Moment dengesi...

24



Moment dengesinin sağlanabilmesi için

$$W \cdot x = c_u \cdot L \cdot r$$

L : yayın uzunluğu

$c_u$  : dren.siz kayma muk, birim sürtünme

**Ama yeterli değil...**



- Şev stabilitesi analiz yöntemlerinin yaklaşık 100 yıllık bir geçmişi bulunmaktadır. İsveçlilerin rıhtım ve demiryolları inşaatlarında karşılaştıkları zorlukları aşmak için yaptıkları şev analizleri ilk çalışmalar arasında gösterilmektedir.
- İsveç Demiryolları tarafından büyük ve maliyetli bir şev göçmesini incelemesi için görevlendirilen Geoteknik Komisyonunun geliştirdiği ve günümüzde **İsveç Kayma Dairesi yöntemi** (Jarnvagers, 1922) olarak bilinen yöntem şev stabilitesi analizleri arasında bir ilktir. Bu yöntemde göre şev hareketleri dairesel bir kayma yüzeyi üzerinde oluşmaktadır.
- **Fellenius (1927, 1936)** bu yaklaşımı geliştirerek **Dilim Yöntemi** ya da Fellenius Yöntemi olarak da bilinen yöntemi geliştirmiştir. Bu yaklaşımda kayma dairesi düşey dilimlere ayrılmakta ve şevin kayma güvenliği her dilimin stabilitesi hesaplanarak belirlenmektedir.

- Geoteknik Mühendisliğinin birçok alanında olduğu gibi şev stabilite hesaplarında da farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar iki başlık altında toplanabilir:
  - **Deterministik yaklaşımlar:** Hesaplanan güvenlik katsayılarının kesin olduğu düşünülen yaklaşımlar bu grupta yer alır.
    - Limit denge analizleri
    - Mukavemet Azalım Tekniği ve Sonlu Elemanlar Analizleri
  - **Probabilistik – Olasılıksal yaklaşımlar:** Zemin özelliklerinden veya hesaplamalardan kaynaklanabilecek belirsizlikler güvenlik katsayılarının hesabında olasılık teorileri kullanılarak dikkate alınır.
    - Monte Carlo Simülasyonu
    - Taylor Serisi Yöntemi
    - ...

# Dilim Yöntemi

27

## Diğer dilim yöntemleri:

Bishop (1955)

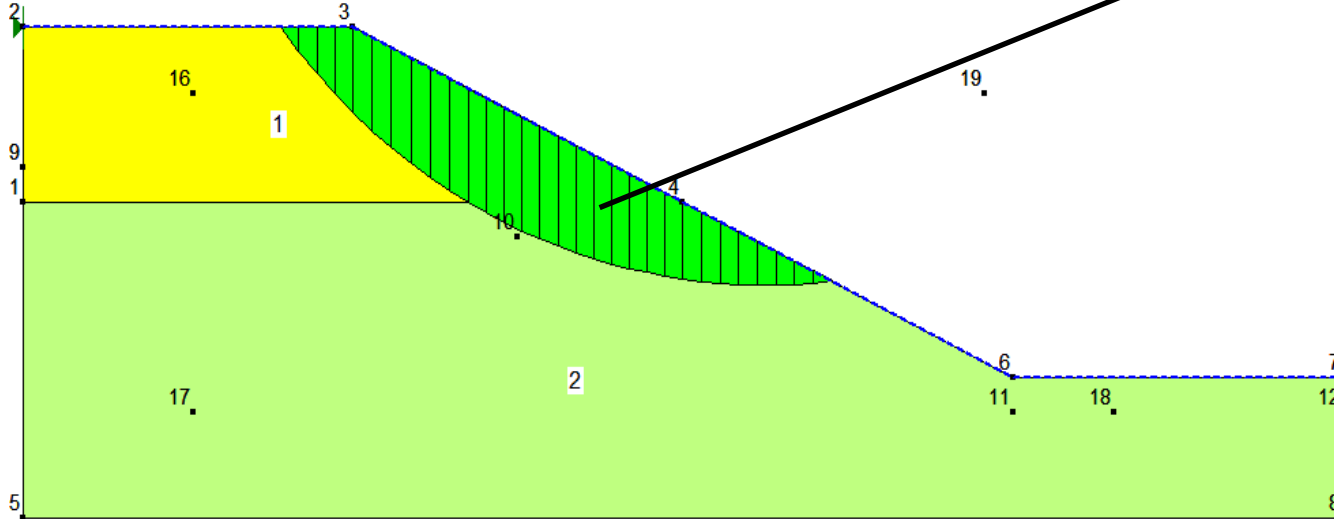
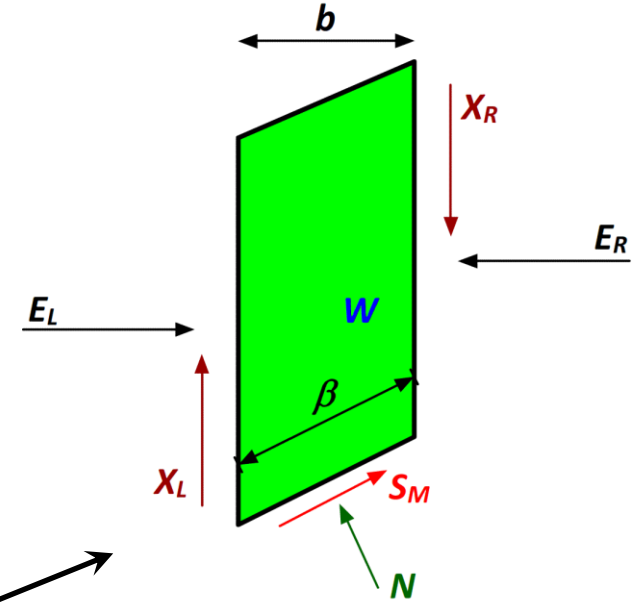
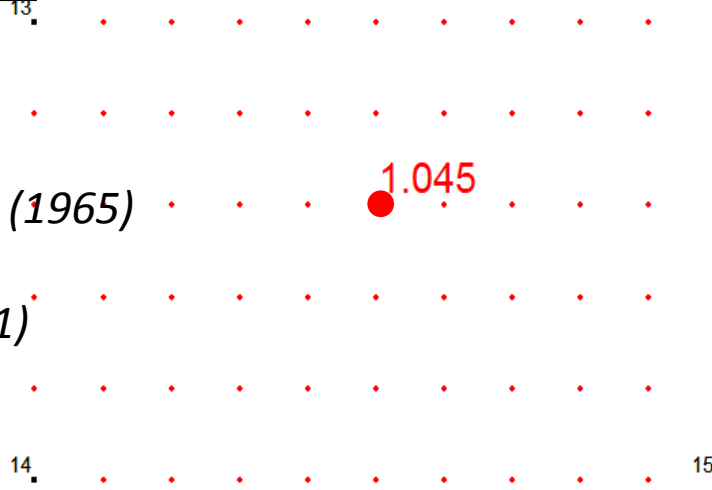
Janbu (1957)

Spencer (1967)

Morgenstern ve Price (1965)

Sarma (1973)

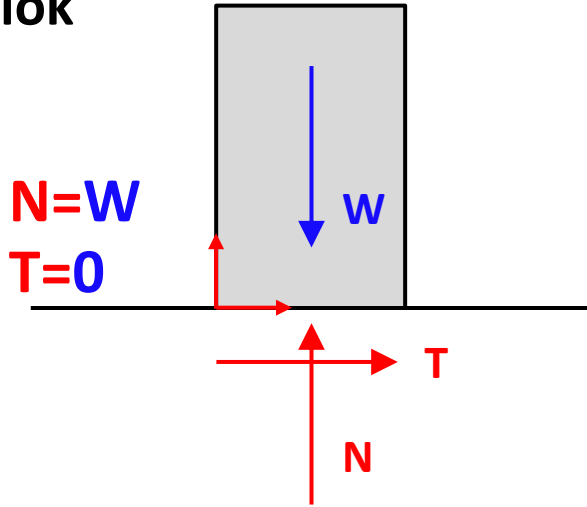
Fredlund ve diğ. (1981)



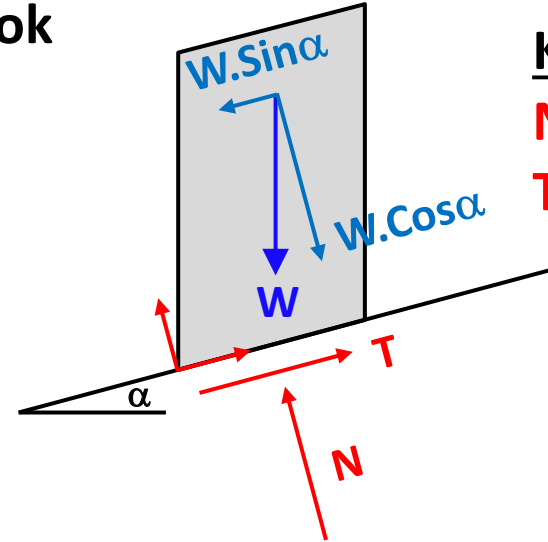
# Blok Üzerine Etkiyen Yükler – Dilim Yöntemi

28

Yatay yüzey üzerindeki  
bir blok



Eğimli yüzey üzerindeki  
bir blok



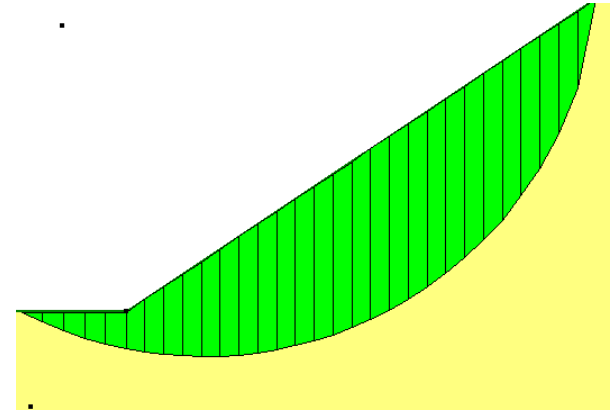
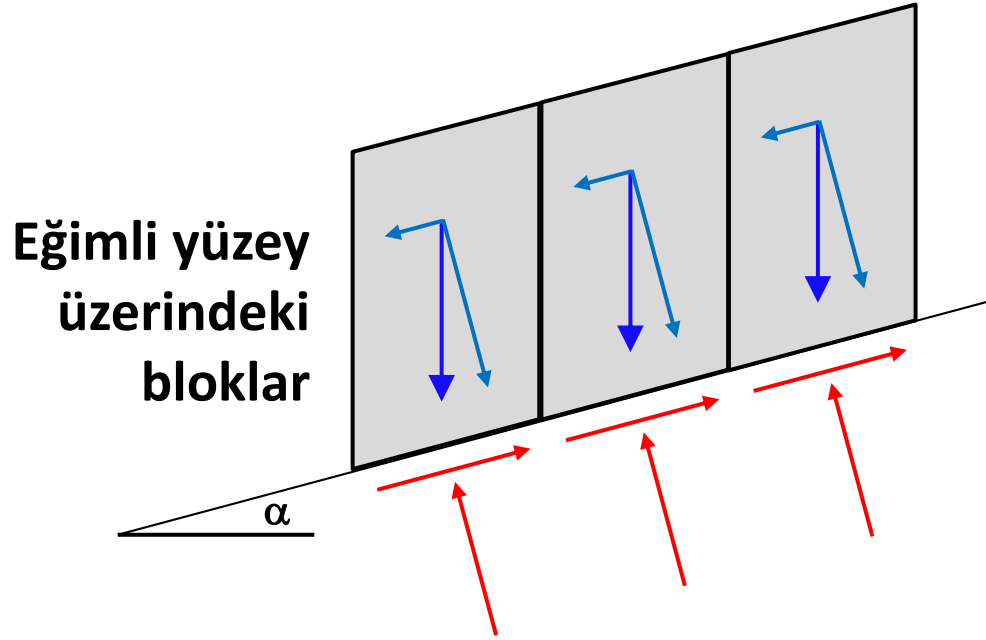
Kritik Denge

$$N=W \cdot \cos \alpha$$

$$T=W \cdot \sin \alpha$$

# Blok Üzerine Etkiyen Yükler – Dilim Yöntemi

29

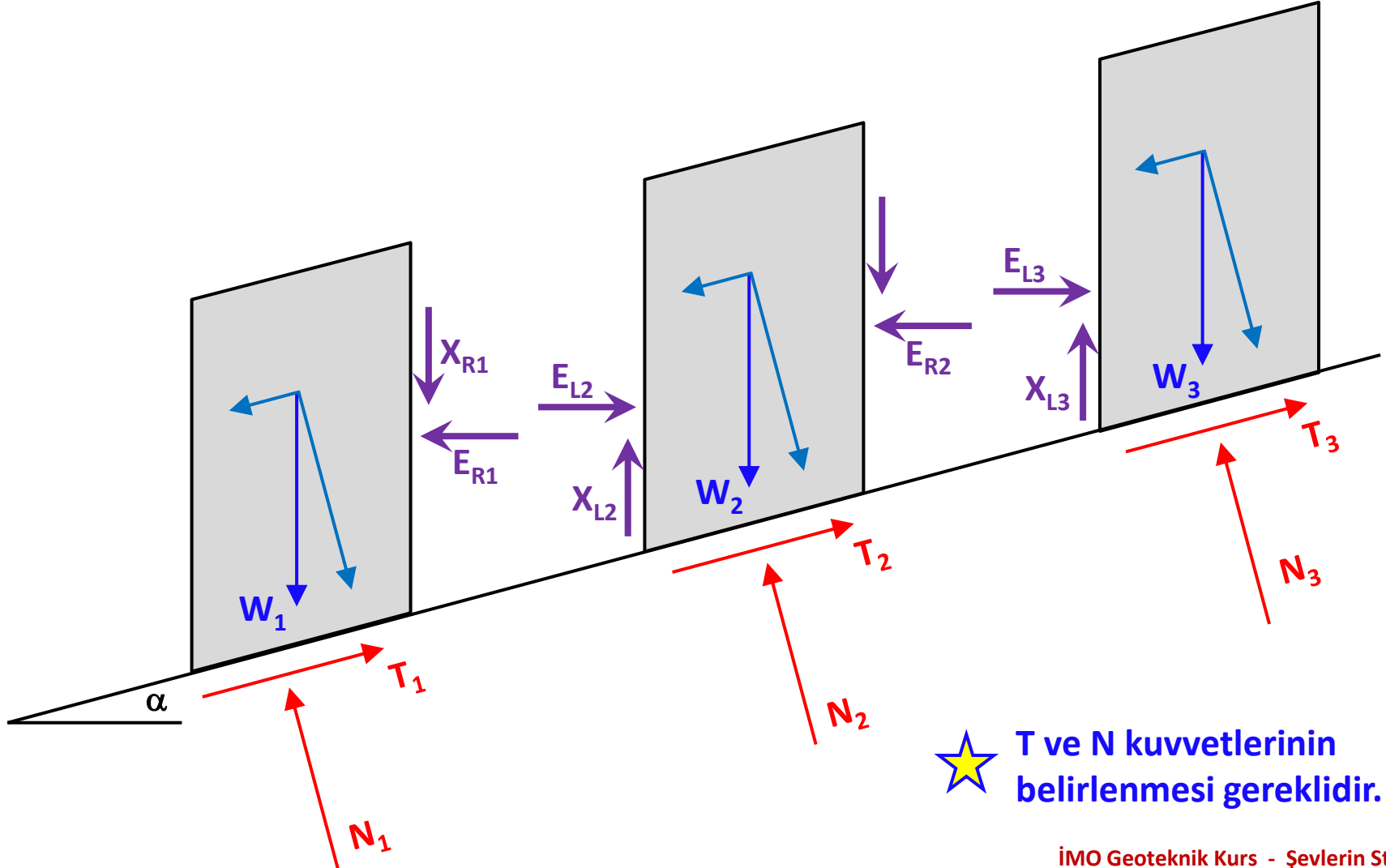




# Blok Üzerine Etkiyen Yükler – Dilim Yöntemi

30

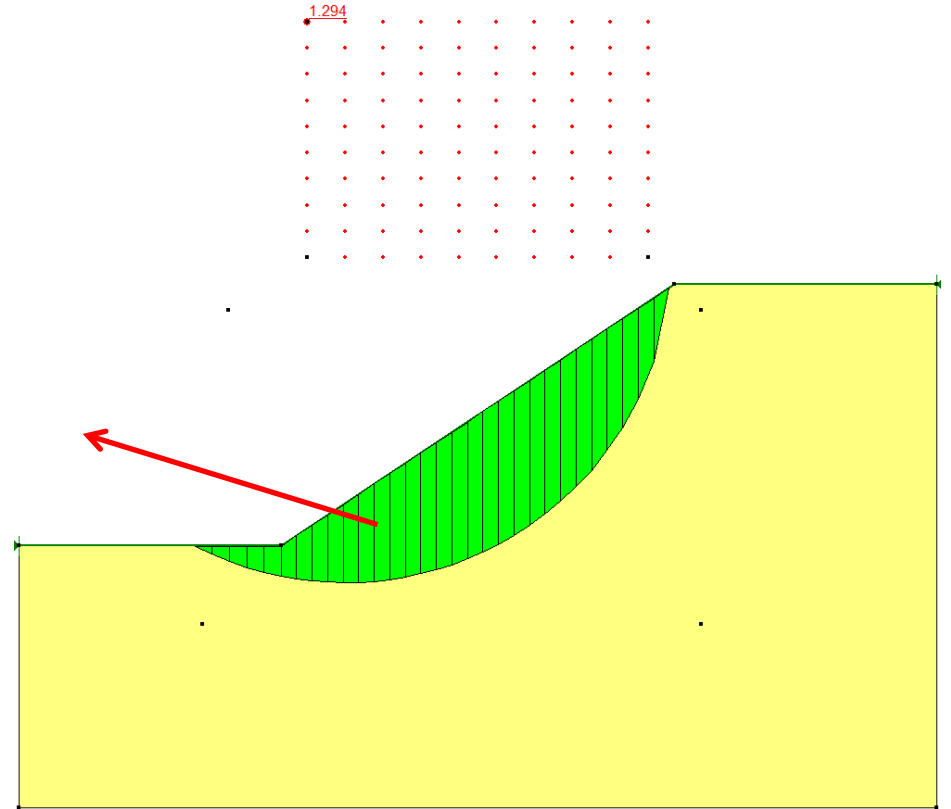
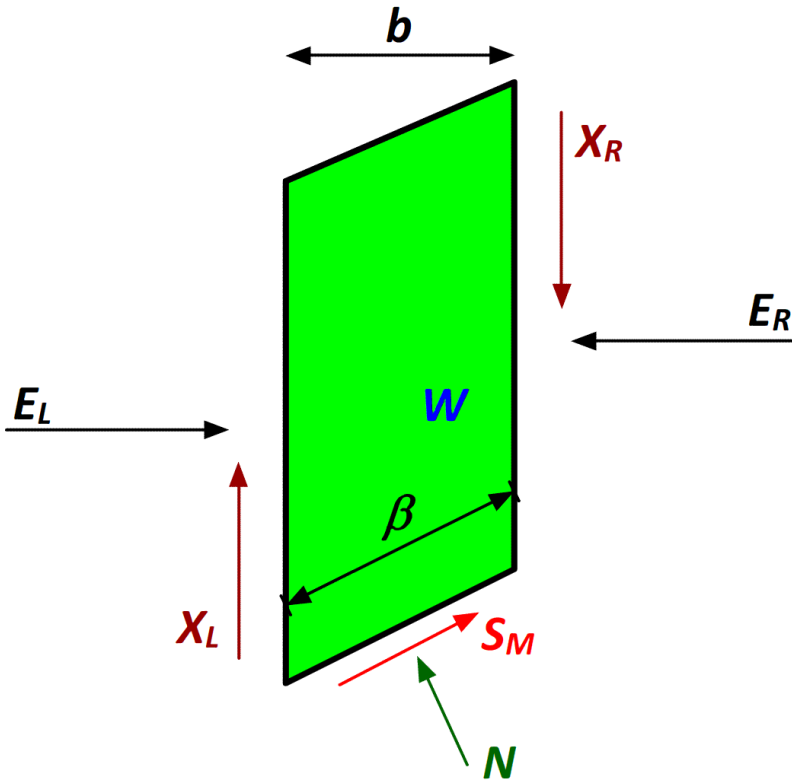
Eğimli yüzeyde aşağıya doğru hareket ederken bloklar arası etkileşim...



# Blok Üzerine Etkiyen Yükler – Dilim Yöntemi

31

Bir önceki sayfada gösterilen kuvvetlerin bazılarını hesaplamak mümkündür ancak bazıları kolay bir şekilde hesaplanamaz. Çözüm yöntemlerine geçmeden önce bunun nedenini açıklamak gerekir.



