

ŞEVLERİN STABİLİTESİ

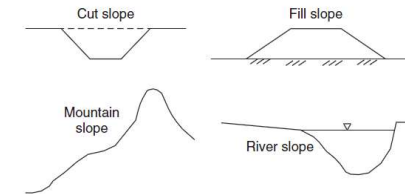
DOÇ. DR. ERDAL UNCULOĞLU

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
GEOTEKNIK ANABİLİM DALI
2019

1

Doğal veya yapay zemin kütlelerinin eğik yüzeylerine **şev** adı verilmektedir. Şevler, **doğal ve insan yapısı** şevler olmak üzere iki gruba ayrılabilirler.

Kazı veya dolgu yoluyla inşa edilen insan yapısı şevler, baraj ve yol yapılarında olduğu gibi kalıcı olarak veya temeller (temel çukuru açılması) ve yer altı yapılarında (boru hattı vb.) olduğu gibi geçici olarak inşa edilebilirler.



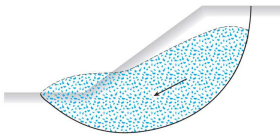
Doğal ve İnsan Yapımı Şevler

2

2

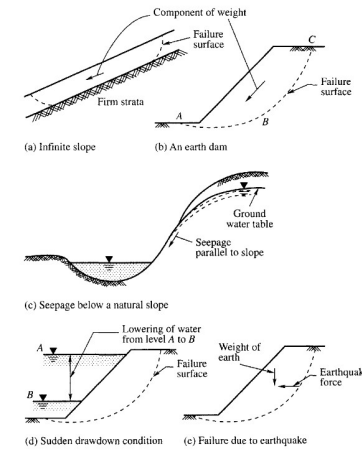
Şev yüzeyi altındaki zeminin göçmesine (kırılmasına) şev kayması (toprak kayması, heyelan vb.) denilir.

Kayma; bir göçme yüzeyi üzerindeki zemin kütlelerinin aşağı doğru hareketi olarak tanımlanır.



3

3



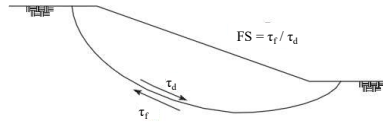
Şevlere Etkiyen Kuvvetler

Eğik yüzeylerle yani şevlerle sınırlanmış zemin kütleleri kendi ağırlıkları ve bazı hallerde de ilave kuvvetler (zemin kütlesi üzerindeki ağırlıklar, yer üstü ve yer altı su hareketlerinden doğan kuvvetler, şeve bitişik su seviyesinin aniden düşmesi, deprem vb.) sebebi ile aşağı doğru hareket etmektedirler.

4

4

Bu kuvvetler zemin kütleğinde kayma gerilmeleri, τ_d , doğurur. Herhangi bir noktadan geçen herhangi bir düzlemdeki kayma gerilmesi, aynı düzlemde doğan kayma mukavemetinden, τ_f , küçükse şevin o düzlem üzerinde stabilitesi vardır. Aksi halde, o düzlemde şevin stabilitesi yoktur. Şev kaymasına karşı güvenlik katsayısı da $FS = \tau_f / \tau_d$ dir.



Uygulamada; $FS = \tau_f / \tau_d$ yaklaşımının geçerli olabilmesi için hesaplamalarda kullanılan zemin mukavemeti parametrelerinin (c ve ϕ) sahadaki mevcut koşulları (aşırı veya normal konsolide kil, sıkı veya gevşek kum, drenaj ve yükleme koşulları) gerçekçi olarak yansıtırması gerekmektedir. Literatürde, güvenlik sayısının 1.5 veya daha büyük olduğu durumlarda şev kaymalarının meydana geldiği rapor edilmiştir. bunun nedeni, gerçekte olduğundan daha yüksek kayma mukavemeti değerleri kullanılmış olmasıdır.

5

$$FS = \tau_f / \tau_d$$

τ_f ; zeminin ortalama kayma mukavemetidir.

τ_d ; potansiyel göçme yüzeyi boyunca gelişen ortalama kayma gerilmesidir.

FS ; mukavemete göre güvenlik katsayısıdır.

τ_f ; zeminin kayma mukavemeti olup τ_d 'nin maksimum değeri ve göçme anındaki mobilize haldeki kayma gerilmesidir. Göçme olmadıkça kayma gerilmesi τ_f değerine ulaşamaz.

Şevler, zemin kütleğinde ya **kayma gerilmelerinin artması** ya da **kayma direncinin azalması** sonucu kayarlar.

Şevin yüklenmesi, şev eğiminin artırılması, şev topuğunun kazı, oyulma vb. nedenlerle boşalması zemin kütleğinde kayma gerilmelerinde artışa neden olurken kohezyonlu zeminlerde su muhtevasının artması, deprem etkileri ve boşluk suyu basıncındaki artışlar da zemin kütleğinde kayma direncinin azalmasına neden olmaktadır.

6

Bir zeminin kayma mukavemeti, kohezyon ve içsel sürtünme açısı adları verilen iki bileşenden oluşur. Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanılarak hesaplanan zemin kayma mukavemeti toplam ve efektif gerilmeler cinsinden 1 ve 2 no lu eşitliklerde gösterildiği gibi tanımlanır.

$$\tau_f = c_u \quad (1)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

c_u : drenajsız kohezyon,

c' : efektif kohezyon,

ϕ' : efektif içsel sürtünme açısı,

σ' : potansiyel kayma yüzeyi üzerinde etkiyen efektif normal gerilme.

Benzer şekilde; potansiyel kayma yüzeyi boyunca gelişen ortalama kayma gerilmesi de aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\tau_d = c_d' + \sigma' \tan \phi_d' \quad (3)$$

c_d' ve ϕ_d' , sırası ile, potansiyel kayma yüzeyi boyunca gelişen (aktif olan, aktif hale gelen ya da mobilize olan) kohezyon ve içsel sürtünme açısıdır.

7

2 ve 3 no. lu eşitliklerin $FS = \tau_f / \tau_d$ eşitliğinde yerine konması ile güvenlik katsayısı değeri aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir.

$$F_s = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{c_d' + \sigma' \tan \phi_d'} \quad (4)$$

4 numaralı eşitlikten yola çıkarak güvenlik katsayısı kavramını farklı açılardan değerlendirebiliriz. Bunlar; kohezyona göre güvenlik katsayısı, F_c , ve içsel sürtünme açısına göre güvenlik katsayısı F_ϕ dir. F_c ve F_ϕ katsayıları aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanabilir.

$$F_c = \frac{c'}{c_d'} \quad (5)$$

$$F_\phi = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi_d'} \quad (6)$$

4, 5 ve 6 numaralı eşitlikleri karşılaştırdığımızda görürüz ki F_c , F_ϕ 'ye eşit olduğunda mukavemete göre güvenlik katsayısı elde edilir.