# Kuvvet ve Moment Dengesi Denklem Takımları

32

**Bilinen**

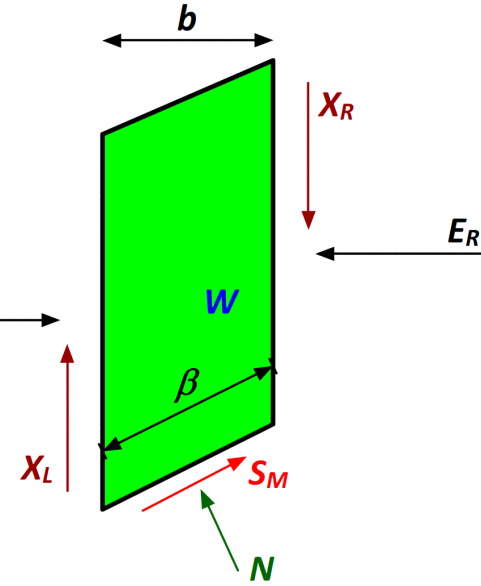
**Açıklama**

n	Her dilim için yatay yöndeki kuvvet dengesi, $\Sigma E$
n	Her dilim için düşey yöndeki kuvvet dengesi, $\Sigma X$
n	Her dilim için moment dengesi, $\Sigma M$
n	Malzemenin göçme şartı – Mohr Coulomb
4n	<b>Toplam bilinen sayısı</b>

**Bilinmeyen**

**Açıklama**

1	Güvenlik sayısı
n	Dilim tabanındaki normal kuvvet, <b>N</b>
n	N normal kuvvetinin dilim tabanındaki etki noktası
n	Dilim tabanındaki kayma kuvveti, <b>S<sub>m</sub></b>
n-1	Dilimler arası normal kuvvet, <b>E</b>
n-1	Dilimler arası kayma kuvveti, <b>X</b>
n-1	Dilimler arası kuvvetlerin etki noktası
<b>6n-2</b>	<b>Toplam bilinmeyen sayısı</b>



Sadece  $n=1$  olması durumunda her iki tablodaki denklem adetleri birbirine eşit olmaktadır. Bu durum tüm kayma dairesini ancak bir tane dilim ile temsil etmek anlamına gelmektedir.  $4n = 6n-2$

Bu yaklaşım gerçekçi olmayacağından güvenlik katsayısı hesabının statikçe belirsiz yani **hiperstatiktir** bir sistem çözümü olduğu görülmektedir.

Hiperstatik bir sistemi çözebilmek için kaçınılmaz olarak bazı kabuller yaparak bilinmeyen sayısını azaltmak gerekmektedir.

## Akla gelen ilk kabuller;

- dilim tabanından etkiyen **normal kuvvetin (N)** dilim tabanı orta noktasından etkimesi olabilir.
- diğer kabuller ise genellikle dilimler arası kuvvetlerin büyüklüğü, doğrultusu ya da etki noktası ile ilgilidir.



İlerleyen sayfalarda açıklanacak yöntemler;

- güvenlik sayısının belirlenmesinde kullanılan denge denkleminde **(düşey, yatay kuvvet ya da moment)** ve
- sistemi izostatik hale çevirmek için dilimler arası kuvvetlerle ilgili kabullere bağlı olarak adlandırılmaktadır.

Örneğin, **Basitleştirilmiş Bishop yöntemi** (1955) (i) **yatay ve düşey kuvvet dengesini** dikkate almakta ve (ii) **dilimler arası kayma kuvvetini ihmal** etmektedir.

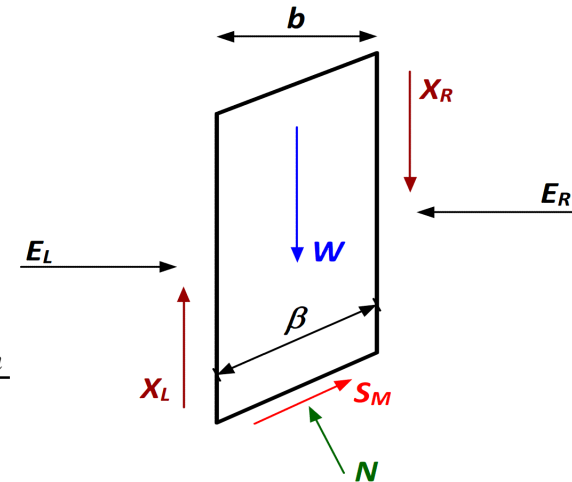
Bunun yanında, **Spencer** (1967) (i) **üç denge denklemini de dikkate alırken** dilimler arasındaki (ii) **kayma ve normal kuvvetleri sabit bir oran** ile tanımlamaktadır.

# Fellenius Yöntemi

35

- Dilim tekniğinin ilk olarak kullanıldığı yöntemdir.
- Son derece basit bir yöntem olduğu için el hesabı ile güvenlik sayısı belirlenebilir.
- Bu yöntemde dilimler arası tüm kuvvetler ihmal edilir.
- Dilim ağırlığı, dilim tabanına dik ve paralel yöndeki bileşkelerine ayrılır.
- Dilim tabanına dik olan kuvvet taban normal kuvveti olarak adlandırılır ve kayma mukavemetini hesaplamak için gereklidir.
- Dilim tabanına paralel doğrultuda etkiyen dilim ağırlığının bileşkesi ise sevi iten ve dengesini bozmaya çalışan kuvvettir.
- Bir kayma yüzeyi boyunca oluşan kuvvetlerin momentleri toplamından kayma yüzeyinin güvenlik sayısı elde edilir.

$$FS = \frac{\Sigma [c\beta + N \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha} = \frac{\Sigma S_{maksimum}}{\Sigma S_{mobilize}}$$



# Fellenius Yöntemi

36

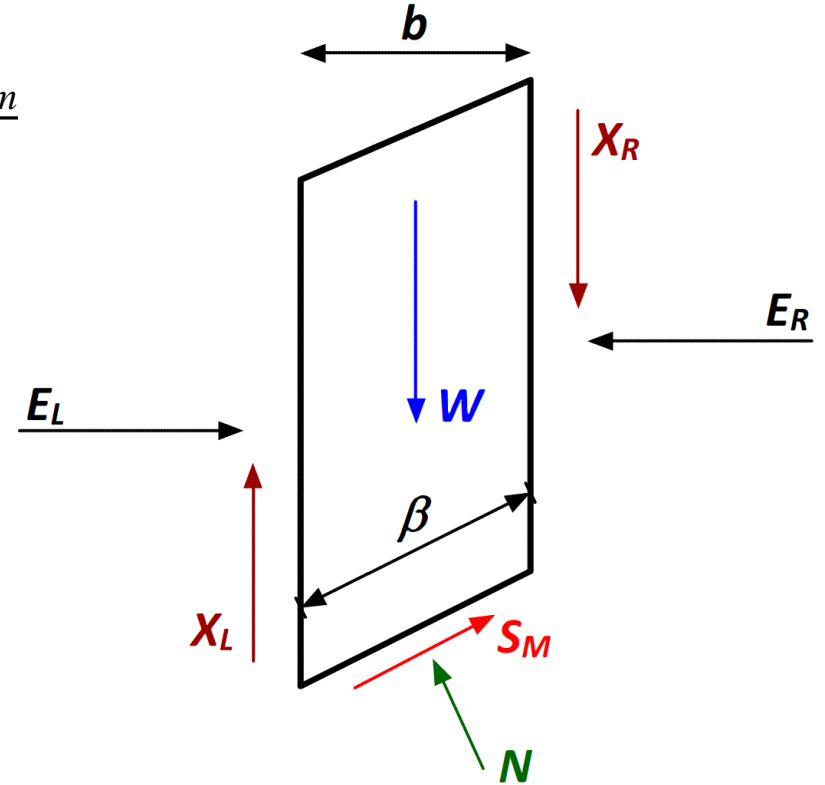
Güvenlik sayısı; kayma yüzeyi boyunca oluşan kayma mukavemetinin mobilize olan kayma gerilmelerine oranı olarak aşağıdaki bağıntıdaki gibi elde edilebilir.

$$FS = \frac{\Sigma [c\beta + N \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha} = \frac{\Sigma S_{maksimum}}{\Sigma S_{mobilize}}$$

- c** : kohezyon
- $\beta$**  : dilim taban uzunluğu
- N** : taban normal kuvveti = **W cos  $\alpha$**
- $\phi$**  : içsel sürtünme açısı
- W** : dilim ağırlığı
- $\alpha$**  : dilim tabanının eğimi

$$FS = \frac{\Sigma [c\beta + (N - u\beta) \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha}$$

**Yeraltı Suyu**

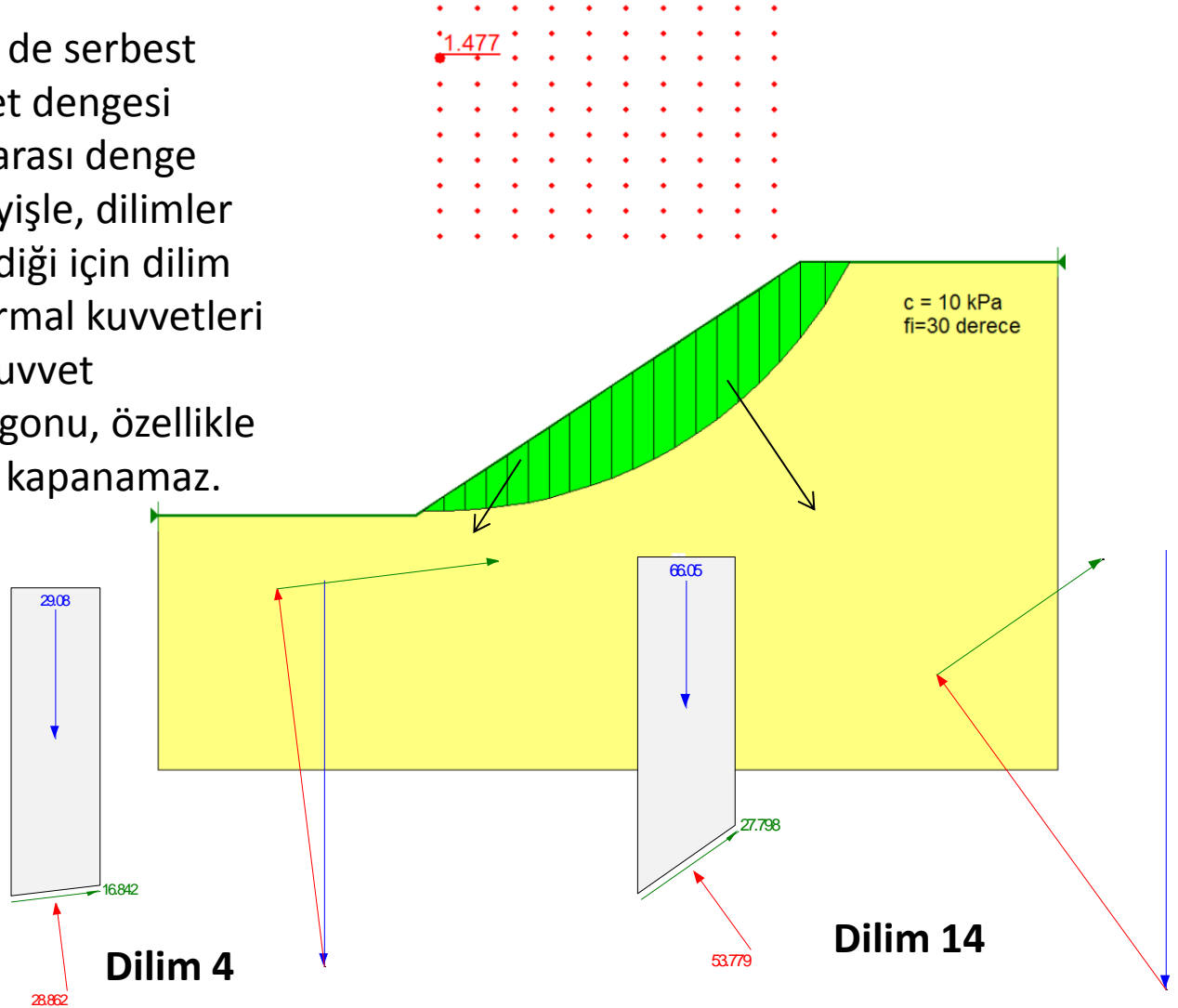


# Fellenius Yöntemi

37

■ 4 ve 14 no'lu iki dilimde de serbest cisim diyagramında kuvvet dengesi sağlanamaz ve vektörler arası denge sağlanamaz. Başka bir deyişle, dilimler arası kuvvetler ihmal edildiği için dilim tabanındaki kayma ve normal kuvvetleri dengeleyecek başka bir kuvvet olmadığından kuvvet poligonu, özellikle dilim tabanı yataylaştıkça kapanamaz.

Bu yöntem uygulama problemlerinde kullanılmamalıdır.





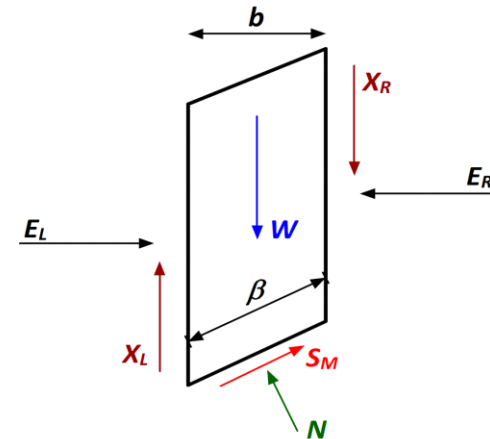
# Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

38

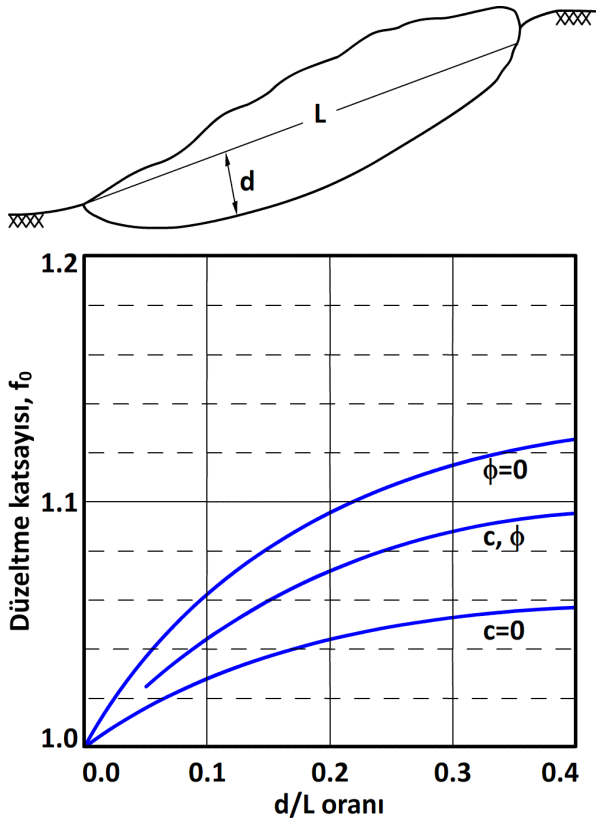
- Bishop tarafından geliştirilen yöntem dairesel bir kaymada
  - dilimler arası normal kuvveti ( $E$ ) hesaba dahil eder
  - dilimler arası kayma kuvveti ( $X$ ) ihmal eder
  - ve moment dengesini gözeterek hesap yapar.

$$FS = \frac{\Sigma \left[ (c \cdot \beta + W \cdot \tan \phi) \left\{ \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \right\} \right]}{\Sigma W \cdot \sin \alpha}$$

Bishop denkleminin her iki tarafında da **FS** olduğu için tek bir çözüm yoktur ve iterasyon yapmak gereklidir.



- Janbu dairesel olmayan kayma yüzeyinde
  - dilimler arası normal kuvveti ( $E$ ) hesaba dahil eder
  - dilimler arası kayma kuvveti ( $X$ ) ihmal eder
  - ve yatay kuvvet dengesini gözeterek hesap yapar.



Krahn (2004) tarafından yapılan bir hesaplamada Bishop yöntemi ile 1.36 elde edilen şev güvenlik sayısı Janbu yöntemi ile 1.16 olarak hesaplanmıştır.

- Spencer (1967) hem moment hem de yatay kuvvet dengesini ayrı ayrı sağlayan bir sistem önermiştir.
- Geliştirmiş olduğu yöntem; dilimler arası normal ve dilimler arası kayma kuvvetleri arasındaki ilişkiyi sabit kabul ederek, moment ve yatay kuvvet dengelerini aynı anda sağlayan oranı bulan iteratif bir yaklaşımdır.
- Her iki denge denklemini sağlayan kayma-normal kuvvet oranının elde edilmesi durumunda her iki denge şartı da sağlanmış olmaktadır. Krahn (2004) dilimler arası kayma kuvveti ( $X$ ) ile dilimler arası normal kuvvet ( $E$ ) arasındaki oranı aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$$

# Spencer Yöntemi

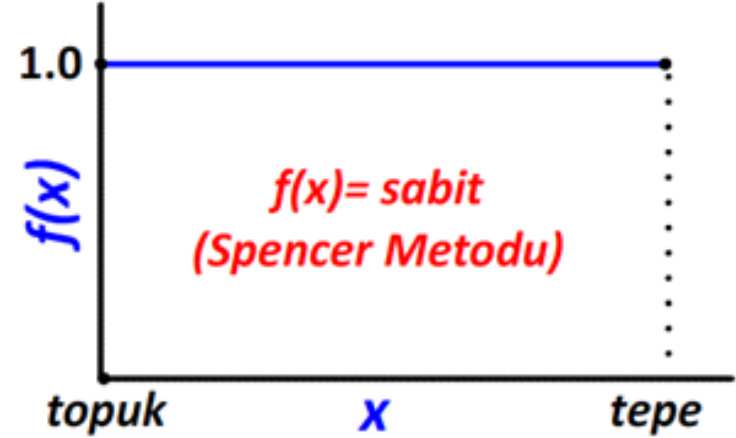
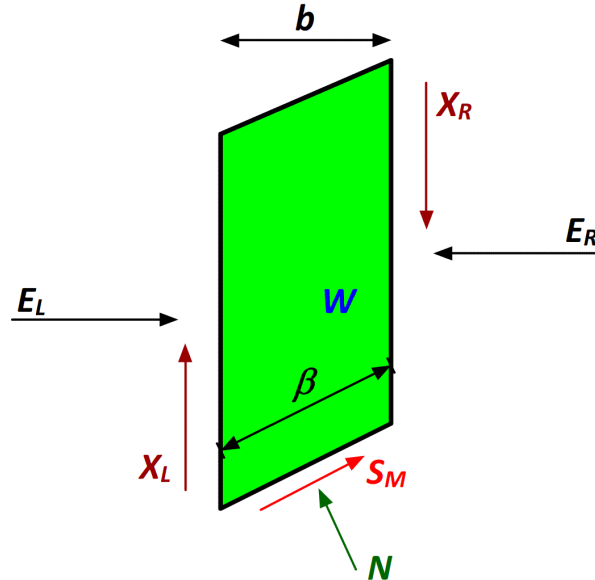
41

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$$

Spencer yönteminde

$f(x) = 1,0$  olduğundan

$$\lambda = \frac{X}{E}$$

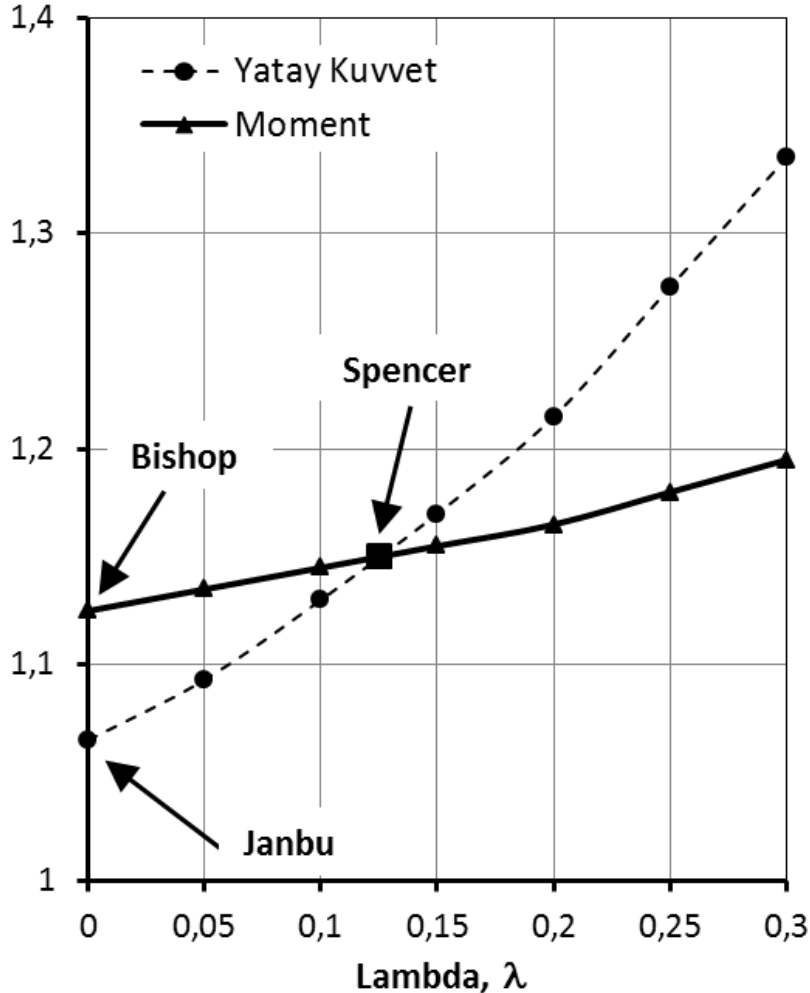




# Spencer Yöntemi

42

- $\lambda$  her iki kuvvet arasındaki oranı gösterir. Spencer (1967) tarafından önerilen yöntemde her dilim için  $\lambda$  sabit olduğundan  $f(x) = 1,0$  alınır.



Spencer (1967)'in önermiş olduğu yöntemde moment ve yatay kuvvet denge denklemlerinin her  $\lambda$  için ayrı ayrı hesaplanması ve her iki denge şartını sağlayan değerlerin elde edilmesi verilmektedir.

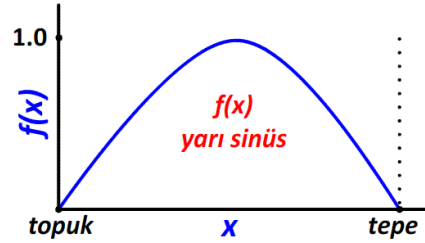
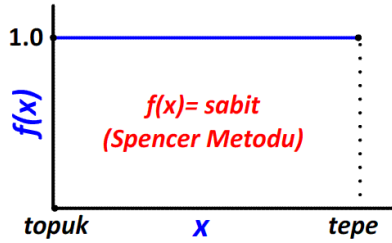
Bishop ve Janbu yöntemlerinden elde edilen güvenlik sayıları da gösterilmektedir.

Her iki yöntemde de dilimler arası kayma kuvveti (X) sıfır olduğundan lambda ekseninin sıfır değerini kestiği noktalar bu yöntemlerin güvenlik sayılarını vermektedir.

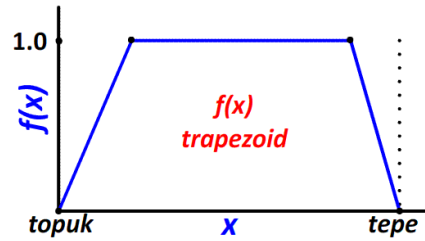
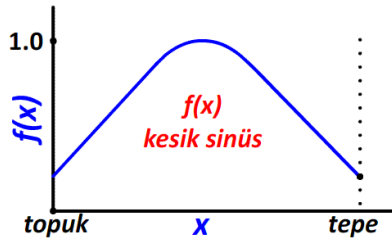
# Morgenstern-Price Yöntemi (M-P)

43

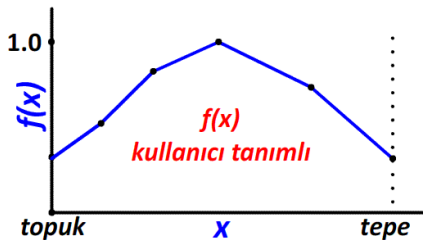
- Morgenstern-Price (1965) dilimler arası kuvvetlerin oranını sabit kabul eden Spencer yöntemine benzer bir yöntem geliştirmiş ve dilimler arası normal ve kayma kuvvetlerini farklı kuvvet fonksiyonları ile tanımlamışlardır.



$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$$



Dilimler arası kuvvet fonksiyonunun sabit seçilmesi durumunda M-P ve Spencer yöntemleri aynı güvenlik sayılarını vermektedir.



# Dilimler arası Kuvvet Fonksiyonu, $f(x)$

Dilimler arası kayma kuvveti ile normal kuvvet arasındaki ilişki  $X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$  bağıntısı ile tanımlanmıştır. Şev stabilite analizleri statik olarak belirsiz çözümler olduklarından, herhangi bir problem için  $f(x)$  fonksiyonunu teorik olarak tanımlayabilecek bir yöntem mevcut değildir.

Morgenstern, bazı özel durumlar dışında, birçok pratik uygulama için  $f(x)$  fonksiyonunun farklı dağılımları için sonuçların benzer olacağını ifade etmektedir. Fonksiyon seçimi zor bir konu olduğu için birçok uygulamacı da  $f(x) = 1,0$  değerini seçmekte ve M-P yöntemi olarak geçen analiz yöntemi aslında Spencer yöntemi ile eşdeğer olmaktadır.

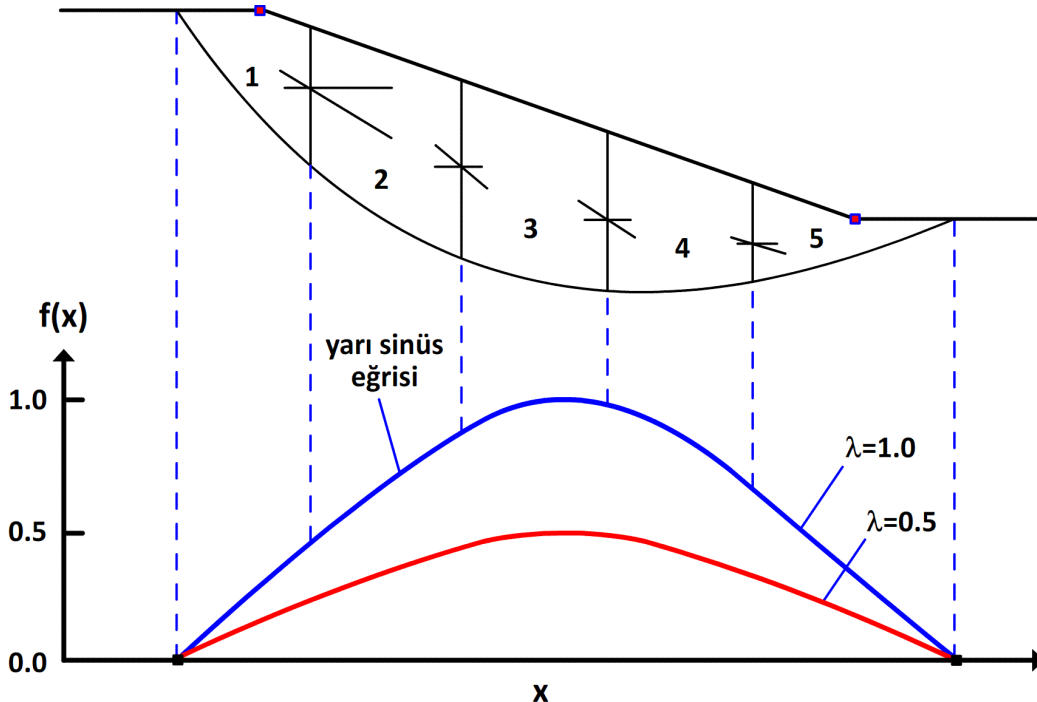
Mantıklı bir yaklaşım (i)  $f(x) = 1, 0$  (ii) **yarı sinüs** veya **kesik sinüs** ile (iii) **trapezoid** fonksiyonlarını FS değerinin hassasiyeti tespit etmek olacaktır.

# Dilimler arası Kuvvet Fonksiyonu, $f(x)$

45

Krahn (2004) tarafından verilen örnekte Dilim 1 ve 2 arasındaki normal kuvvet  $E=100$  kN olarak alınmış ve  $\lambda=0,5$  iken yarı sinüs kuvvet fonksiyonunun kullanıldığını kabul edilmiştir. Yarı sinüs fonksiyonunun Dilim 1 ve 2 arasındaki değeri  $f(x)=0,45$  ve  $\lambda=0,5$  olduğuna göre;

$$X = E \lambda f(x) = 100 * 0,5 * 0,45 = 22,5 \text{ kN}$$



olarak hesaplanır.  
Bu örnekte kayma dairesinin taç ve topuk kısmında lambda değerleri sıfır iken kayma dairesinin tam ortasında en büyük değeri olan 0,5'e ulaşmaktadır.



# Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE)

46

Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (=General Limit Equilibrium Theory - GLE) olarak adlandırılan bu yöntem, literatürdeki diğer yöntemlerin en önemli kısımlarını kullandığı için çerçeve bir yöntem olarak görülebilir.

GLE yaklaşımının kullandığı iki önemli kabul vardır:

- Zeminlerin mukavemetini oluşturan kohezyon ve sürtünme bileşenlerinin güvenlik sayıları aynıdır.
- İncelenen kayma dairesini oluşturan tüm dilimler için güvenlik sayısı aynıdır.

# Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE)

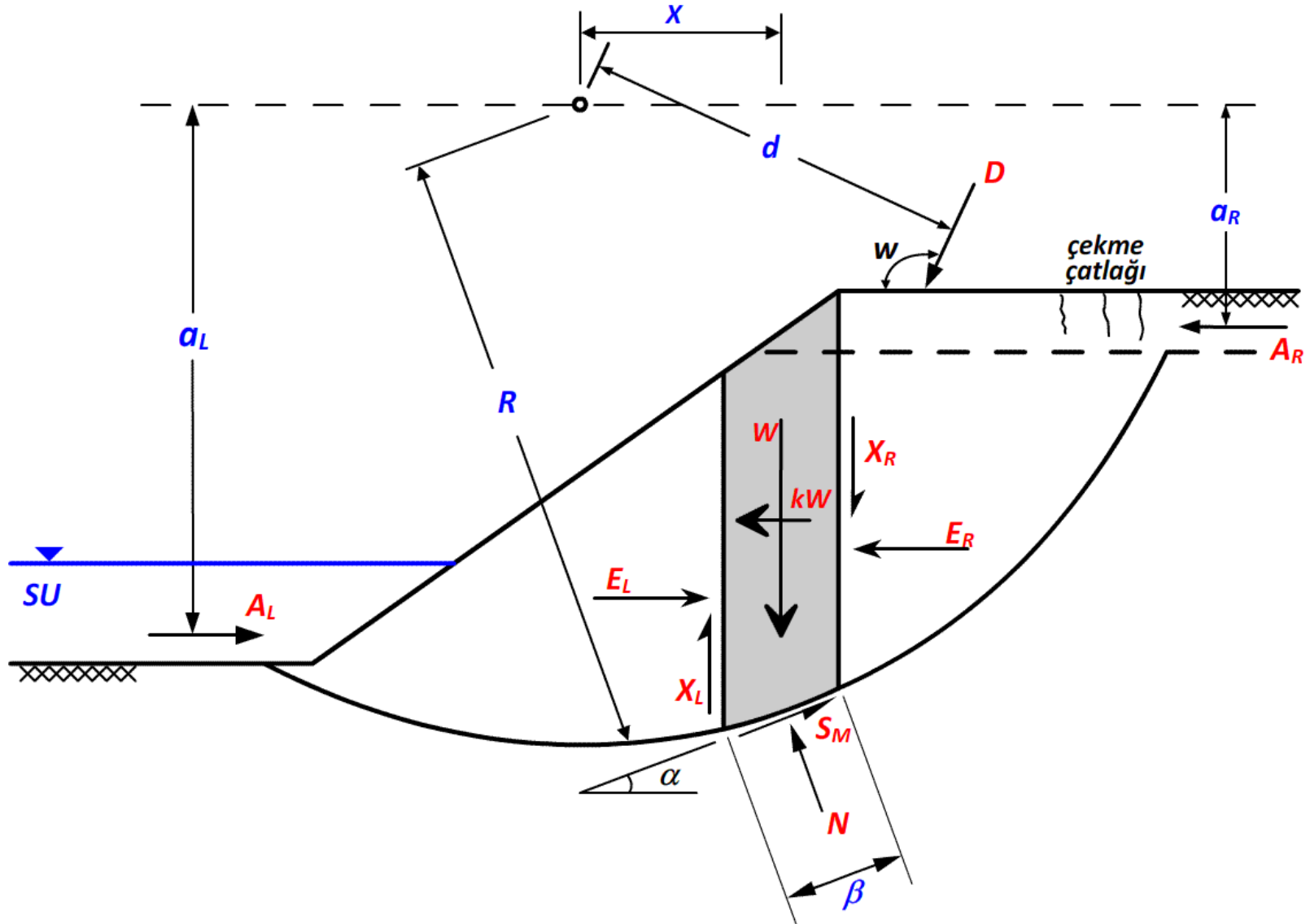
47

Dairesel bir kayma dairesi üzerindeki herhangi bir dilime etkiyen yatay ve düşey kuvvetler Şekil 3.9'da verilmektedir. Şekilde görülen terimler **(Krahn, 2004)**:

- $W$  :  $b$  genişliğinde ve  $h$  yüksekliğindeki dilimin toplam ağırlığı
- $N$  : dilim tabanındaki toplam normal kuvvet
- $S_m$  : dilim tabanında mobilize olan kayma kuvveti
- $E_{L,R}$  : dilimin solunda ve sağında oluşan dilimler arası normal kuvvet
- $X_{L,R}$  : dilimin solunda ve sağında oluşan dilimler arası kesme kuvveti
- $D$  : çizgisel dış yük
- $kW$  : dilim merkezinden etkiyen sismik yük
- $A_{L,R}$  : dilimin solundan ve sağından etkiyen yeraltı suyu kuvveti
- $R$  : dairesel bir kayma durumunda dilim tabanında mobilize olan kayma kuvvetinin  $O$  noktasına olan dik mesafesi, yarıçap
- $\alpha$  : dilim taban orta noktasına çizilen teğetin yatayla yaptığı açı
- $d, x, a$  : geometrik uzunluklar, moment kolları

# Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE)

48



# Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE)

49

GLE yöntemi aşağıdaki kabullere göre güvenlik sayısı hesabı yapmaktadır :

- Her dilim içindeki düşey kuvvetlerin toplamı dilim tabanındaki **N normal kuvvetine** eşittir.
- Her dilime etkiyen yatay kuvvetlerin bileşkesi **dilimler arası normal kuvvet**  $E$ 'ye eşittir.  $E$ 'nin hesabında kayma doğrultusunda taç kısmına en yakın dilimden başlanarak yapılmaktadır.
- Tüm dilimler için ortak bir dönme noktası için moment değerleri toplanır. Elde edilen toplam, moment dengesi **güvenlik sayısı  $F_m$**  değerini vermektedir.
- Tüm dilimler üzerinde etkili olan yatay kuvvetlerin toplamından kuvvet dengesi **güvenlik sayısı  $F_f$**  hesaplanmaktadır.



## Moment Dengesi Güvenlik Sayısı, $F_m$

**48.** slaytta verilen kayma dairesi için moment dengesi yazılırsa (1) denklemi elde edilir.

$$\textcircled{1} \quad \sum Wx - \sum S_m R - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd \pm \sum Aa = 0$$

Dilim tabanında mobilize olması gereken kayma mukavemeti  $S_m$  (2) bağıntısı ile ifade edilir. Bu bağıntıda  $F$  güvenlik sayısını ve  $\beta$  ise dilim tabanının genişliğini göstermektedir.

$$\textcircled{2} \quad S_m = \frac{s\beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u) \tan \phi')}{F}$$

## Moment Dengesi Güvenlik Sayısı, $F_m$

(1) nolu denklemi (2) de yerine koyarsak moment dengesi güvenlik sayısı  $F_m$  eşitliği ile elde edilir.

$$\textcircled{3} \quad F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd \pm \sum Aa}$$

Yukarıdaki eşitlikte **N** kuvveti de güvenlik sayısının bir fonksiyonu olduğu için (3) denklemi doğrusal olmayan bir denklem olarak ifade edilir.

## Kuvvet Dengesi Güvenlik Sayısı, $F_f$

**48.** slaytta verilen kayma dairesi için yatay kuvvet dengesi yazılırsa (4) denklemi elde edilir.

$$\textcircled{4} \quad \sum (E_L - E_R) - \sum (N \sin \alpha) + \sum (S_m \cos \alpha) \dots \\ \dots - \sum kW + \sum D \cos \omega \pm \sum A = 0$$

(4) nolu denklemi, (2) nolu mobilize olan kayma mukavemeti bağıntısına koyarsak kuvvet dengesi güvenlik sayısı  $F_f$  elde edilir.

$$\textcircled{5} \quad F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\sum (N \sin \alpha) + \sum kW - \sum D \cos \omega \pm \sum A}$$

## Dilim Tabanında Etkiyen Normal Kuvvet, N

**48.** slaytta verilen kayma dairesi için düşey kuvvet dengesi yazılırsa (6) denklemi elde edilir.

$$\textcircled{6} \quad (X_L - X_R) - W + N \cos \alpha + S_M \sin \alpha - D \sin \omega = 0$$

(6) nolu denklemi, (2) nolu mobilize olan kayma mukavemeti bağıntısına koyarsak kuvvet dengesi güvenlik sayısı  $F_f$  elde edilir.

$$\textcircled{7} \quad N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F} + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}}$$



# İki tür stabilite analizi yapılabilir ...

54

Elde edilen zemin parametreleri ile iki farklı şekilde şev analizi yapılabilir.

**Toplam gerilme** hesabı killi şevlerin ya da suya doygun kumlu şevlerin kısa dönem stabilitelerinin incelenmesi için kullanılır. Bu yaklaşımda, kısa dönem zemin davranışının doğru tanımlanabilmesi için zemin içindeki boşluk suyu basıncı da hesaplara dahil edilir.

**Efektif gerilmelere** dayanan hesap türünde şevlerin uzun dönem stabilitesi drenajlı şartlar altında incelenir. Doğal-kalıcı şevler ve yerinde oluşan zeminlerin (rezidüel) analizinde, aşırı yağışlı dönemlerdeki en yüksek yeraltı su seviyesi de gözeticilerle efektif gerilme analizlerini kullanmak gerekir.

Şev problemi olan bir bölgede yapılacak laboratuvar çalışmalarından elde edilecek bilgiler:

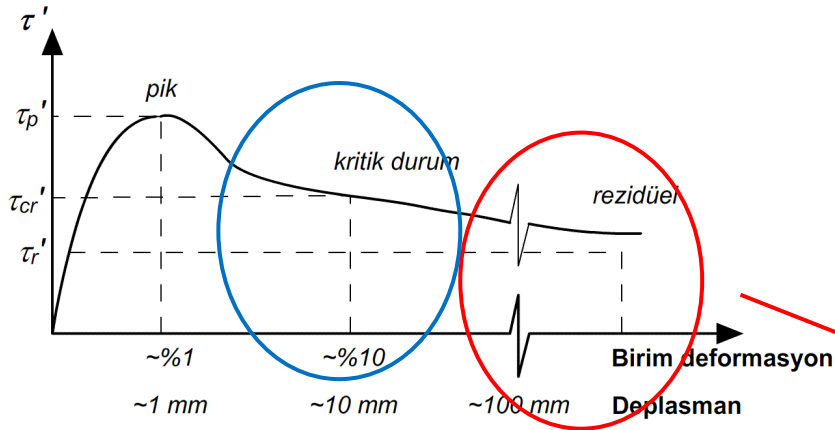
- İndeks özellikleri
  - bilhassa kıvam limitleri (plastik-likit limit)
  - tabii su muhtevası
  
- Mukavemet parametreleri
  - Kesme kutusu – kritik ve rezidüel parametreler için
  - Halka kesme kutusu
  - Üç eksenli basınç deneyi (UU,CU ve CD)

# Arazi inceleme safhasında...

56



Arazide yapılacak inceleme çok önemlidir. Eğer daha önce oluşmuş kayma hareketleri var ise rezidüel parametrelere ( $\phi'_r$ ) göre analiz yapmak gerekir.



Daha önce şev problemi yaşanmayan bir sahada **kritik durum değerleri** ile çalışmak gerekir.