8

Ya da;

eğer, $\frac{c'}{c'_d} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_d}$ ise bu durumda aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F_s = F_c = F_\phi \quad (7)$$

$F_s \times 1'$ e eşit olduğunda şev göçme sınırındadır. Genellikle, mukavemete göre güvenlik katsayısı için 1.5 değeri stabil bir şev tasarımı için kabul edilebilir bir değerdir.

Yamaç ve Şevlerde Güvenlik Sayıları (TS8853/Şubat/1991)

Şart	Güvenlik Katsayısı, FS		
	Toplam Gerilme	Efektif Gerilme	Deprem
Dolgularda Yapım Sonu	1.50	-	-
Yarmalar	1.50	1.25	1.0
Barajlarda Sızıntı	1.50	1.25	-
Barajlarda Ani Su Düşmesi	1.50	1.10	-
Laboratuvar Maksimum Direnç Parametrelerinin (peak) Kullanımı ile	1.50	1.35	1.0
Kalıcı dirence Göre	-	1.20	1.0
Uzun Vadede Duraylılık	-	1.20	-
Yamaç Üzerinde Yapı Bulunması	1.80	1.50	1.2
Fisürlü Killer	-	1.50	-

9

9

Dairesel (dönmeli) kayma, daha çok homojen zemin tabakalarında görülmektedir. Kayma yüzeyi daire (silindirik) veya eğri olabilir.

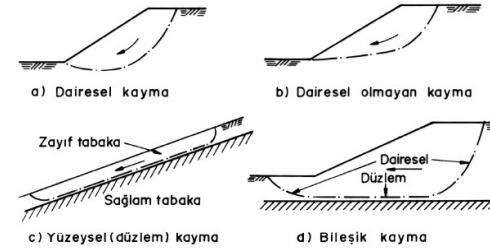
Ötelenme kayması, daha çok, kalınlığı az bir tabakanın yüzeye paralel daha sağlam bir başka tabakanın üzerine oturduğu durumlarda görülür. Bu tip bir kaymada, kayma yüzeyi, genellikle, şev yüzeyine paralel bir düzlemdir.

Bileşik kaymada ise hem dönme hem de ötelenme vardır. Kayma yüzeyi; eğri ve düzlem toplamından oluşur.

11

11

Şevlerde stabilite kaybı, şevi teşkil eden zeminin mukavemet özellikleri, tabakalanma, şev eğimi, hidrojeolojik rejim gibi faktörlere bağlı olarak farklı mekanizmalar sonucunda ortaya çıkabilir. Şevlerde görülen tipik kayma mekanizmaları şekilde gösterilmiştir.



Tipik Kayma Mekanizmaları

10

10

Şevin stabilite (denge, duraylılık) analizi ile anlatılmak istenen husus; mevcut bir şevde kayma tehlikesinin varlığının incelenmesi ya da meydana getirilecek bir şevin güvenli olarak açıldırılmasıdır.

Günümüzde şev stabilitesi analizi amacı ile kullanılan yöntemler iki grupta ele alınabilir. bunlardan daha eski ve çok daha yaygın olarak kullanılan yöntemler grubu, potansiyel bir kayma düzlemi üzerinde yer alan zemin kütlelerinin kuvvet ve/veya moment dengesinin sağlandığı **Limit Denge (Limit Equilibrium Method) Yöntemleridir**. Limit denge yaklaşımında takip edilen yol aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Sistemde kayma mekanizması oluşturacak şekilde bir potansiyel kayma yüzeyi tanımlanır. Kayma yüzeyi, düzlem veya eğri bir yüzey olabileceği gibi herhangi bir kombinasyon da olabilir. Pratikte; çoğunlukla, dairesel silindirik göçme yüzeyleri kullanılmaktadır.
- Kayma yüzeyi üzerinde yer alan zemin kütleleri üzerine etkiyen kuvvetlerin ve/veya momentlerin statik denge durumu dikkate alınarak kayma düzlemindeki mobilize zemin kayma mukavemeti hesaplanır.
- Sistemde kayma mekanizması oluşturabilecek diğer potansiyel kayma yüzeyleri için de mobilize olan kayma mukavemeti hesaplanarak en kritik kayma yüzeyi belirlenir.
- En kritik kayma yüzeyi için hesaplanan güvenlik sayısı, şevin güvenlik sayısı olarak alınır. Elde edilen güvenlik sayısı değeri kabul edilebilir bir büyüklükte ise şevin stabilitesi vardır denilir.

12

12

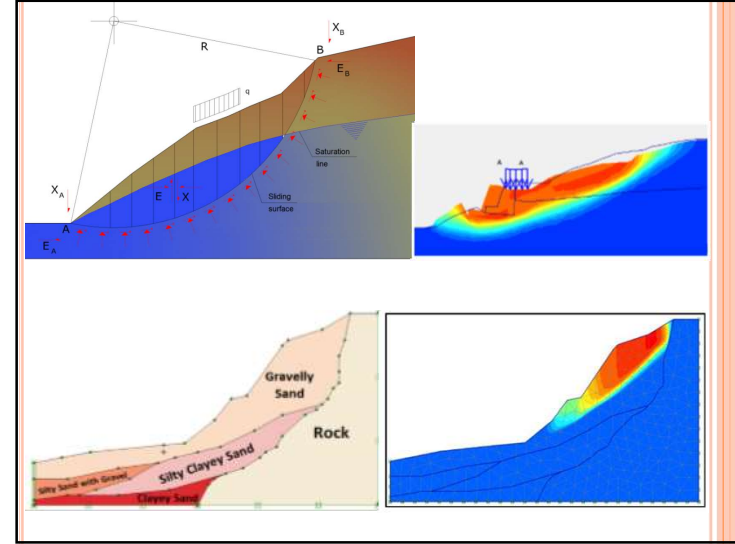
Şev stabilitesi amacı ile kullanılan diğer yöntemler grubunu ise, zeminin gerilme-deformasyon davranışının modellendiği ve çözümlemede genel olarak **Sonlu Elemanlar Yönteminin** kullanıldığı uygulamalar oluşturmaktadır.

Bu tip bir sayısal analiz yaklaşımı ile gerek şevin inşası sırasında gerekse de inşaatın tamamlanması sonrasında zemin içerisinde meydana gelen gerilmelerin, deplasmanların ve boşluk suyu basınçlarının düzeyleri ve dağılımı detaylı olarak hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile zemin davranışının lineer olmayan gerilme-deformasyon modelleri ile ifade edilebilmesi, karmaşık geometri ve sınır koşullarının dikkate alınabilmesi ve inşaat safhalarının modellenmesi mümkün olabilmektedir.