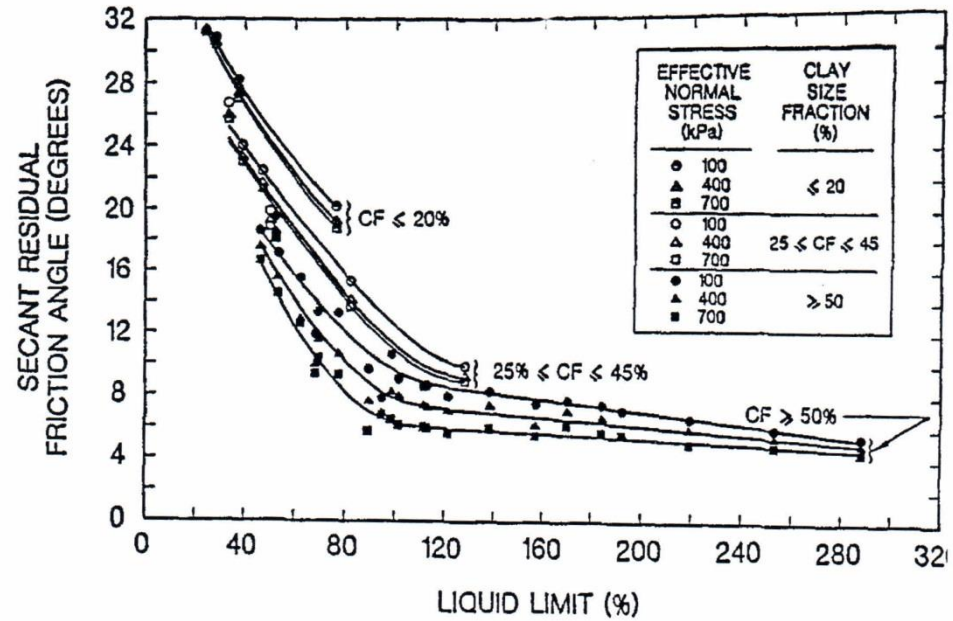
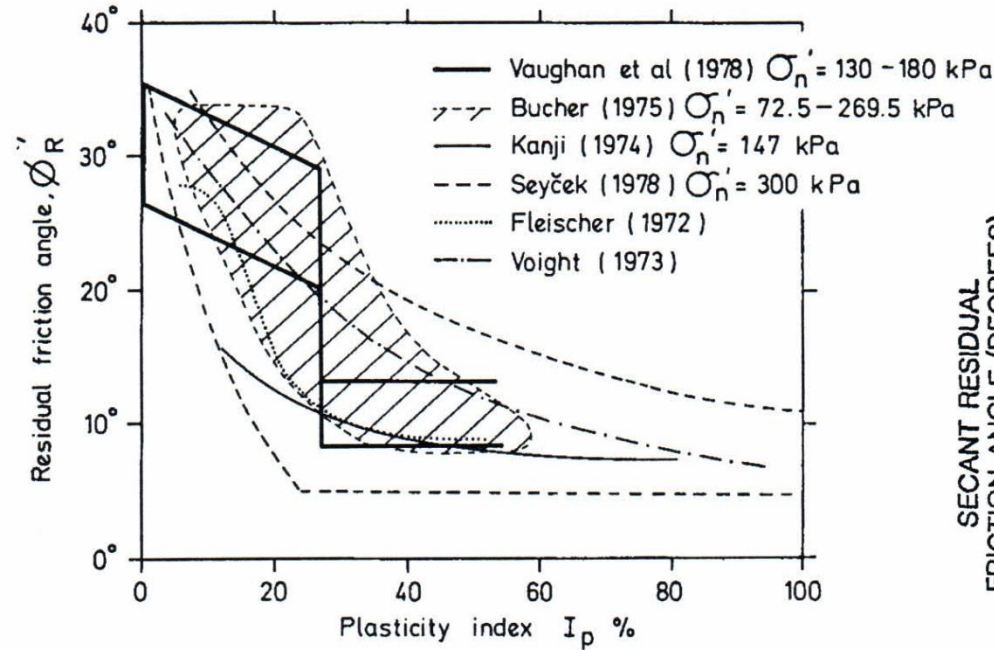
Daha önce kayma hareketleri gözlenen arazilerde ise **rezidüel değerleri** kullanmak gerçekçi olacaktır.

# Arazi inceleme safhasında...

57

## Rezidüel zemin parametreleri

- kesme kutusu deneyinden ya da halka kesme kutusu deneyinden
- kilin plastisitesine göre alabileceği değer aralıklarını veren grafiklerden



# Arazi inceleme safhasında...

58

**Kayan bir şevin rezidüel mukavemet parametreleri geri analiz ile elde edilebilir.**

Şev stabilite analizlerinde deviren kuvvetler ile koruyan kuvvetlerin dengesi incelendiğinden göçme oluşan bir şevde deviren ve koruyan kuvvetlerin aralarındaki oran da 1,0'dır.

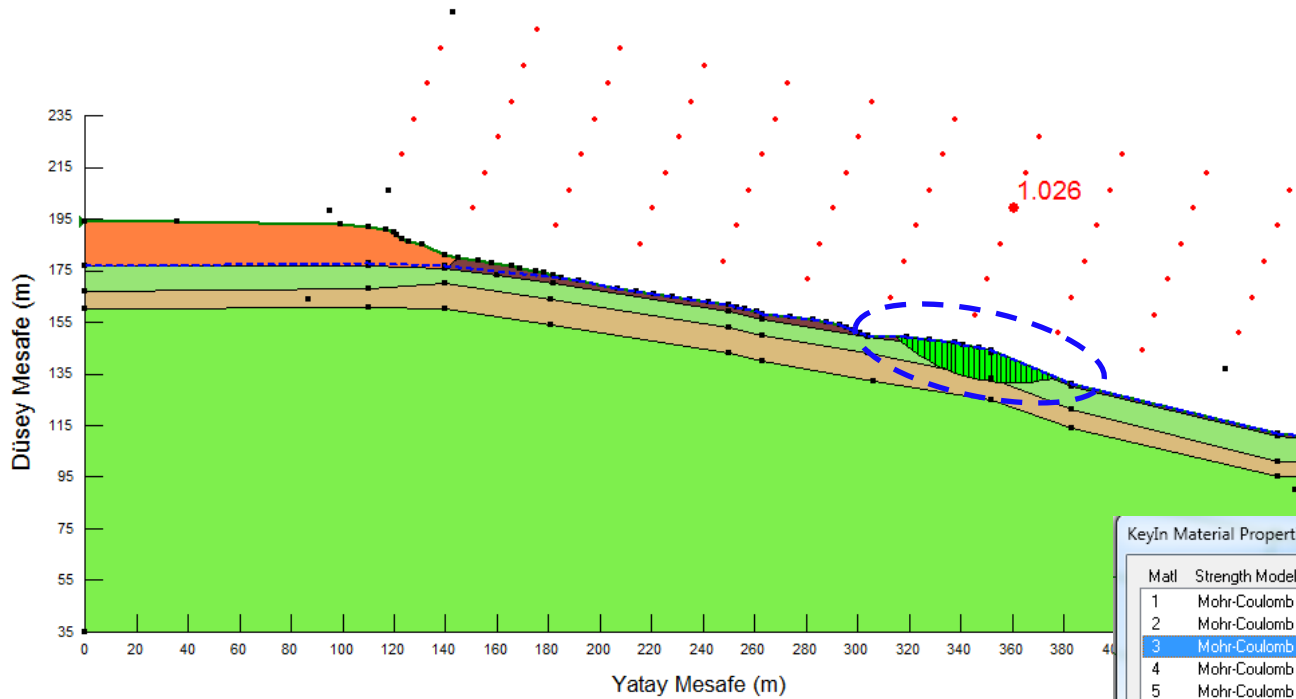
Bu nedenle arazide oluşan kaymanın geometrisine uygun olan ve  $FS = 1,0$  veren kayma dairesi için hesap yapılır.





# Geri analiz ...

59



KeyIn Material Properties

Matl	Strength Model	Description	Color
1	Mohr-Coulomb	cukurcesme	Orange
2	Mohr-Coulomb	karisik yuzey malzemesi	Brown
3	Mohr-Coulomb	gupinar	Green
4	Mohr-Coulomb	siki kum	Light Green
5	Mohr-Coulomb	gupinar-2	Light Green

3 | Mohr-Coulomb | gupinar | Green | Set...

Basic Parameters

Unit Weight: 18.5 | Phi: 14

Cohesion: 0

Advanced Parameters

Unit Wt. above WT: 0 | Phi B: 0 | Anisotropic Fr.: 0

Copy | Insert | Delete | OK | Cancel

Rezidüel mukavemet parametreleri tanımlanırken genellikle sadece içsel sürtünme açısı kullanılır ( $\phi_r=14^\circ$  gibi). Japonya'da sürtünme açısı ile birlikte kohezyon da tanımlanabilmektedir ( $c_r=10$  kPa ve  $\phi_r=14^\circ$  gibi).

Doğru bir geri analiz çalışması için **kayan kütlelerin geometrisinin** (derinlik başta olmak üzere) doğru belirlenmesi gereklidir. Araziye çıkmadan önce **bölgenin jeolojisi** ve varsa **heyelan risk haritaları** incelenmelidir.

Arazi incelemesi sırasında önemli ipuçları elde edilebilir. Kayan **kütlelerin uzunluğunu, genişliğini ve derinliğini** belirlemek için:

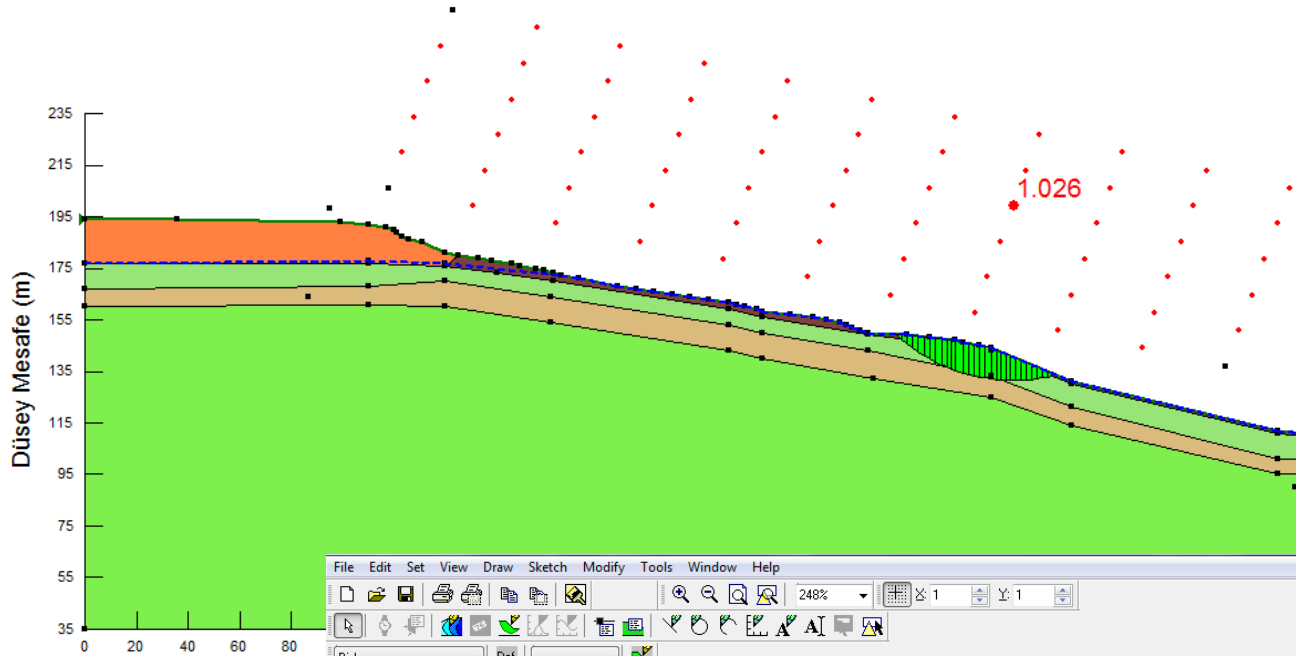
- ▣ Şevin taç kısmında çekme çatlakları aranmalı
- ▣ Topukta kabarma incelenmeli
- ▣ Çevredeki altyapıda gözlenen aksaklıklar (kırılan su boruları vb)
- ▣ Gereken durumlarda inklinometreler ile kayan kütlelerin derinliği tespit edilmeli

Ayrıca dikkat edilmesi gerekenler:

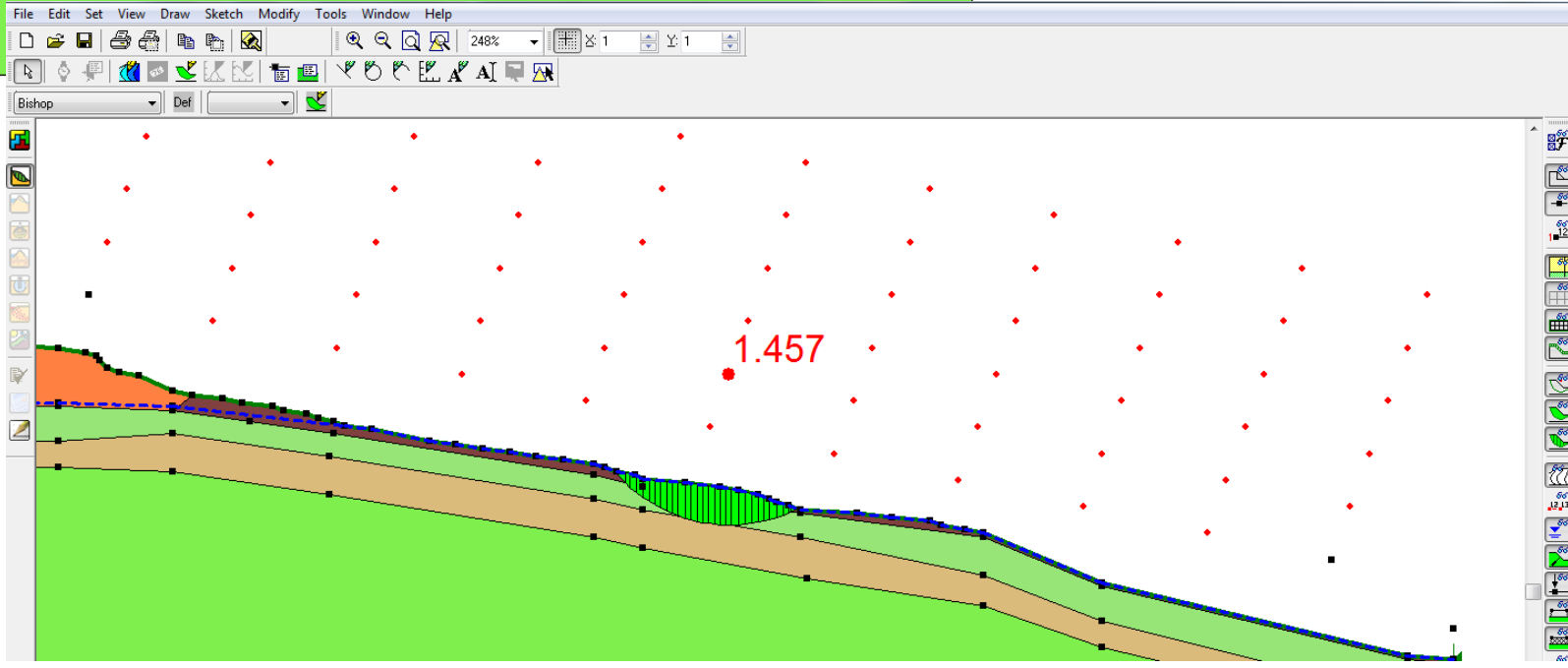
- ▣ Eğik yapılar ve ağaçlar
- ▣ Dalgalı zemin yapısı
- ▣ Su çıkışı gözlenen bölgeler

# Geri analiz ...

61

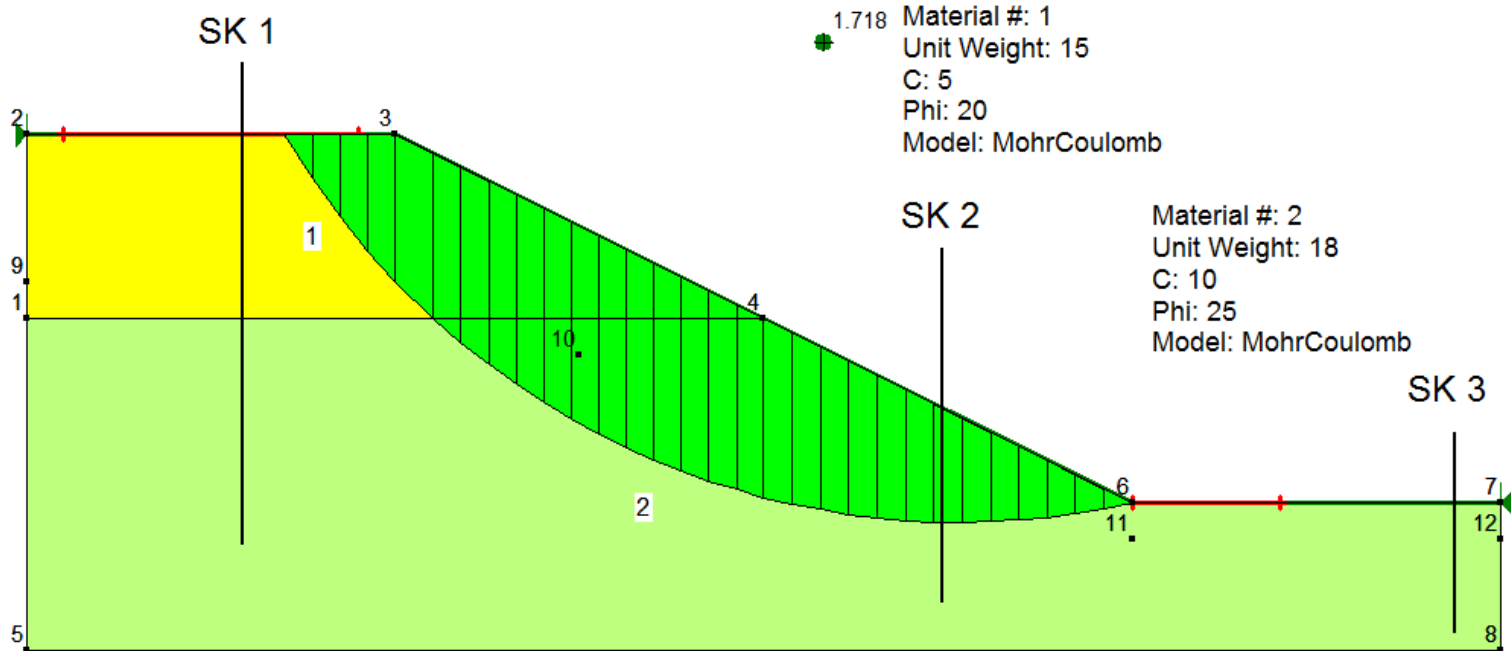


Eğer kayan şevin yerini ve geometrisini doğru tahmin edemezsek aynı zemin parametreleri ile farklı güvenlik katsayıları da elde edilebilir.



Yeraltı su seviyesinin artması efektif gerilmelerin azalmasına neden olacağı için şevin güvenlik seviyesini azaltmaktadır. Aynı şev geometrisi ve malzeme özellikleri için aşağıdaki üç örnek incelenebilir.

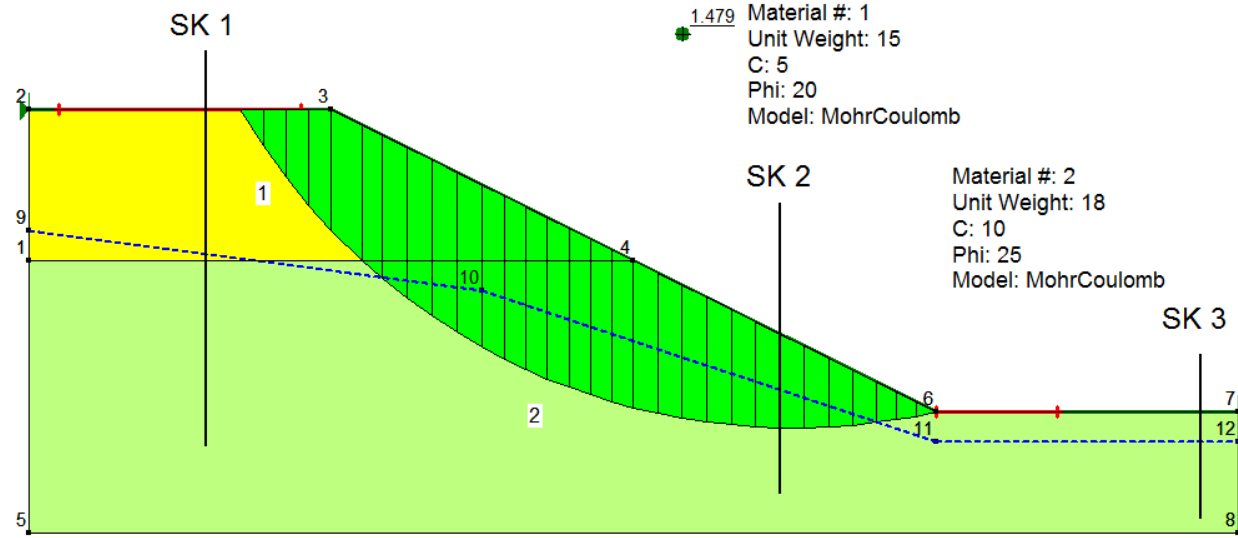
## 1. Yeraltı suyu yok. $FS=1,718$



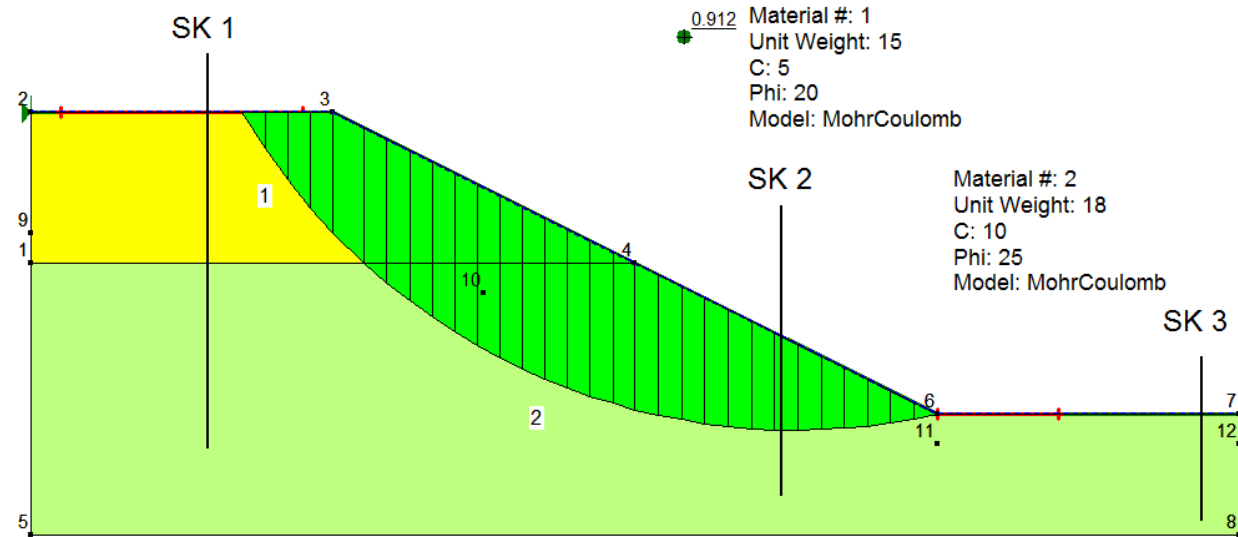
# Yeraltı suyu

63

2. Eğimli bir yeraltı suyu var. **FS=1,479**



3. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde. **FS=0,912**





Yamaçlarda oluşan yeraltı suyu basınçlarını tanımlamak için  $r_u$  (**boşluk suyu basıncı katsayısı**) terimi de kullanılmaktadır.

$$r_u = \frac{u}{\gamma_t h_s} \Rightarrow u = r_u \gamma_t h_s$$

$r_u$  kavramı, Bishop ve Morgenstern (1960) tarafından önerilmiş olup stabilite tablolarının kullanımı için geliştirilmiştir. Stabilite tablosu katsayıları  $m$  ve  $n$  ile birlikte güvenlik sayısı hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir ( $F=m-n.r_u$ ). Hesap kolaylığı sağlamak üzere geliştirilen bu yaklaşım günümüz bilgisayar teknolojisinin gelişmesine rağmen tasarımcılara pratik gelmesi nedeniyle bazen kullanılmaktadır.

**Bilgisayar teknolojisi sayesinde sızıntı hesapları çok hızlı yapılabilmektedir, bu nedenle  $r_u$  kavramının kullanılmasına gerek kalmamıştır.**

- Sismik analiz için kullanılan en eski yöntemlerden bir tanesi **pseudo statik** analizdir ( $\approx$ **yalancı/mış gibi statik analiz**).
- Bu yöntemde göre sismik hareket nedeniyle oluşacak kuvvetler yatay yönde statik kuvvet olarak tanımlanır. Tanımlanan kuvvetin şiddeti zemin diliminin ağırlığına ve **sismik katsayı  $k$** 'nin alacağı değere bağlıdır.
- Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi yapılan analiz aslında tam anlamıyla statik durum için geçerli olduğundan pseudo statik terimi gerçeği tam olarak yansıtmaz. Asıl doğru ifadenin **pseudo dinamik** ( $\approx$ **yalancı/mış gibi dinamik**) olması gereklidir.
- Sismik hareketlerin düşey bileşeni genellikle ihmal edilir ve sismik katsayı yatay kuvveti temsil etmek üzere kullanılır.

İki hususa dikkat etmek gerekir:

- ▣ Pseudo statik kuvvetin etkidiği nokta
- ▣ Sismik katsayının değeri

Terzaghi yatay kuvvetin dilimin ortasından etkimesini önermektedir. Bu öneri birçok durum için geçerlidir.

Sismik katsayının değerine ampirik önerilere ve şartnamelere bağlı olarak karar verilmektedir. Yamaçların analizinde kullanılan **tipik değerler 0,05 ile 0,25 arasında değişmektedir.**

Ancak, son dönemde yapılan incelemeler deprem durumunda yüksek deplasman potansiyeline sahip yapıların tasarımında sismik katsayı kullanımının yeterli olmadığını göstermektedir.

**TS 8853'de de bu konuda yeterli bilgi verilmemektedir:**

*«Suya doygun kohezyonsuz zeminlerde, deprem sonucu boşluk suyu basınçlarında artış olur. Boşluk suyu basıncındaki artış efektif gerilmelerin azalmasına ve zamanla sifıra düşmesine neden olarak zemin dayanımını etkiler....»*

## Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte Bölüm 6.4.1'de deprem durumunda yatay eşdeğer deprem katsayısı $C_h$ :

- ▣ düşeyde serbest konsol olarak çalışan zemin dayanma yapılarında

$$C_h = 0,2 * (I + 1)A_0$$

- ▣ yatay doğrultuda döşeme ya da ankrajla sınırlanmış yapı ve elemanlarda

$$C_h = 0,3 * (I + 1)A_0$$

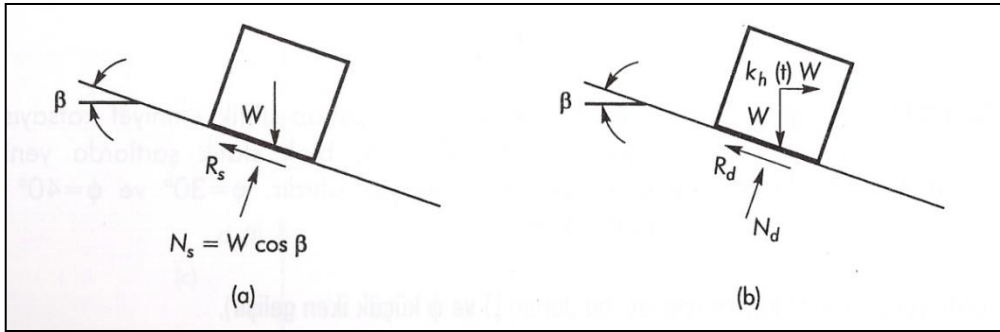
olarak verilmiştir.

Deprem Bölgesi  $A_0=0,4$  ve Bina Önem Katsayısı  $I=1,0$  ise  $C_h$  sırasıyla **0,16 – 0,24** olarak hesaplanır.

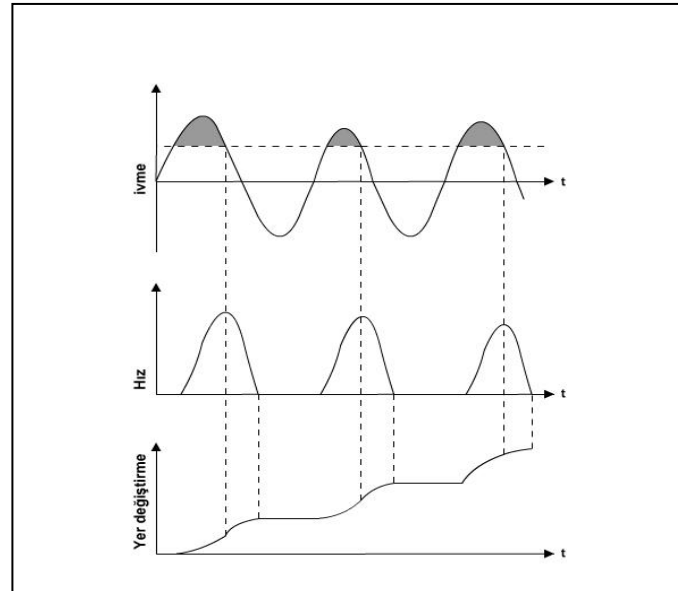
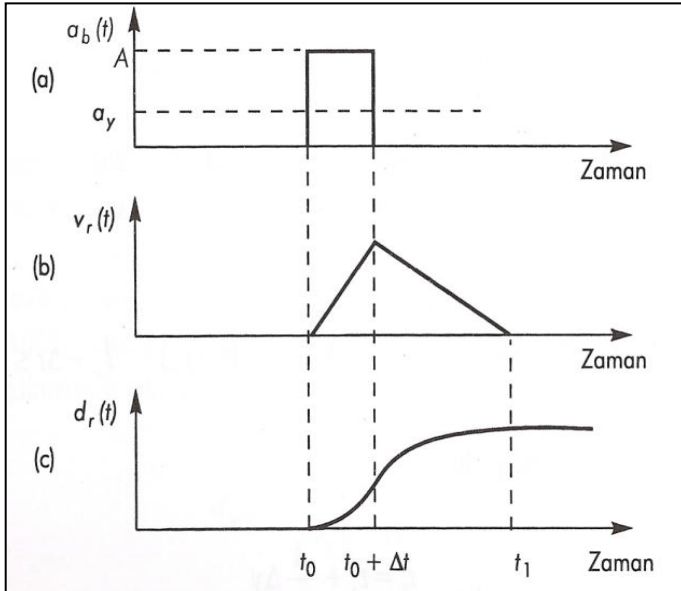
# Sismik Şev Analizi-Newmark Kayan Blok Analizi

68

**Newmark**, eğimli bir düzlem üzerinde duran blok modelini kullanarak herhangi bir deprem etkisine maruz kalan bir şevdeki kalıcı yer değiştirmeyi hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir.



$$FS_{d(t)} = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \sin \beta] \tan \varphi}{\sin \beta + k_h(t) \cos \beta}$$





Şev tasarımı yaparken stabiliteyi kontrol eden parametreler tek bir güvenlik katsayısı ile azaltılabildiği gibi kısmi katsayılar da kullanılabilir. **Tek bir katsayı kullanmak** çok yaygın bir tekniktir. Örneğin bir kilin drenajsız kayma mukavemetini belirli bir güvenlik katsayısına bölerek azaltılmış mukavemetle bile şevin dengede kaldığını göstermek uygun bir yöntemdir. Genelde **1.25** ile **1.50** arasında değişen katsayılar kullanılır.

Diğer taraftan **kısmi katsayılar kullanarak** da tasarım yapılabilir. Örneğin, drenajsız, toplam gerilme analizinde etkili parametreler; şevin yüksekliği, eğimi, birim hacim ağırlığı ve drenajsız kayma mukavemetidir.

Her parametrenin elde edilişindeki belirsizlikleri yansıtan kısmi katsayılar kullanılarak bir analiz yapılabilir. Bu durumda her parametreye kendi içinde bir güvenlik seviyesi belirlenmiş olacaktır.

Şevlerin tasarımında güvenlik katsayısı denildiğinde akla gelen değer şevin göçmeye karşı güvenlik seviyesini tanımlayan sayıdır. FS, F, GS, FoS gibi gösterim şekilleri vardır.

Bir şevin güvenlik seviyesi; zeminin **nihai kayma mukavemeti** ile göçme başlangıcında (**hareket geçen**) **mobilize olan kayma mukavemetinin** birbirine oranıdır.

$$FS = \frac{\textit{koruyan}}{\textit{deviren}}$$

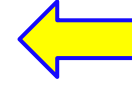
**$FS \leq 1, 0$  ise şevin duraysız olduğu ve göçme oluşacağı kabul edilir.**

# Güvenlik katsayısı: Hong Kong

71

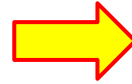
En düşük şev güvenlik katsayıları yönetmelikler tarafından önerilen değerlerden alınabilir. Bu konuda birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Şev kaymalarının çok yoğun bir şekilde yaşandığı Hong Kong'da kullanılan F değerleri aşağıda verilmektedir.

Ekonomik kayıp	İnsan kaybı		
	Önemsiz	Ortalama	Yüksek
Önemsiz	1,1	1,2	1,4
Ortalama	1,2	1,3	1,4
Yüksek	1,4	1,4	1,5



**Tavsiye edilen güvenlik katsayıları**

**Kayma gözlenen şevlerin güçlendirme işleri tavsiye edilen F değerleri**



İnsan kaybı	F
Önemsiz	> 1,1
Ortalama	> 1,2
Yüksek	> 1,3

# Güvenlik katsayısı: TS 8853

72

Şev analizleri konusunda **Türk Standartları**ndan da faydalanmak mümkündür. **TS 8853**'de (*Yamaç ve şevlerin dengesi ve hesap metotları*) limit denge yöntemleri ile yapılan analizler sonucunda farklı durumlar için istenilen minimum güvenlik sayıları ise aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Koşullar	Toplam Gerilme Analizi	Efektif Gerilme Analizi	Deprem Durumu
<i>Dolgularda yapım sonu</i>	1,50	-	-
<i>Yarmalar</i>	1,50	1,25	1,00
<i>Barajda kararlı sızıntı</i>	1,50	1,25	-
<i>Barajda ani göl boşalması</i>	1,50	1,10	-
<i>Uzun vadede duraylılık</i>	-	1,20	-
<i>Yamaç üzerinde yapı olması</i>	1,80	1,50	1,20
<i>Fisürlü kil ortamda</i>	-	1,50	-

# Limit Denge Yöntemi Kusursuz Mudur?

73

Limit denge yaklaşımı;

- ❑ düşey ve yatay kuvvet dengesi ile moment dengesi üzerine kurulu bir sistemdir, yani statik dengeyi inceler.
- ❑ şekil değiştirme ve deplasmanlar hakkında bir bilgi elde edilemez.

**Bu nedenle, son yıllarda yapılan çalışmalarda, gerilme-şekil değiştirme ilişkisini sonlu elemanlar yöntemi ile hesaba katan yeni yöntemler geliştirilmektedir.**

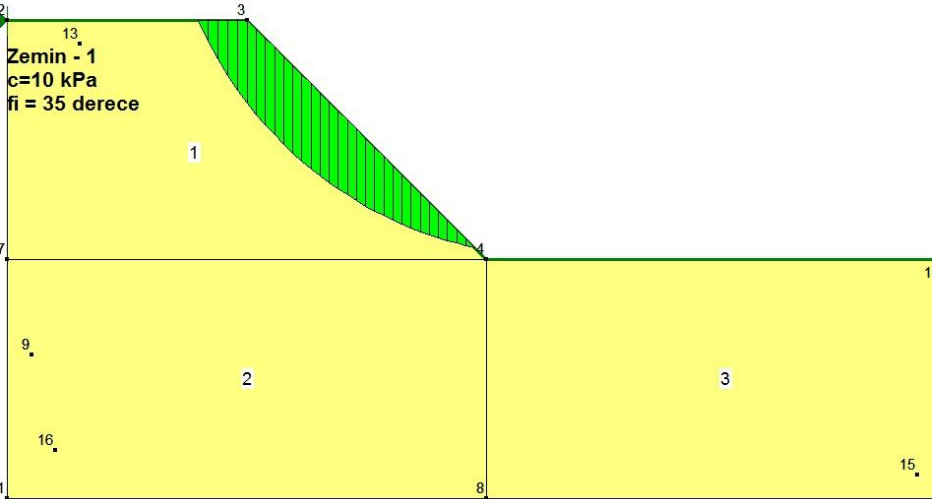
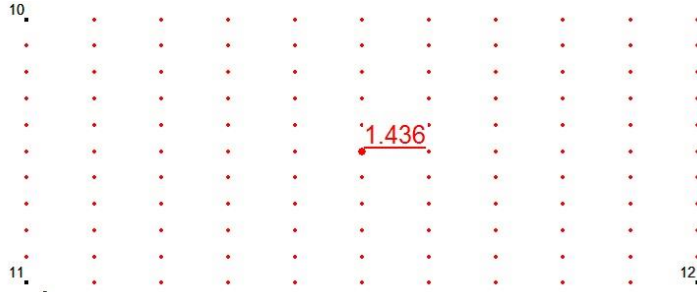


Bazı paket programlar, limit denge analizleri için farklı bir alternatifin kullanılmasına da olanak vermektedir.

Eğer sonlu elemanlar ağında dilim tabanındaki bir düğüm noktasına etkiyen **x** ve **y** doğrultusunda etkiyen gerilmeler  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  ise ve yine dilim tabanında **x-y** düzlemlerindeki kayma gerilmesi de  $\tau_{xy}$  ise dilim tabanına etkiyen normal gerilme  $\sigma_n$  ve kayma gerilmesi  $\tau_m$  aşağıdaki denklemler ile bulunabilir. Bu denklemlerde  $\theta$  açısı **+x** eksenini ile normal gerilme arasındaki değer olarak alınmaktadır.

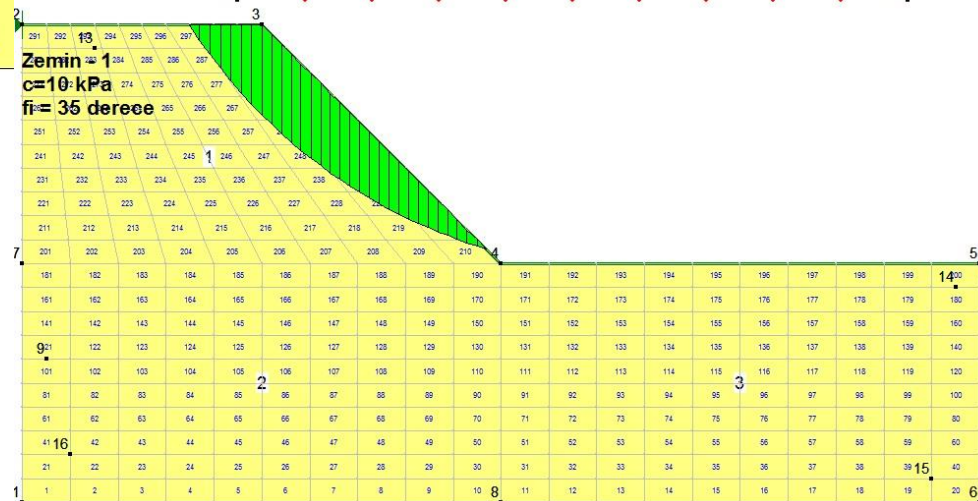
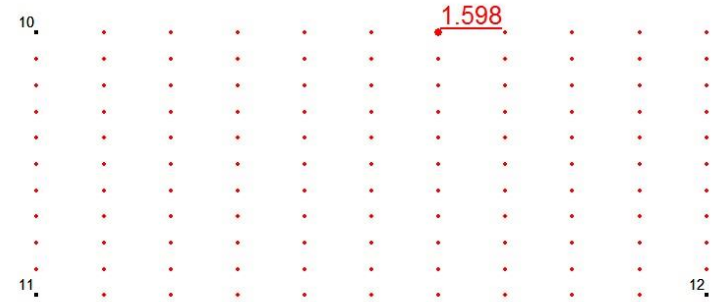
$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta$$

# Sonlu Elemanlar Destekli Limit Denge Analizleri



Limit denge: M-P, yarı sinüs

Başlangıç gerilme dağılımı  
sonlu elemanlar analizinden



# Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Analizi

76

Sonlu elemanlar yöntemleri ile zemin ortamının **başlangıç gerilme durumunu** gerçekçi bir biçimde tanımlamak mümkündür.

Ayrıca yine **gerçekçi bir gerilme-deformasyon ilişkisi** tanımlayarak zemin davranışını modellemek de mümkün olacağından sonlu elemanlar analizleri ile limit denge analizlerinin eksiklikleri kapatılabilir.

Ancak, uzun yıllar sonucu **limit denge** yaklaşımı ile elde edilen **bilgi birikimini, tecrübeyi ve alışkanlıkları** göz ardı etmemek gerekir.

Sonlu elemanlar analizi sonucunda limit dengede olduğu gibi **belirgin bir kayma yüzeyi** elde etmek **her zaman mümkün olmayabilir**. Ama sonlu elemanların da kendine has yöntemleri mevcuttur.

**SRM:** Bir şev için güvenlik katsayısı, zeminin mukavemet parametreleri olan  $\tan \phi$  ve  $c'$ 'nin ardışık bir şekilde azaltılması sonucunda şevi göçmeye götürecek değer olarak tanımlanmıştır. Bu tekniğin kullanılmasıyla, mobilize olan kayma mukavemeti parametreleri aşağıdaki bağıntılardan elde edilebilir.

Mukavemet parametrelerini azaltmak için kullanılan değer güvenlik katsayısı olarak da ifade edilebilir.