Ancak; bütün bu avantajlarına rağmen problem çözümünün formülasyonu, zemin davranış modeli için gerekli parametrelerin belirlenmesi, hesaplamalar ve sonuçların yorumlanması için gerekli çaba, zaman ve uzmanlaşma ihtiyacı da büyük ölçüde artmaktadır.

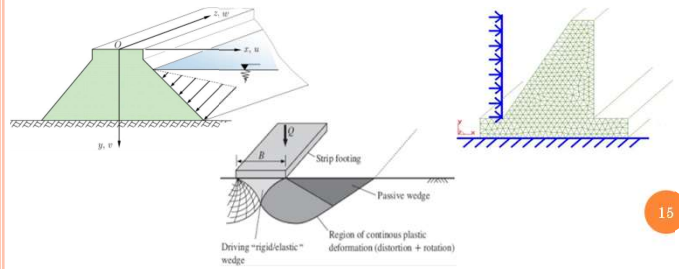
13

13



14

Şev stabilitesi analizlerinde, daima, şevin sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilerek birim genişlik (veya uzunluk) için hesap yapılmaktadır. **Düzlem Deformasyon (Plain Strain)** kabulü olarak adlandırılan bu yaklaşımla gerçekte üç boyutlu ve genellikle çanak şeklinde olan şev kayma yüzeyleri düşey bir yüzey üzerinde iki boyutlu olarak idealize edilmektedir. Üç boyutlu bir yüzey üzerindeki kayma durumunun iki boyuta indirgenmesi halinde şev stabilitesi için göreceli olarak daha küçük güvenlik katsayıları elde edilmektedir. Bu nedenle de iki boyutlu analiz yaklaşımı genel olarak konservatiftir.



15

15

Genel olarak bir şev için kritik güvenlik katsayısı bulunurken bir dizi potansiyel kayma yüzeyi için güvenlik sayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda kritik kayma yüzeyinin konumu kabaca belirlenebilmekle birlikte, genellikle, düzinelerle analiz yapılması gerekmektedir. Bu yüzden; uygulamada bu işlem yaygın olarak bilgisayar programları kullanılarak yapılmaktadır.

Şev stabilitesi analizi için Limit Denge Yöntemine dayalı analiz yöntemi seçiminde kayma yüzeyinin muhtemel şeklinin dikkate alınarak dairesel veya dairesel olmayan yüzeylerle analiz yapan uygun bir yöntemin tercih edilmesi gerekir.

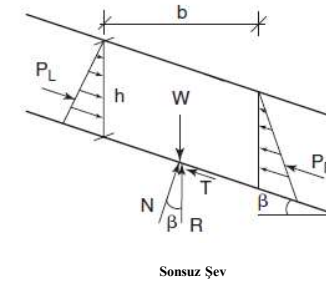
16

16

SONSUZ ŞEVLERİN STABİLİTESİ (DÜZLEM YÜZEYDE KAYMA ANALİZİ)

17

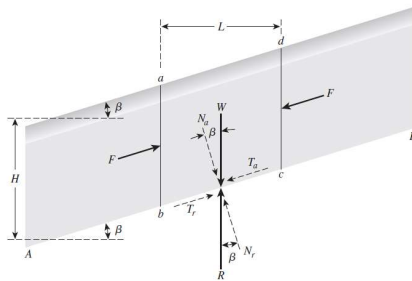
Uzunluğu, derinliğine göre çok büyük olan ve şev yüzeyine paralel bir yüzey (düzlem) boyunca oluşan kaymalar, kayma kütlelerinin her iki ucundaki etkiler ihmal edilerek, sonsuz şev kaymaları olarak düşünülebilir. Sonsuz şev kaymaları, homojen bir zemin kütlelerinde meydana gelebildiği gibi şev yüzüne paralel tabakalanma gösteren zemin kütlelerinde de görülebilir.



18

18

Boşluk suyu basınçlarının sıfır olduğunu varsayarak, zemin yüzeyinden H derinliğinde yer alan bir AB düzlemi boyunca oluşacak muhtemel bir şev göçmesine karşı güvenlik katsayısını değerlendireceğiz. Şev göçmesi, AB düzlemi üzerinde yer alan zeminin sağdan sola doğru hareketi ile meydana gelebilir. Şekilde gösterilen kesit düzlemine dik doğrultuda birim uzunluğa sahip bir şev elemanını (abcd) ele alalım. abcd elemanının ab ve cd yüzlerine etkiyen F kuvvetleri (toprak basınç kuvvetleri) eşit ve zıt yönlü olduğu için ihmal edilebilir.



19

19

Zemin elemanının ağırlığı; $W = (\text{zemin hacmi}) \times (\text{zeminin birim hacim ağırlığı}) = \gamma L H$ dir.

Zemin elemanının W ağırlığı iki bileşene ayrılabilir.

AB düzlemine dik olan kuvvet bileşeni, $N_a = W \cos \beta = \gamma L H \cos \beta$

AB düzlemine paralel olan kuvvet bileşeni, $T_a = W \sin \beta = \gamma L H \sin \beta$

T_a , AB düzlemi boyunca kaymaya neden olan kuvvettir.

abcd şev elemanının tabanında etkiyen efektif normal gerilme ve kayma gerilmesi (kayma gerilmesi suyun varlığından etkilenmediğinden toplam ya da efektif ayrımı yapılmıyor.) sırası ile aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanabilir.

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{Area of base}} = \frac{\gamma L H \cos \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos^2 \beta \quad \tau = \frac{T_a}{\text{Area of base}} = \frac{\gamma L H \sin \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

$L/x = \cos \beta$ ise $x = L/\cos \beta$ dir. x denilen mesafe ad ya da bc uzunluğudur.

20

20

abcd zemin elemanının ağırlığına, W , karşı ona eşdeğer şiddette ve zıt yönlü olan reaksiyon kuvveti R mevcuttur. R kuvvetinin AB düzlemine dik ve teğet bileşenleri de sırası ile aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$N_r = R \cos \beta = W \cos \beta$$

$$T_r = R \sin \beta = W \sin \beta$$

abcd zemin elemanının denge durumunun korunması için, zemin elemanının tabanında gelişen karşı koyan kayma gerilmesinin ifadesi

$$(T_r) / (\text{zemin elemanı taban alanı}) = \gamma H \sin \beta \cos \beta \quad \text{dir.}$$

Karşı koyan kayma gerilmesi, ayrıca, $\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d$ şeklinde de yazılabilir.

Bu durumda; $\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d$ eşitliği aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\gamma H \cos \beta \sin \beta = c'_d + \gamma H \cos^2 \beta \tan \phi'_d$$

21

$c'_d = c'/FS$ ve $\tan \phi'_d = \tan \phi/FS$ olarak düzenlenir ve güvenlik katsayısı çekilirse aşağıda verilen ifade elde edilir.

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

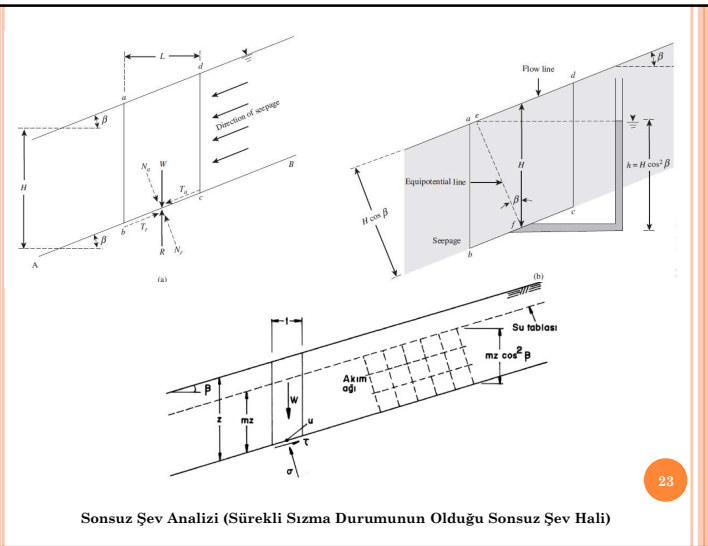
- $c' = 0$ olan granüler zeminlerde (kum zeminlerde) güvenlik katsayısı, $FS = \tan \phi' / \tan \beta$ dir. Kum zeminlerde, güvenlik katsayısı, şevin yüksekliğinden bağımsız olup $\beta < \phi'$ olduğu süreçte şev stabildir.
- $c - \phi$ zeminlerde kritik denge durumunun olduğu düzlemin derinliği, $FS = 1$ alınarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')}$$

22

21

22



23

23

Su seviyesinin kayma yüzeyinden mz ($0 < m < 1$) mesafesinde yer aldığı ve şeve paralel sızma halinde olduğunu kabul edelim. Bu durumda; şev üzerindeki düşey bir zemin diliminin her iki yanında etkiyen kuvvetler zıt yönlü ve birbirine eşit olacaktır.

Kayma düzlemi üzerinde efektif gerilmeler cinsinden zemin kayma mukavemeti, $\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$ olup toplam gerilme analizi durumunda, boşluk suyu basıncı sıfır alınarak c_u ve ϕ_u değerleri kullanılır.

Bu eşitliklerde yer alan;

$$\sigma = \{(1-m)\gamma + m\gamma_{doymun}\} z \cos^2 \beta$$

$$\tau = \{(1-m)\gamma + m\gamma_{doymun}\} z \sin \beta \cos \beta$$

$$u = mz\gamma_{su} \cos^2 \beta$$

Zemin elemanı tabanında etkiyen boşluk suyu basıncının hesabı için gerekli olan su yüksekliği, elemanın tabanının merkezine yerleştirilen piezometre aracılığı ile elde edilir.

Yer altı su seviyesi zemin yüzeyinde iken;

$$\tau_d = c'_d + (\sigma - u) \tan \phi'_d = c'_d + (\gamma_{doymun} H \cos^2 \beta - \gamma_{su} H \cos^2 \beta) \tan \phi'_d = c'_d + \gamma' \cos^2 \beta \tan \phi'_d$$

$$\gamma' = \gamma_{doymun} - \gamma_{su}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{doymun} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{doymun} \tan \beta}$$

24

24

SONLU ŞEVLERİN STABİLİTESİ (DAİRESEL KAYMA YÜZEYLERİ)

25

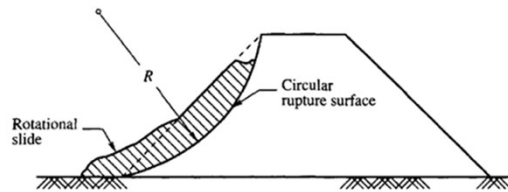
H_{cr} yüksekliği şev yüksekliğine yaklaştığında, şevler genellikle sonlu şev olarak tanımlanır. Diğer bir ifade ile H_{cr} ' den daha büyük yüksekliklerde stabil olmayan veya maksimum yüksekliği H_{cr} kadar olan şevlere sonlu şev denilmektedir. Bununla birlikte; eğim doğrultusundaki uzunluğu sınırlı olan şevler de sonlu şev olarak adlandırılabilir.

Homojen bir zemindeki sonlu bir şevin stabilitesi analiz edilirken, potansiyel göçme yüzeyinin genel şekli ile ilgili bir kabul yapma ihtiyacı duyulur. 1920' lerde meydana gelen şev göçmeleri ile ilgili olarak yapılan araştırmalar sonucunda İsveç Geoteknik komisyonu gerçek kayma yüzeylerinin dairesel silindirik yüzeyler olduğunu ortaya koymuştur. Kayma daire; şev topuğunun üzerinden, şev topuğundan ve şev topuğunun altından geçebilir. Bu tarihten itibaren, şev stabilitesi analizinde kullanılan geleneksel yöntemlerin çoğunluğu potansiyel kayma (göçme) yüzeyini bir daire yayı kabul ederek hesaplama yapmışlardır.

Homojen, izotrop, sonlu şevlerin stabilitelerinin analizinde en yaygın şekilde kullanılan yöntem de dairesel göçme yüzeyleri oluşumuna dayalı İsveç Yöntemi olmuştur.

26

19. yy' ın başlarında İsveç' te gerçekleştirilen araştırmaların sonucunda toprak şevlerin göçme yüzeylerinin şeklinin dairesel bir yaya benzediği ortaya konmuştur. Zemin, dairesel bir yüzey boyunca kaydığına bu tip bir kayma dönele kayma olarak adlandırılır. Şekilde gösterilen dönele kayma, zemin diliminin aşağı ve dışarı doğru hareketini içerir. Kayma, zemin dilimi ve onun tabanı arasındaki temas yüzeyinin tamamı boyunca meydana gelir.



Sonlu Şevlerde Dönele Kayma Davranışı

27

27

Dönele kayma hareketi ile birlikte dairesel bir göçme yüzeyi boyunca oluşan göçme; **şev göçmesi (slope failure)**, **topuk göçmesi (toe failure)** ve **taban göçmesi (base failure)** olmak üzere üç farklı tipte meydana gelebilir.

a) Şev Göçmesi

Kırılma yüzeyi, şev ile topuk noktasının üzerinde buluşur. Bu tip bir göçme, şev açısı β' nın oldukça büyük olduğu ve topuğa yakın zeminin yüksek mukavemete sahip olduğu durumlarda meydana gelir.

b) Topuk Göçmesi

Dolgu tabanının üzerindeki ve altındaki zemin kütlelerinin homojen olduğu durumda meydana gelir.

c) Taban Göçmesi

Şev açısı β' nın küçük olduğu ve dolgu tabanı altındaki zeminin dolgu tabanı üzerindeki zeminden daha yumuşak ve daha plastik olduğu durumlarda meydana gelir. Taban göçmesi durumundaki kayma daire; midpoint circle olarak da adlandırılır.