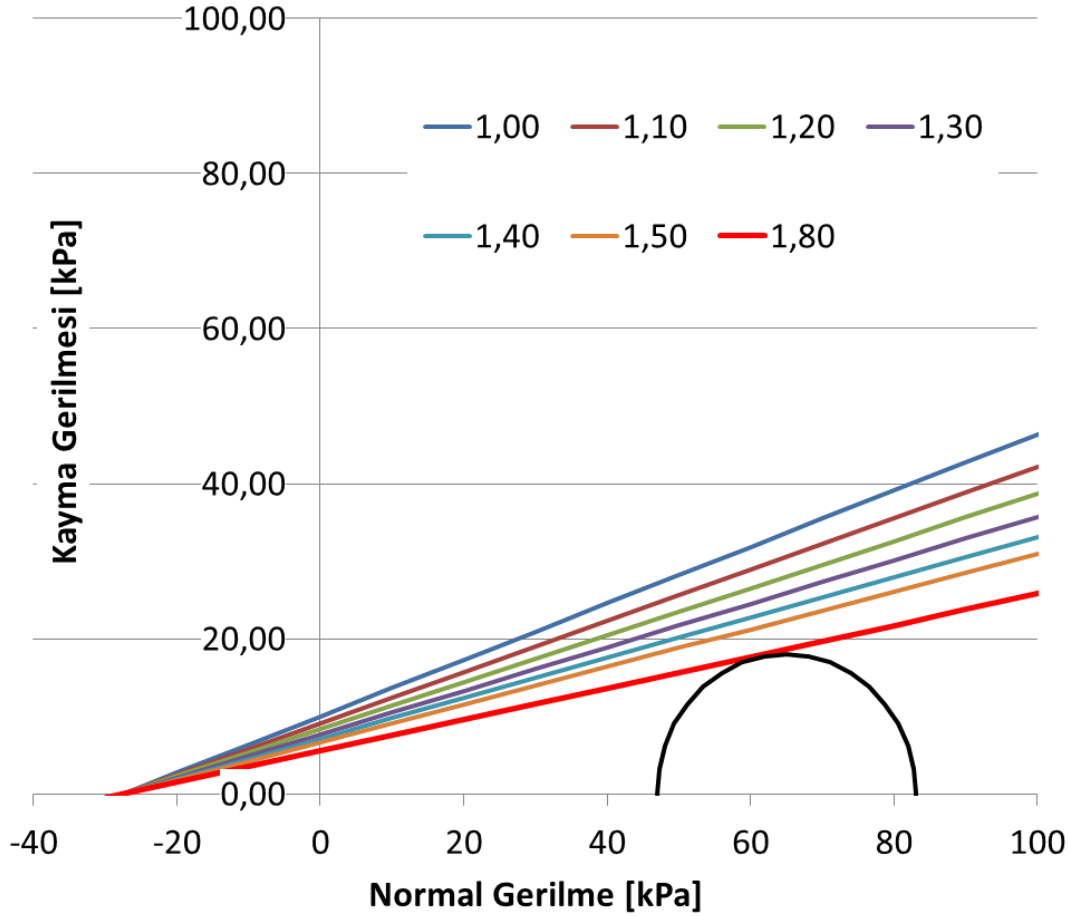
$$c'_m = \frac{c'}{FS_{SRM}} \quad \phi'_m = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(\phi')}{FS_{SRM}} \right)$$

**NOT:** SRM'nin Türkçe karşılığı için «mukavemet azaltma yöntemi» makul görülmüştür.

# Mukavemet Azaltma Yöntemi

78

## SRM ile kırılma zarfının ötelenmesi



FS <sub>SRM</sub>	c (kPa)	φ (°)	FS <sub>SRM</sub>	c (kPa)	φ (°)
1,00	10,0	20,0	1,30	7,69	15,64
1,05	9,52	19,12	1,35	7,41	15,09
1,10	9,09	18,31	1,40	7,14	14,57
1,15	8,70	17,56	1,45	6,90	14,09
1,20	8,33	16,87	1,50	6,67	13,64
1,25	8,00	16,23	1,55	6,45	13,21

$$c'_m = \frac{c'}{FS_{SRM}}$$

$$\phi'_m = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(\phi')}{FS_{SRM}} \right)$$

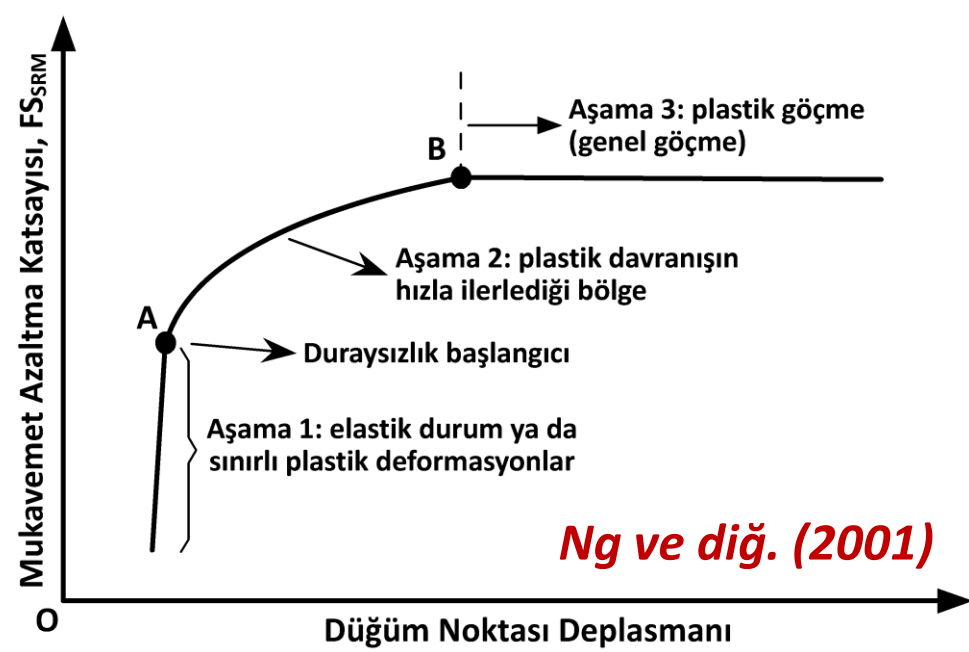
# Mukavemet Azaltma Yönt.

79

**Aşama 1:** Şev elastik durumda olabilir ya da şev içinde küçük ve birbirinden bağımsız plastik yüzeyler oluşabilir. Bu bölgede SRM değerleri artsa dahi düğüm noktası deplasmanları çok az değişkenlik gösterir.

A noktası şev dengesi bakımından kritik bir eşik olarak tanımlamışlar ve bu noktadan sonra birbirinden bağımsız olarak gelişen plastik bölgelerin birleşerek büyüyeceğini ifade etmişlerdir.

A noktasındaki SRM değerinin şev için başlangıç güvenlik katsayısı olarak tanımlanmasını önermişlerdir.



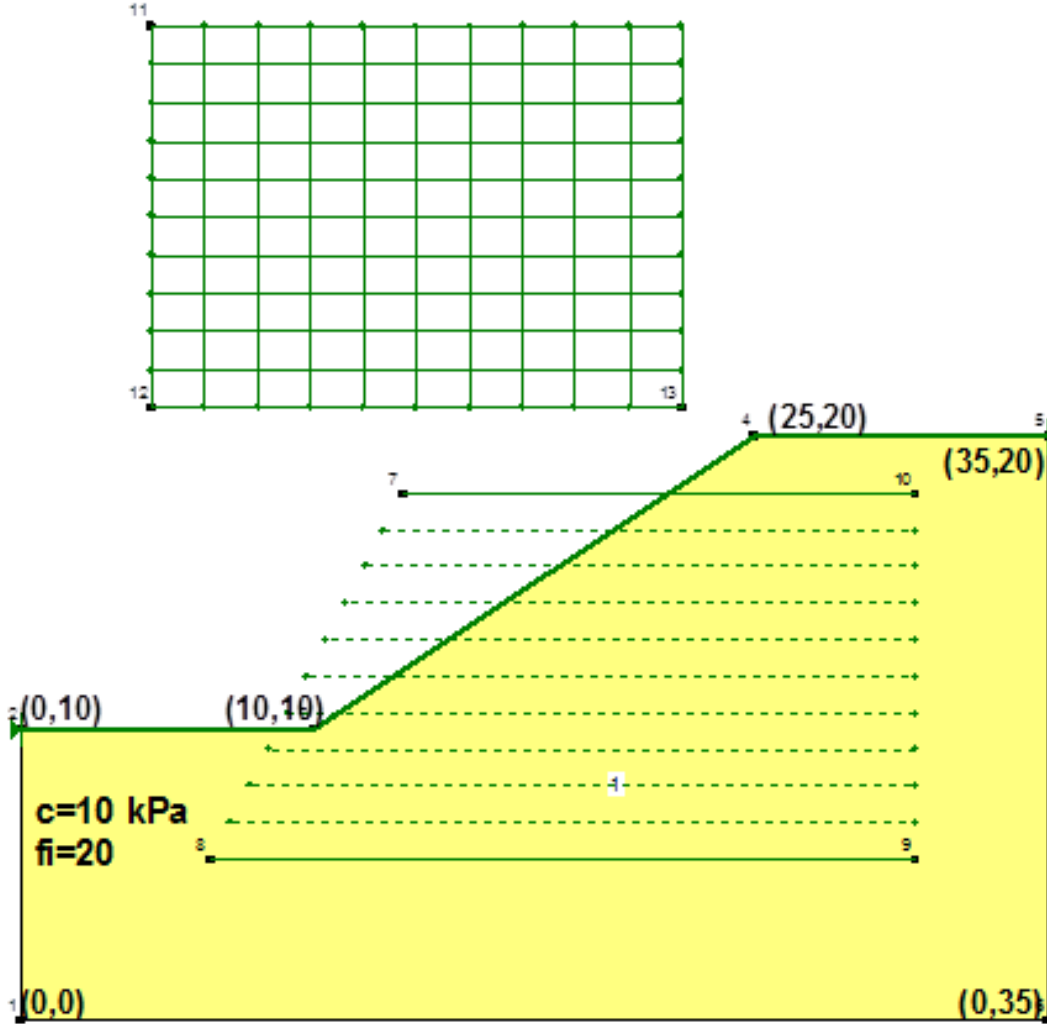
**Aşama 2:** B noktasına yaklaştıkça, sayısal hesapta yakınsama sorunları oluşacak ve kontrol edilemeyen büyük deplasmanlar oluşacaktır. Bu nedenle SRM değeri B noktası civarında yaygın ve büyük plastik deformasyonlar oluşacaktır.

B noktasında genel göçmenin olduğu SRM değerinin de şevin genel göçmeye karşı güvenlik katsayısıdır ( $FS_{SRM}$ ).



# Bir Örnek : SRM & Limit Denge

80



Cai ve Ugai (2000), Wei ve diğ. (2009) tarafından incelenen şev geometrisi ve zemin özellikleri kullanılmıştır.

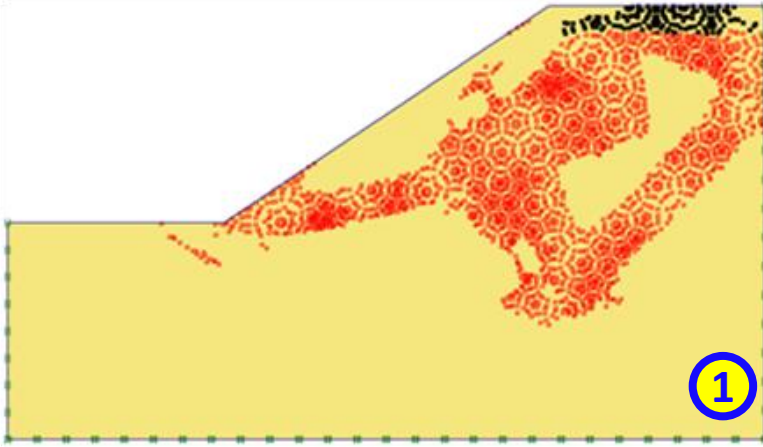
**Analizler ve şekiller Tekin (2011)'den alınmıştır.**

Wei ve diğ. (2009) Flac3D programı ile yaptıkları analiz sonucunda **FS=1,18** olarak hesaplamıştır.

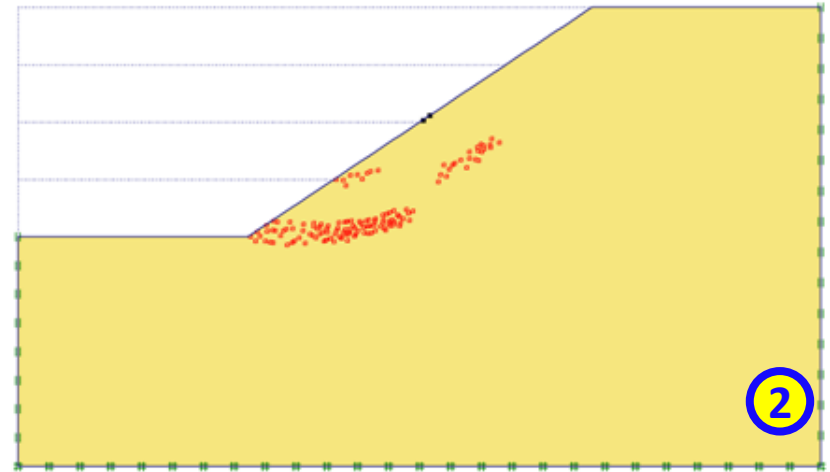
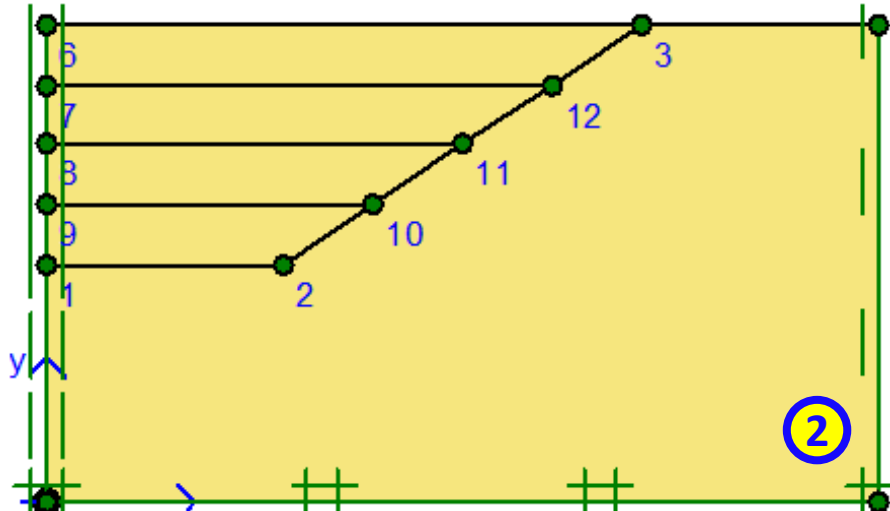
# Bir Örnek : SRM & Limit Denge

81

## Başlangıç Gerilme Durumu:

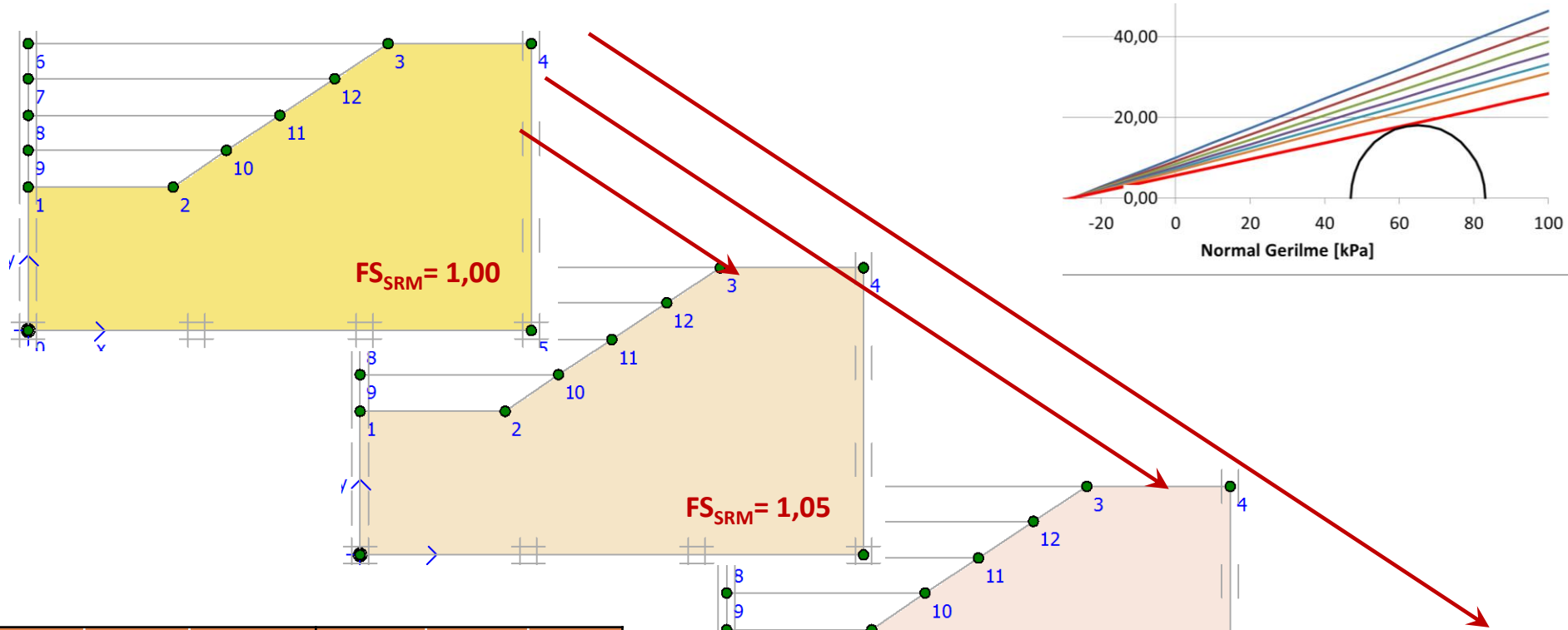


- (1)  $K_0$  yada gravity condition ile elde edilen gerilme dağılımı göçme noktaları için fazlasıyla abartılıdır.  
(2) Eğimli yüzeylerin başlangıç gerilme durumunu kademeli kazı tekniği ile oluşturmak daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.