28

28

AED potansiyel kayma eğrisi, merkezi O noktasında yer alan r yarıçapına sahip bir daire yayıdır.

AED eğrisi üzerinde birim şev uzunluğuna karşılık gelen zemin ağırlığı $W = W_1 + W_2$ dir.

$W_1 = (\text{FCDE Alanı}) \times (\gamma)$ ve $W_2 = (\text{ABFE Alanı}) \times (\gamma)$ dir.

Şevin göçmesi, AED yayı üzerinde yer alan zemin kütlelerinin kayması ile meydana gelir. Şevin stabilitesini bozmaya çalışan kaydırıcı kuvvetin O noktasına göre momenti $M_d = W_1 l_1 - W_2 l_2$ dir. l_1 ve l_2 , moment kollarıdır. Kaymaya karşı koyan kuvvet ise potansiyel kayma yüzeyi boyunca etkiyen kohezyon aracılığı ile elde edilir. Bu durumda kaymaya karşı koyan kuvvetin O noktasına göre momenti $M_r = c_d L_a(1)r$ olacaktır. L_a , AED yayının uzunluğudur. Potansiyel kayma yüzeyi üzerindeki zemin kütlelerinin dengesinden yola çıkılarak $M_d = M_r$ yazılırsa;

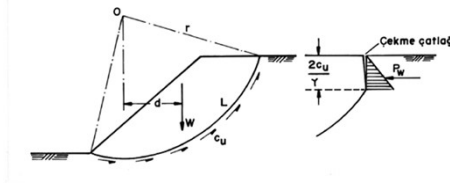
$$W_1 l_1 - W_2 l_2 = c_d L_a(1)r$$

$$c_d = (W_1 l_1 - W_2 l_2) / L_a r \quad \text{olur.}$$

Kayma yüzeyi üzerinde etkiyen diğer bir ifade ile mobilize olan kayma gerilmesi, $\tau_d = c_u / FS = c_d$ olup söz konusu potansiyel kayma yüzeyine ait güvenlik katsayısı $FS = c_u / c_d$ eşitliği ile elde edilir.

33

Potansiyel kayma eğrisi AED' nin rastgele olarak seçildiğini unutmamak gerekir. Kritik kayma yüzeyi c_u / c_d oranının diğer bir ifade ile güvenlik katsayısı FS ' nin minimum olduğu ya da c_d ' nin maksimum olduğu yüzeydir. Kritik kayma yüzeyini bulabilmek için farklı potansiyel kayma daireleri ile çok sayıda deneme analizi yapılmalıdır. Bu analizlerden elde edilen minimum değerdeki güvenlik katsayısı şevin kaymaya karşı güvenlik katsayısı olup minimum güvenlik katsayısını veren kayma yüzeyi de kritik kayma dairesidir.



34

Zeminin üniform olduğu ve göçme yüzeyinin dairesel olduğunun kabul edildiği şevlerin stabilitesi Taylor (1948), Spencer (1967), Janbu (1968) ve Morgenstern (1963) gibi çeşitli mühendisler tarafından geliştirilmiş grafik yöntemlerle analitik olarak çözümlenmiştir.

Taylor (1948) Abakları (Kütle Yaklaşımı)

Taylor (1948), iki durum için grafik yöntem önermiştir. Bunlar;

- ✓ $\phi' = 0$, drenajsız kayma mukavemeti, c_u ve toplam gerilme analizi
- ✓ $\phi' > 0$, $c' > 0$, suyun olmadığı durum

$\phi' = 0$, Drenajsız Kayma Mukavemeti, c_u ve Toplam Gerilme Analizi

Kritik kayma dairesi için kayma yüzeyi boyunca gelişen ya da mobilize haldeki kohezyon değeri aşağıdaki ilişki ile elde edilmektedir.

$$c_d = \gamma H N$$

N, boyutsuz stabilite sayısıdır.

Kritik şev yüksekliği, H_{cr} , $FS = 1$ için $c_d = c_u$ yazılarak, $H_{cr} = c_u / \gamma N$ şeklinde elde edilir.

γ , zeminin toplam birim hacim ağırlığıdır.

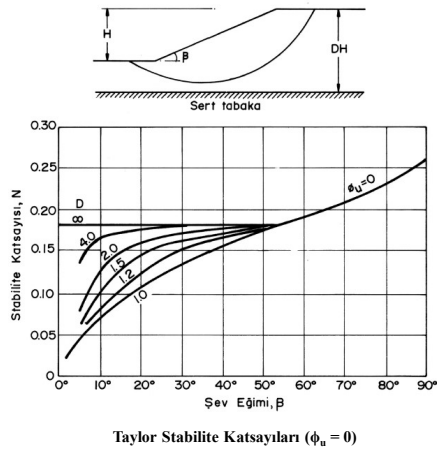
35

$\phi' = 0$ kavramı, doğru bir kavram değildir. Bununla birlikte; matematiksel olarak uygun bir yaklaşım olup basit manada drenajsız kayma mukavemetinin toplam normal gerilmeden bağımsız olduğunun kabul edildiğini ifade etmektedir. Gerçekte; iki malzeme arasında sürtünme daima mevcut olduğundan ϕ' daima sıfırdan farklıdır. Bununla birlikte; toplam gerilme değiştiğinden ve efektif gerilme değişmediğinden sürtünme açısı sıfır gibi görünmektedir.

Hesaplara girecek kayma mukavemetinin, kayma yüzeyi boyunca doğacak ortalama kayma mukavemeti olduğu hatırlanmalıdır.

36

36



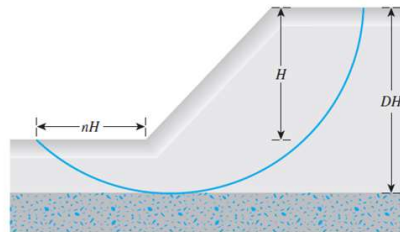
37

37

For $\beta > 53^\circ$:
All circles are toe circles.

For $\beta < 53^\circ$:

Toe circle —
Midpoint circle - - -
Slope circle - - -



39

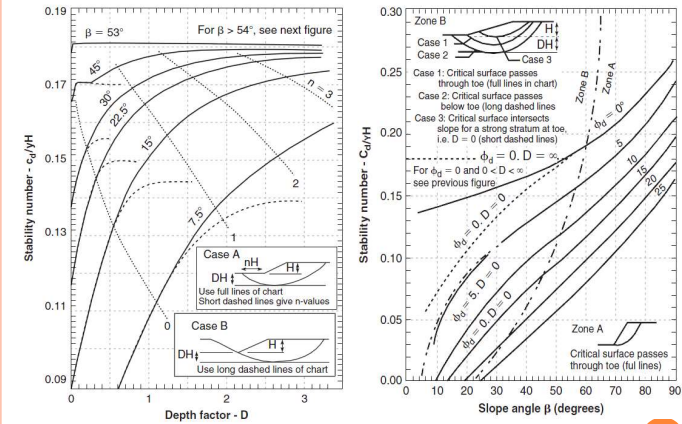
39

Çeşitli şev açıları (β) için stabilite sayısı (N) değerleri şekilde verilmiştir. Şekil, doygun kil zemindeki şevler için geçerli olup sadece drenajsız koşullar ($\phi=0$) için uygulanabilir. Şekil ile ilgili olarak aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

- ✓ D, derinlik faktörü olup şev tepesinden sağlam tabakaya olan düşey mesafenin, DH, şev yüksekliği olan H' a oranı ile elde edilir.
- ✓ $\beta > 53^\circ$ olan bir şev için kritik kayma dairesi daima bir topuk dairesidir (toe circle). Bu nedenle de stabilite sayısı sağlam tabaka ve derinlik faktöründen bağımsız hale gelir.
- ✓ $\beta < 53^\circ$ olduğu durumlarda; şev altında bulunan sağlam tabakanın yerine bağlı olarak, kritik kayma dairesi topuk dairesi (toe circle) ya da şev dairesi (slope circle) olabilir. Ya da sağlam tabakaya teğet olan bir kayma dairesi (midpoint circle) şeklinde oluşabilir.
- ✓ Stabilite sayısının bir göçme durumu için muhtemel maksimum değeri 0.181 dir.
- ✓ Abaktaki eğrilerde çekme çatlaklarının olmadığı kabul edilmiştir. Emniyetsiz yönde yapılmış bir kabuldür.

38

38



40

40

Homojen $c'-\phi'$ Zeminlerdeki Şevler (Kütle Yaklaşımı)

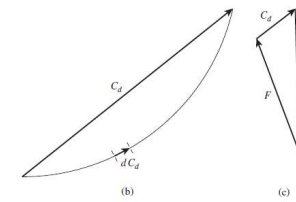
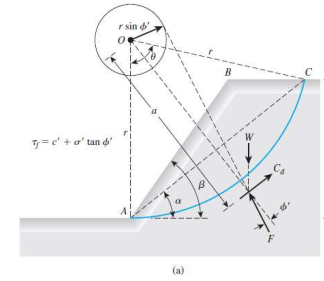
Homojen bir $c'-\phi'$ zeminindeki bir şev şekilde gösterilmiştir. Zeminin kayma mukavemeti $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ olup boşluk suyu basınçları sıfır kabul edilmektedir.

AC yayı şev topuğundan geçen ve merkezi O noktasında olan deneme amaçlı potansiyel kayma dairelerinden birisidir. Şev kesitine dik doğrultuda birim uzunluk göz önüne alınarak ABC zemin kamasının ağırlığı, $W = \text{Alan (ABC)} \times \gamma$ şeklinde hesaplanır. Denge için zemin kaması üzerinde etkiyen diğer kuvvetler (C_d , bileşke kohezyon kuvveti ve F, kayma yüzeyi boyunca etkiyen normal ve sürtünme kuvvetleri bileşkesi) de göz önüne alınır.

Kohezyon kuvveti, C_d ; AC yayı ile kayma düzlemi üzerinde birim alan başına gelişen kohezyon miktarının çarpımına eşit olup AC yayına paralel ve kayma dairesinin merkezi O' dan a kadar mesafede etmektedir.

41

41



Homojen $c'-\phi'$ Zeminlerdeki Şevlerin Stabilité Analizi

42

42

Kayma yüzeyi boyunca etkiyen normal ve sürtünme kuvvetlerinin bileşkesi F kuvveti olarak gösterilmiştir. Denge durumunun sağlanması için, F kuvveti, C_d ve W kuvvetlerinin oluşturduğu kuvvetler poligonunun kapatacak şekilde etkiyecektir.

Eğer, kayma düzlemi üzerinde sürtünme direncinin tam olarak mobilize olduğunu kabul edersek (bu durumda $\phi_d' = \phi'$ ya da $F_{\phi'} = 1.0$ olur) F kuvveti, AC yayının normali ile ϕ' açısı yapacak ve böylelikle merkezi O noktasında bulunan $r \sin \phi'$ yarı çapına sahip bir daireye teğet olacaktır. Bu daire, *Friction Circle* olarak adlandırılır.

W, C_d ve F kuvvetlerinin doğrultuları ve W kuvvetinin büyüklüğü bilindiğinden şekilde gösterildiği gibi bir kuvvetler poligonu çizilebilir. Bu kuvvetler poligonu yardımı ile de C_d kuvveti tanımlanabilir. C_d kuvvetinin elde edilmesi birlikte göçme anında göçme düzlemi üzerinde aktif haldeki kohezyon miktarı da $c_d' = \frac{C_d}{AC}$ eşitliği yardımı ile tanımlanabilir.

43

43

Elde edilen c_d' değeri seçilmiş deneme amaçlı göçme yüzeyi için olup göçme anında kohezyonun maksimum oranda geliştiği en kritik kayma yüzeyini elde etmek için farklı göçme yüzeyleri üzerinde onlarca analiz yapılmalıdır. Böylelikle; kritik göçme yüzeyi boyunca aktif hale gelen maksimum kohezyon miktarını ifade etmek için aşağıdaki fonksiyon kullanılabilir.

$$c_d' = \gamma H [f(\alpha, \beta, \theta, \phi')]$$

Kritik denge durumu için (yani; $F_s = 1.0$) $F_c = F_{\phi'} = F_s = 1.0$, yukardaki eşitlikte $H = H_{cr}$ ve $c_d' = c'$ değişiklikleri yapılabilir. Bu durumda eşitlik aşağıdaki hali alır.

$$c' = \gamma H_{cr} [f(\alpha, \beta, \theta, \phi')]$$

ya da

$$\frac{c'}{\gamma H_{cr}} = f(\alpha, \beta, \theta, \phi') = N$$

44

44

N, stabilite sayısıdır. Çeşitli ϕ' ve β değerleri için N stabilite sayısı değerleri abak olarak Taylor (1937) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir. Bu abak, **homojen c'- ϕ' zeminlerdeki** şevlerin güvenlik katsayısını tanımlamak için kullanılmaktadır.

$$\phi' > 0, c' > 0, \text{ Suyun Olmadığı Durum ve Etketif Gerilme Analizi}$$

Friction Circle yöntemi olarak adlandırılan bu yaklaşımla stabilite analizi yapıp güvenlik katsayısı elde edilirken aşağıdaki adımlar takip edilir.