# Bir Örnek : SRM & Limit Denge

82



$FS_{SRM} = 1,00$

$FS_{SRM} = 1,05$

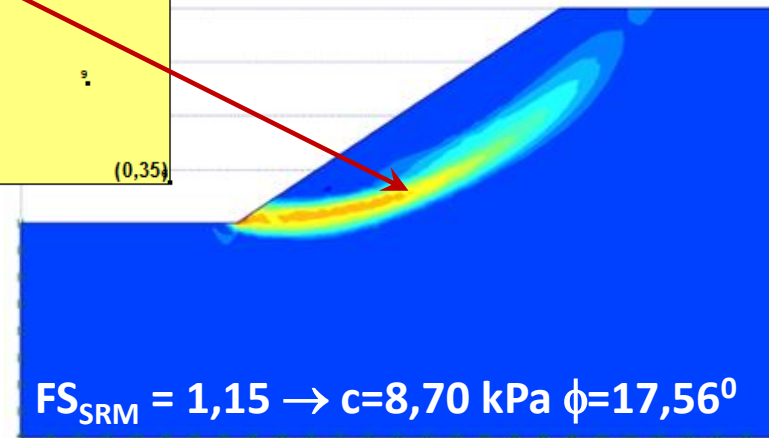
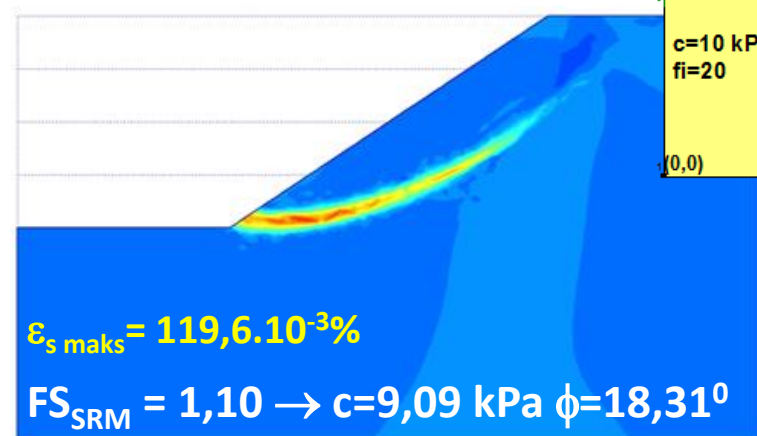
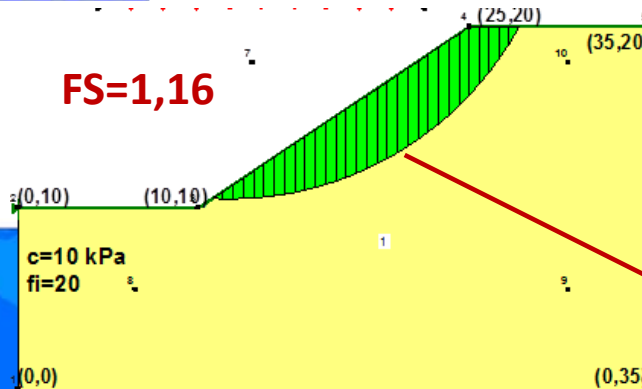
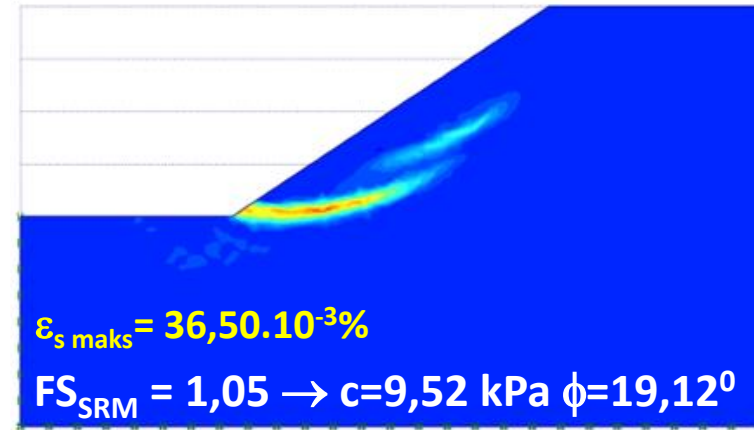
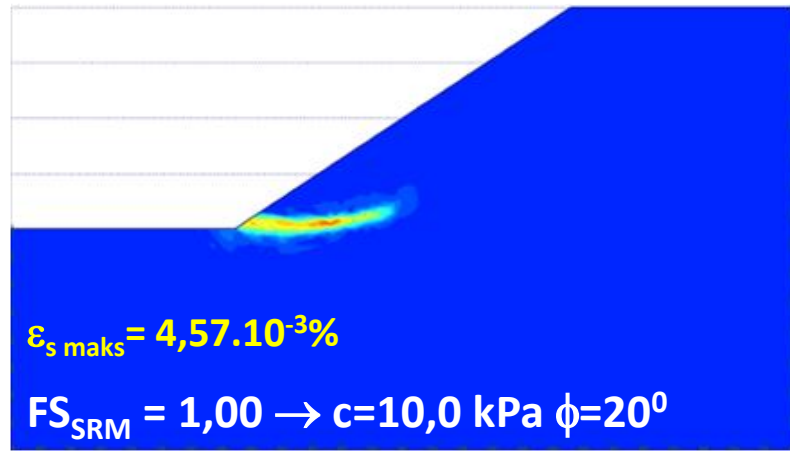
$FS_{SRM} = 1,10$

$FS_{SRM} = 1,15$

$FS_{SRM}$	c (kPa)	$\phi$ (°)	$FS_{SRM}$	c (kPa)	$\phi$ (°)
1,00	10,0	20,0	1,30	7,69	15,64
1,05	9,52	19,12	1,35	7,41	15,09
1,10	9,09	18,31	1,40	7,14	14,57
1,15	8,70	17,56	1,45	6,90	14,09
1,20	8,33	16,87	1,50	6,67	13,64
1,25	8,00	16,23	1,55	6,45	13,21

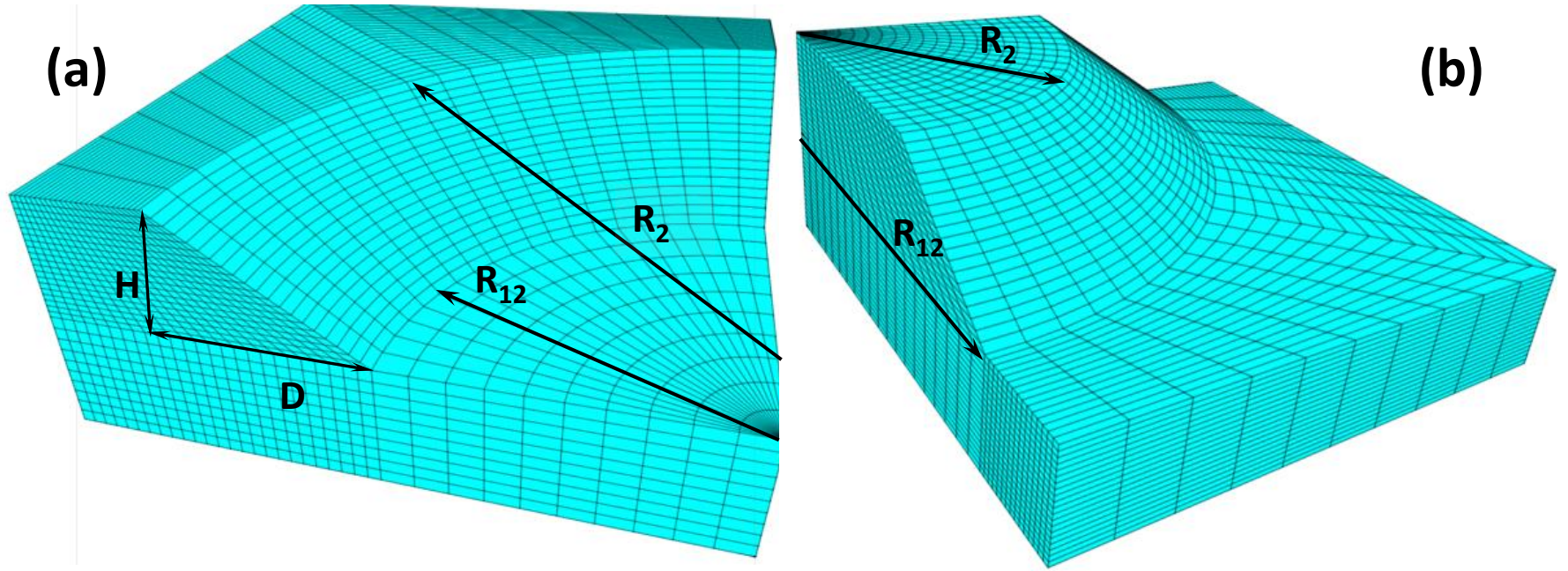
# Bir Örnek : SRM & Limit Denge

83



# Şevlerde 3 boyut etkisi (Keleşoğlu, 2016)

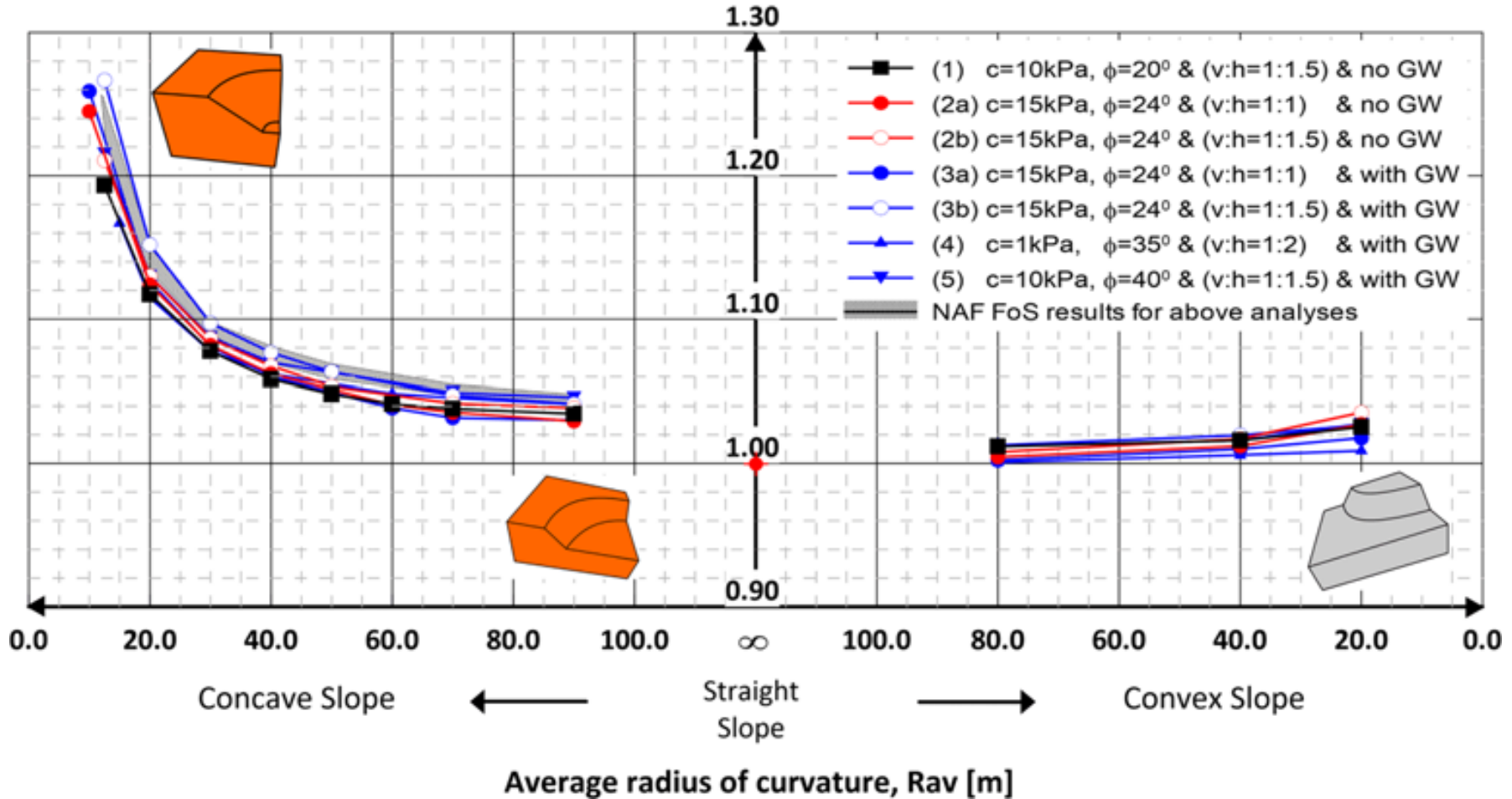
84



# Şevlerde 3 boyut etkisi (Keleşoğlu, 2016)

85

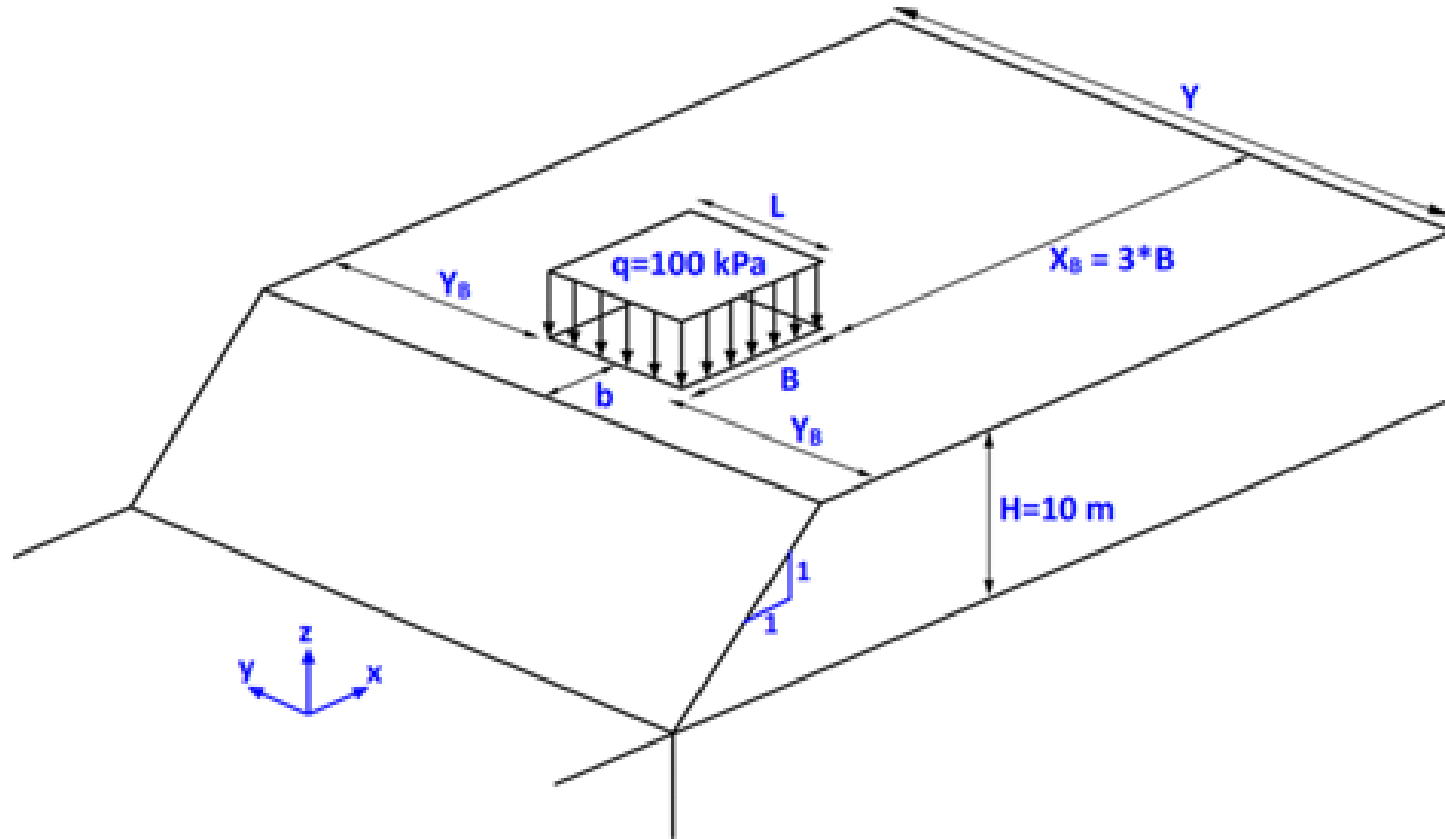
$$FoS_{normalized} = FoS_{3D} / FoS_{straight}$$





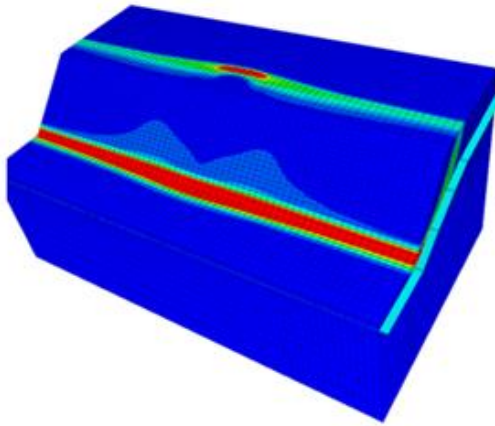
# Şevlerde 3 boyut etkisi (Keleşoğlu, 2016)

86

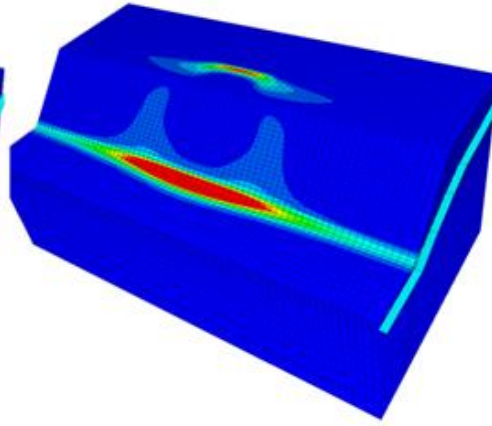


# Şevlerde 3 boyut etkisi (Keleşoğlu, 2016)

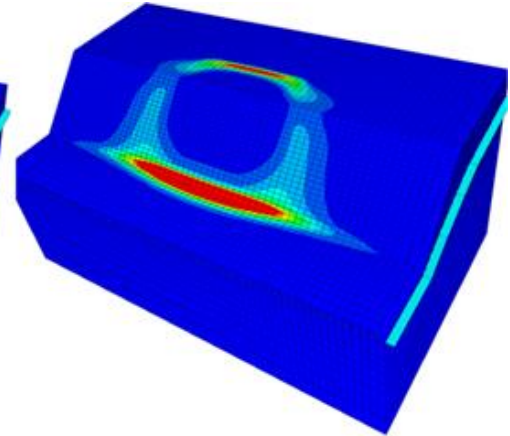
87



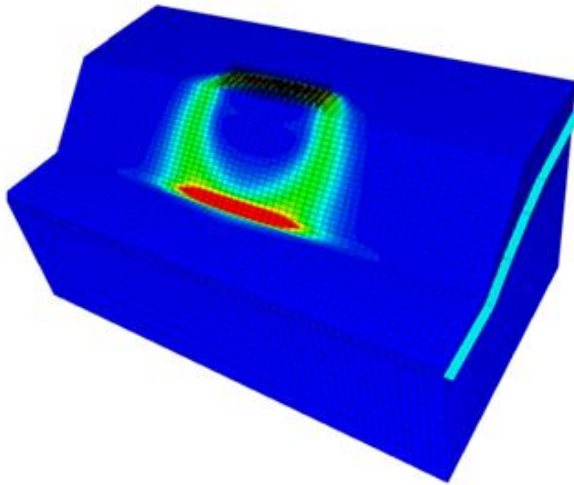
(a)  $b=2\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$ ,  $L=6\text{m}$ ,  $Y_B/L=5$   
FoS = 1.26



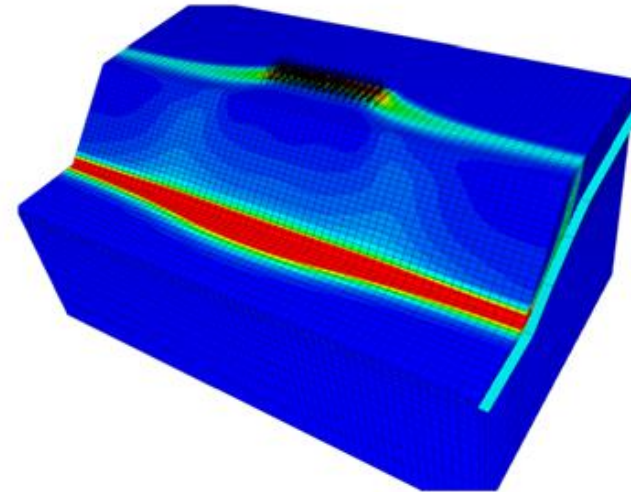
(b)  $b=2\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$ ,  $L=10\text{m}$ ,  $Y_B/L=3$   
FoS = 1.23



(c)  $b=2\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$ ,  $L=16\text{m}$ ,  $Y_B/L=1.5$   
FoS = 1.18



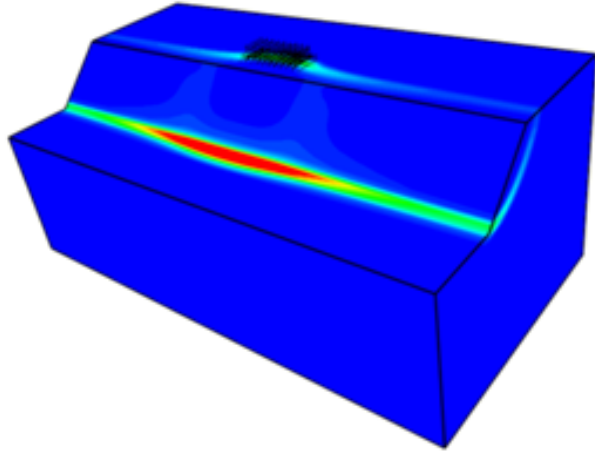
(d)  $b=0\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$ ,  $L=16\text{m}$ ,  $Y_B/L=1.5$   
FoS = 1.10



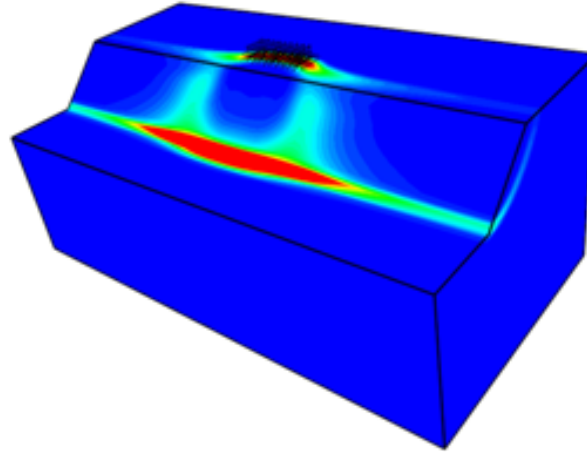
(e)  $b=4\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$ ,  $L=16\text{m}$ ,  $Y_B/L=1.5$   
FoS = 1.23