- ✓ c', ϕ', γ, β ve H parametrelerini tanımlanır.
- ✓ $\phi_d' \leq \phi'$ olacak şekilde birkaç farklı ϕ_d' değeri ($\phi_{d(1)}, \phi_{d(2)}, \dots$) seçilir.
- ✓ Kabul edilen her bir ϕ_d' değeri için F_ϕ katsayısı tanımlanır.
($F_{\phi(1)} = \tan \phi' / \tan \phi_{d(1)}, F_{\phi(2)} = \tan \phi' / \tan \phi_{d(2)}$)
- ✓ Kabul edilen her bir ϕ_d' değeri ve β açısı için şekilden N stabilite sayıları ($N_1, N_2, \dots$) elde edilir.
- ✓ Her bir stabilite sayısı için göçme yüzeyi üzerinde aktif hale gelen kohezyon miktarını tanımlanır.
 $c_{d(1)} = N_1 \gamma H \quad c_{d(2)} = N_2 \gamma H$
- ✓ Her bir $c_{d(1)}$ değeri için F_c güvenlik katsayısı hesaplanır.
 $F_{c(1)} = c' / c_{d(1)} \quad F_{c(2)} = c' / c_{d(2)}$
- ✓ F_ϕ değerlerine karşılık F_c değerlerinin grafiği çizilerek $F_s = F_\phi = F_c$ noktası elde edilir.

45

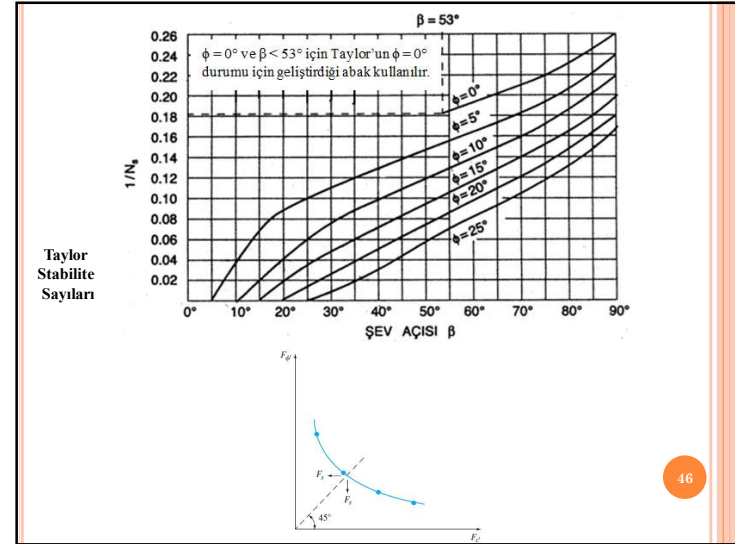
45

Hesaplamalar; $\phi > 3^\circ$ için, kritik kayma dairelerinin tamamının topuk daireleri (toe circles) olduğunu göstermiştir. $\phi > 0$ olması halinde, stabilite sayısı yaklaşımı, yalnız, topuktan geçen kayma daireleri için doğrudur.

Homojen, izotrop sonlu şevlerin analizinde şev göçmelerinin, genellikle, eğri göçme yüzeyleri üzerinde meydana geldiğine dair önemli kanıtlar olmasına rağmen Culmann (1875), potansiyel göçme yüzeyinin bir düzleme benzediğini kabul etmiştir. Culmann'ın önerdiği yaklaşımla hesaplanan güvenlik katsayıları, sadece, düşey ya da düşeye yakın şevler için oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

47

47



46

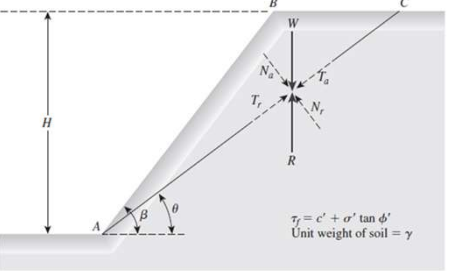
Sonlu Şevlerin Düzlem Göçme Yüzeyleri ile Analizi (Culmann Yöntemi) - (Kütle Yaklaşımı)

Sonlu şev göçmelerinin, genellikle, eğri göçme yüzeyleri üzerinde oluştuğuna dair önemli kanıtlar ve bulgular olmasına karşılık Culmann (1875); sonlu şevlerin stabilitesini potansiyel göçme yüzeyinin bir düzlem olduğunu kabul ederek değerlendirmiştir. Culmann (1875) yaklaşımı kullanılarak hesaplanan güvenlik katsayıları, sadece, dik ya da dike yakın şevler için iyi sonuçlar vermektedir. Diğer durumlarda; elde edilen güvenlik katsayısı değerlerinin temkinli değerlendirilmesi gerekir.

Culmann; şevin, şev topuğundan geçen bir düzlem boyunca göçtüğünü kabul ederek yaklaşımını önermiştir.

48

48



Sonlu Şev Analizi – Culmann Yöntemi

Şekilde H yüksekliğinde bir şev görülmektedir. Şev, yatayla β açısı yapmakta olup AC bir deneme göçme düzlemidir. Eğer, şevin şev kesitine dik doğrultuda birim uzunluğa sahip olduğunu varsayarsak ABC zemin kamasının ağırlığını aşağıdaki eşitlikle ifade edebiliriz.

$$W = \frac{1}{2} H(\overline{BC}) 1\gamma = \frac{1}{2} H(H \cot \theta - H \cot \beta) \gamma = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \quad (49)$$

49

Zemin kaması ağırlığı W ' nun AC düzlemine dik ve teğet bileşenleri sırası ile N_a ve T_a olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$N_a = W \cos \theta = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta$$

$$T_a = W \sin \theta = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \sin \theta$$

AC düzlemi üzerindeki ortalama efektif normal gerilme ve efektif kayma gerilmesi de sırası ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma' = \frac{N_a}{(AC)(1)} = \frac{N_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta}\right)} = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \sin \theta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{T_a}{(AC)(1)} = \frac{T_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta}\right)} = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \sin^2 \theta \quad (2)$$

AC düzlemi boyunca kaymaya karşı koyan ortalama kayma gerilmesi değeri aşağıdaki gibidir.

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d = c'_d + \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \sin \theta \tan \phi'_d \quad (3)$$

2 ve 3 numaralı denklemlerin eşitliğinden aşağıdaki ifade elde edilir.

$$c'_d = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)(\sin \theta - \cos \theta \tan \phi'_d)}{\sin \beta} \right] \quad (4)$$

(4) numaralı eşitlik AC potansiyel deneme göçme düzlemi için elde edilmiştir.