# Şevlerde 3 boyut etkisi (Keleşoğlu, 2016)

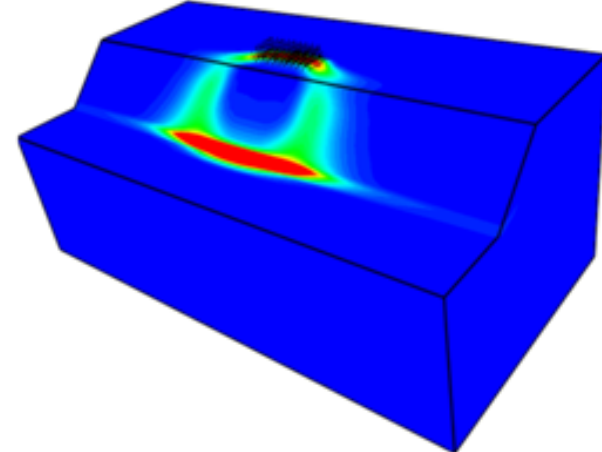
88



(a)  $q = 3 \cdot 18 = 54$  kPa  
 $q/\gamma H = 0.38$



(b)  $q = 4 \cdot 18 = 72$  kPa  
 $q/\gamma H = 0.50$



(c)  $q = 5 \cdot 18 = 90$  kPa  
 $q/\gamma H = 0.63$

# Şevlerin İyileştirme Teknikleri = Stabilizasyonu

89

- Yüzeysel ve Derin Drenaj
- Hafifletme
  - Şev Geometrisinin Değiştirilmesi
  - Hafif Dolgu Kullanımı
- Duvarlarla Stabilizasyon
  - İstinat Duvarıyla Stabilizasyon
  - Dolgulu Çerçeve Duvarlarıyla Stabilizasyon
  - Sandık Duvarlar
  - Ankraj Duvarları/Perdeler
  - Pasif Kazıklar
- Şevin Donatılandırılması
  - Zemin Çivisi
  - Çakıl Dolgulu Hendek ya da Taş Kolonlar
  - Mini Kazıklar
  - Geofabrik Uygulaması
- Payandalama
- Ek Dolgular
- Zemini Sıkılaştırma
  - Sıkıştırılmış Zemin-Çimento Dolgusu
  - Elektro-ozmoz
  - Termal İyileştirme
  - Önkonsolidasyon

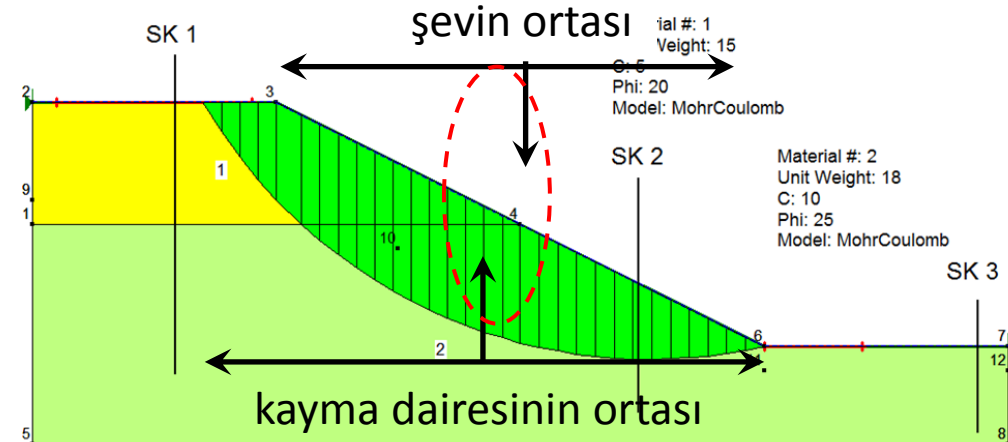
# Şev Stabilizasyonu – Hangi Yöntem

- Yamaçların **kazıklarla** desteklenmesi çok sık uygulanan bir yöntemdir.
- Ancak, kazıklar sadece **oluşan kaymayı** durdurmak veya yavaşlatmak için alınan bir önlemdir ve çoğunlukla kaymaya neden olan ana etkeni gidermez.
- Bazı durumlarda **yeraltı su seviyesinin düşürülmesi** güvenlik seviyesinin artırılması için **başlı başına kazıklardan daha etkilidir.**
- Diğer etkili yöntemler **yük azaltılması** ve **topuk** yapılmasıdır. Ancak bu uygulamalar için çevre yapıların da müsait olması gereklidir.

# Kazıklarla Desteklenen Şevlerin Analizi

91

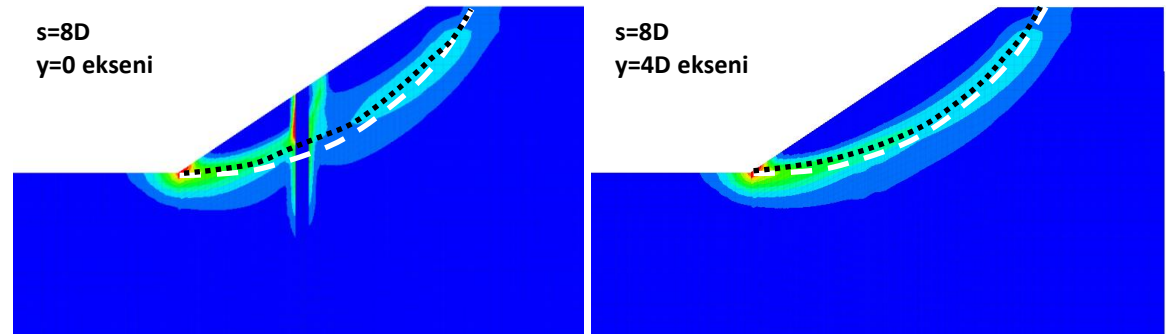
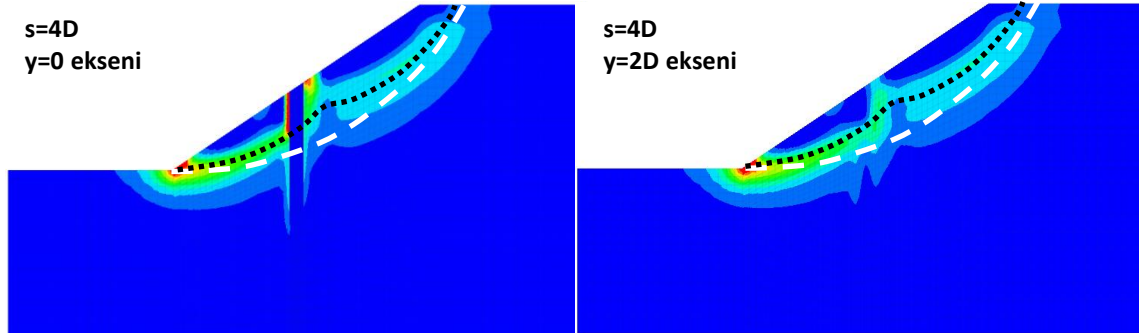
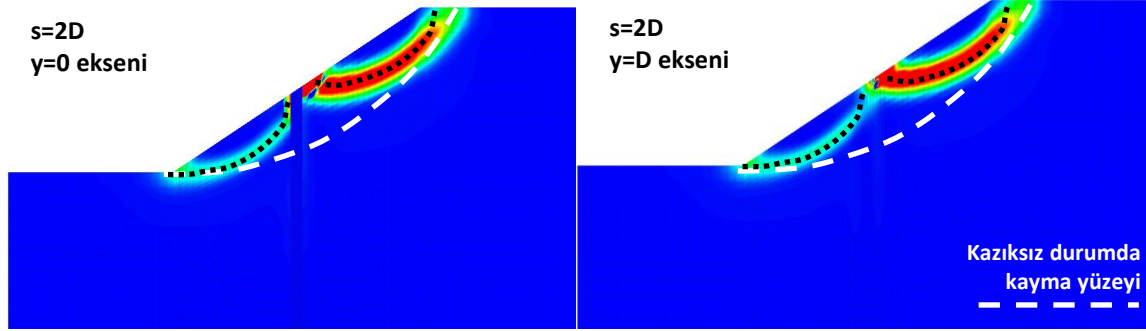
- Kazıklı şevlerin tasarımı son derece karmaşık bir konudur. Problemin doğası **üç boyutlu** analiz gerektirir. Ancak, hesap kolaylığı için iki boyutlu analiz yapılır.
- **Kazık araları**ndaki davranış hesaba katılmaz.
- **Kazıkların nereye yapılacağı son derece önemli bir konudur.** Bu konuda yapılan çalışmalara göre kazıklar için en uygun yer:
  - **şevin orta noktası ile**
  - **en kritik kayma dairesinin orta noktası arasında kalan bölgedir.**





# Kazıklarla Desteklenen Şevlerin Analizi (Keleşoğlu, 2016)

92



# Kazıklarla Desteklenen Şevlerin Analizi

93

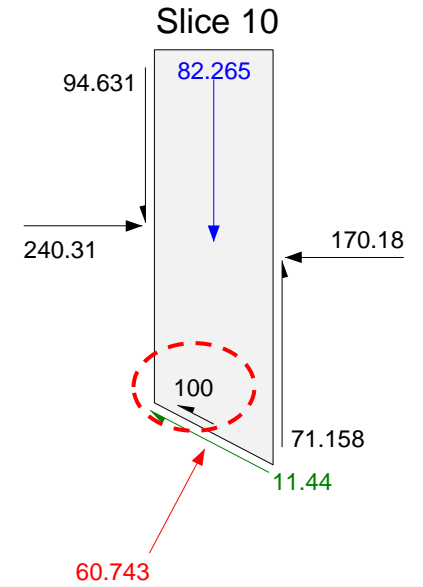
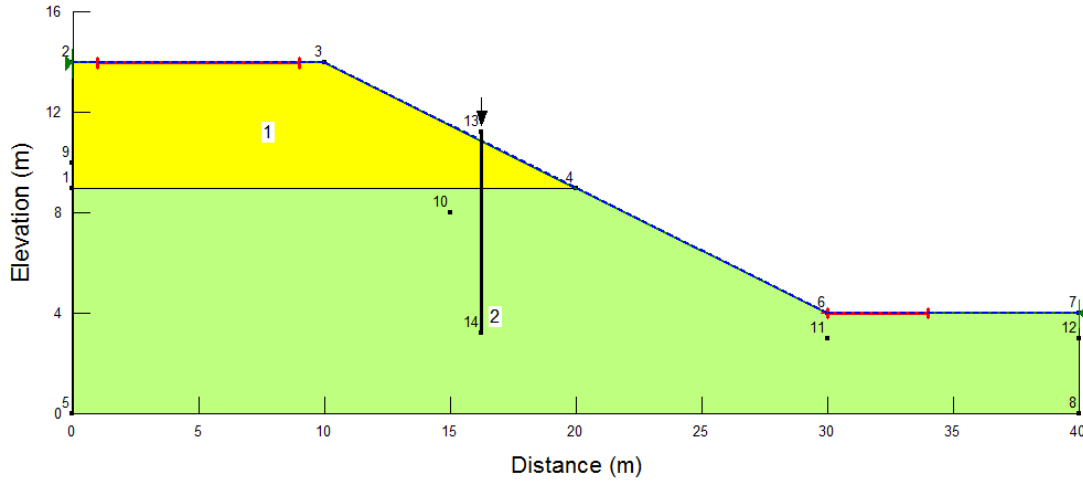
- Birçok limit denge programında kazıklar taşıyabildikleri kesme kuvvetleri ile tanımlanırlar. Yani kazık bir yatay kuvvet ile temsil edilir.
- Ancak, bu yöntemin gerçekçi olabilmesi için kazığa gelen yatay kuvvetin hesaplanması gereklidir ki bu hesap oldukça karmaşıktır. Bu nedenle her programın kendine has ve daha basitleştirici bir tanımlaması olabilir. **Kullanıcıların bu tanımlama ve geçerliliği hakkında bilgi sahibi olması ve dikkatli davranması gerekir.**
- Örneğin, bir kazığa birim genişlikten etkiyen kesme yükü 100 kN/m olsun...

*Kazıklarla şev stabilitesi için önerilen kaynaklar:*

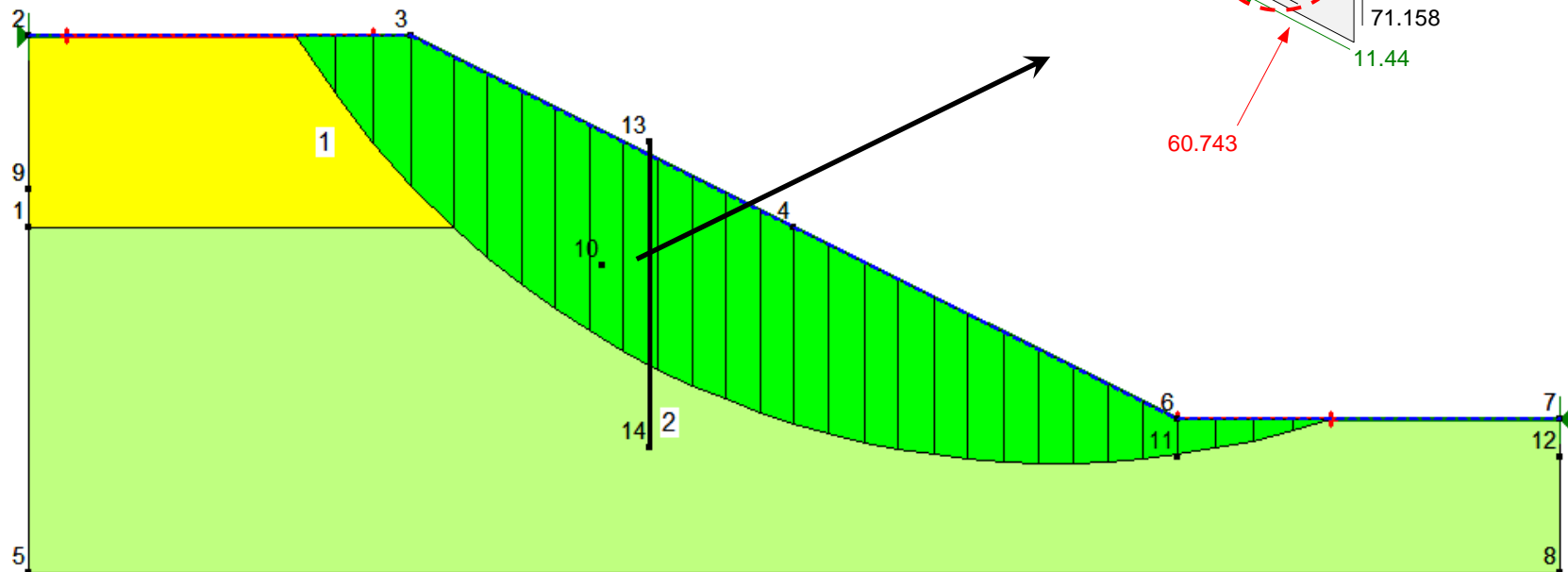
*Ito ve Matsui (1975), Cai ve Ugai (2000), Wei ve diğ. (2009)...*

# Kazıklarla Desteklenen Şevlerin Analizi

94



1.156

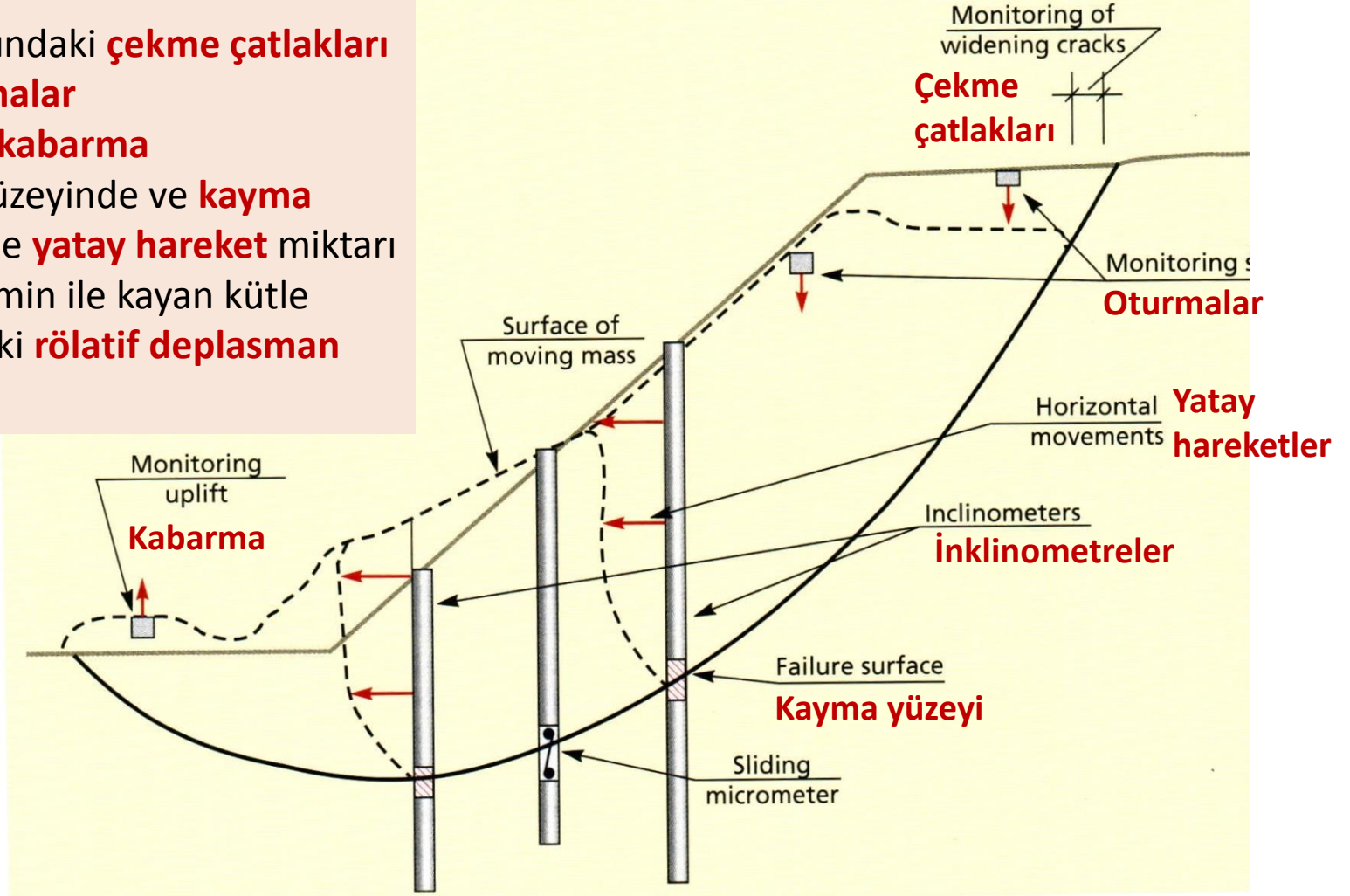


# Şevlerin Aletsel Gözlem ile Takibi

95

Bir şev hareketinde ölçülmesi gerekenler:

- ❑ Taç kısmındaki **çekme çatlakları** ve **oturmalar**
- ❑ Topukta **kabarma**
- ❑ **Zemin** yüzeyinde ve **kayma** yüzeyinde **yatay hareket** miktarı
- ❑ Stabil zemin ile kayan kütle arasındaki **rölatif deplasman** miktarı



**Bu sunumu hazırlarken kullanılan belli başlı kaynaklar aşağıda verilmektedir.**

- BISHOP, A. W., 1955, The Use Of Slip Circle In The Stability Analysis.
- BROMHEAD, E. N., 1986, The Stability of Slope. Surrey University press, A.B.D
- CAI, F. ve UGAI, K., 2000, Numerical analysis of the stability of a slopes reinforced with piles, Soils and Foundations, 40, 73-84
- CHENG, Y.M. ve LAU, C.K., 2008, Slope Stability Analysis and Stabilization-New Methods and Insight, Taylor&Francis
- FELLENIUS, W.,1927, Erolstatische Berechnungen W.Ernst&Sohn, Berlin
- FREDLUND-KRAHN-PUFAHL., 1981, The relationship between limit equilibrium slope stability methods.
- JANBU, N., 1976, Slope stability computations Embank Dam Engineering (Eds. Hirschfeld&Poulos) J. Wiley, NewYork.
- KRAHN, J., 2004, Stability modelling with SLOPE/W, printed in Canada.
- KELESOGLU, M.K., 2016, The Evaluation of Three-Dimensional Effects on Slope Stability by the Strength Reduction Method, KSCE Journal of Civil Engineering (2016) 20(1):229-242
- MORGENSTERN, N.R. ve V.E. PRICE., 1965, The analysis of the stability of general slip surfaces Geotechnique 15: 1: 79

**Bu sunumu hazırlarken kullanılan belli başlı kaynaklar aşağıda verilmektedir.**

- NG, C.W.W., ZHANG, L.M. ve HO, K.K.S., 2001, Three-dimensional analysis of the performance of laterally loaded sleeved piles in slope ground. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.
- ÖNALP, A ve AREL, E., 2004, Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- J. DAVID ROGERS, Introduction to Slope Stability And Landslides, Powerpoint Presentation
- SLOPE/W Manual
- SPENCER, E., 1967 A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces Geotechnique 17:1:11-26
- TEKİN, A., 2011, Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilitesi Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- VALLEJO, L.G. ve FERRER, M., 2011, Geological Engineering, CRC Press
- WEI W.B., CHENG Y.M., LI L., 2009, Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods, Comput Geotech, 36, 70-80

**İLGİNİZ İÇİN TEŞEKKÜR EDERİM...**