50

Kritik göçme düzlemi yatayla θ_c açısı yapan düzlem olup $\theta_{cr} = (\beta + \phi'_d) / 2$ ile tanımlanır. 4 numaralı eşitlikte, θ yerine θ_{cr} konacak olursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$c'_d = \frac{\gamma H}{4} \left[\frac{1 - \cos(\beta - \phi'_d)}{\sin \beta \cos \phi'_d} \right] \quad (5)$$

5 numaralı eşitlikte; $c'_d = c'$ ve $\phi'_d = \phi'$ yazılarak kritik denge durumunun meydana geldiği maksimum şev yüksekliği elde edilebilir.

$$H_{cr} = \frac{4c'}{\gamma} \left[\frac{\sin \beta \cos \phi'}{1 - \cos(\beta - \phi')} \right] \quad (6)$$

51

Dilim (İsveç) Yöntemi ile Şev Stabilesi Analizi

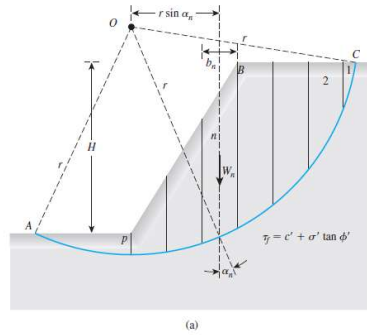
Üniform olmayan tabakalı zeminlere sahip bir şevin duraylılığını şu ana kadar anlatılan yöntemler ile belirlemek doğru olmaz. Bu durumlar için dilim yöntemleri geliştirilmiştir. Dilim yöntemi, grafik yöntemlerde mevcut olan sınırlamaları ortadan kaldırmakta, tabakalı zeminlerde, karmaşık yüklem ve drenaj koşullarına sahip şevlerin stabilize analizlerinde ve herhangi bir su basıncı dağılımının etkisindeki şevlere uygulanabilmektedir. Dilim yöntemi, farklı geometriye sahip göçme yüzeyleri için de kullanılabilir olmasına karşın göçme yüzeyinin dairesel kabul edildiği yöntemler geliştirilmiştir.

Yöntem, İsveçli mühendis Fellenius (1927) tarafından önerilmiştir.

Dilim yöntemi ile şev stabilitesi analizi yapılırken zemin kütleli bir seri düşey dilimlere ayrılır. Her bir dilim için serbest cisim diyagramı çizilir ve kuvvetler gösterilir. Her bir dilimde bilinmeyen kuvvetler, eşitlikler kullanılarak tanımlanır. Elemana etkien kuvvetlerin elde edilmesinden sonra dilimler birleştirilir. Amaç; şeve ait güvenlik katsayısının elde edilerek şevin stabilitesinin değerlendirilmesidir.

52

Dilim yöntemi ile şev stabilitesi analizi aşağıdaki şekil kullanılarak açıklanabilir. O merkezli ve r yarıçaplı birim kalınlıkta ve AC daire yayı ile sınırlı bir zemin kütesinin dengesini düşünelim. AC, deneme amaçlı bir göçme yüzeyini temsil eden bir daire yayıdır. Şev yüzeyine herhangi bir kuvvetin etkimediğini varsayalım. Bu durumda; AC potansiyel göçme yüzeyi üzerindeki zemin ağırlığı ile AC potansiyel kayma yüzeyine etkiyen kuvvetler arasında bir denge olmalıdır. AC yayı ile sınırlı zemin kütesini bir seri düşey dilimlere ayıralım. Bu düşey dilimlerin genişlikleri birbirinden farklı olabilir. Dilim yöntemi ile güvenilir doğrulukta bir çözüm elde edebilmek için minimum 10 dilimin bulunduğu bir çözüm uygulanmalıdır. Bir dilime etkiyen kuvvetler şekil b' de gösterilmiştir.



53

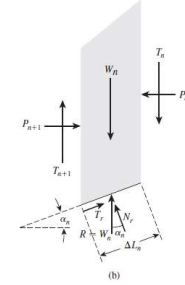
53

Hesap kolaylığı açısından boşluk suyu basınçları sıfır kabul edilmektedir. Bununla birlikte; P_n ve P_{n+1} ve T_n ve T_{n+1} kuvvetlerinin tanımlanması da zordur. Bu nedenle; P_n ve P_{n+1} kuvvetleri ile T_n ve T_{n+1} kuvvetlerinin büyüklüklerinin eşit olduğu, aynı doğrultuda fakat zıt yönde etkidikleri kabul edilerek (dilimin dengede olduğu kabulünden hareketle) bu kuvvetler hesaplarda ihmal edilmektedir. Dilimlerin tabanı, gerçekte, kavisli olmakla birlikte düzlem kabul edilir. Şekilde gösterilen kuvvetler dışında dilimler üzerinde etkiyen ilave yükler ya da kuvvetler mevcutsa onlar da analizlerde dikkate alınmalıdır.

Mevcut koşullarda dilim sayısı n olan bir sistem hiperstatik olup dilimler arasındaki etkileşim kuvvetleri ile ilgili olarak bazı kabuller yapılmaksızın bir çözüm elde edilebilmesi mümkün değildir. Bu durumda ulaşılan sonuçlar (güvenlik katsayıları) ise ancak yaklaşık çözümler olacaktır. Bununla birlikte; kayma kütesinin düşey düzlemler ile bölünerek dilimlere ayrılması sonucunda elde edilen hiperstatik sistemde dilimlerin yan yüzlerinde etkiyen kuvvetlere ilişkin varsayımlara bağlı olarak geliştirilmiş çeşitli analiz yöntemleri (Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern and Price) mevcuttur.

55

55



- W_n ; n. dilimin ağırlığı ($W = \gamma b h$ olup dilimin doğgun olan kısmı için $\gamma_{doğgun}$ kullanılmalıdır),
- N_r ; dilim tabanına etkiyen toplam normal kuvvet (R reaksiyon kuvvetinin dik bileşeni)
- T_r ; dilim tabanına etkiyen toplam kayma kuvveti (R reaksiyon kuvvetinin teğet bileşeni)
- P_n ve P_{n+1} ; dilim kenar yüzeylerine etkiyen normal kuvvetler,
- T_n ve T_{n+1} ; dilim kenar yüzeylerine etkiyen kesme kuvvetleri,
- ΔL_n ; dilime denk gelen yay uzunluğu, ΔL_n yaklaşık olarak $b_n / \cos \alpha_n$ değerine eşittir.
- b_n ; dilimin genişliği,
- α_n ; dilime denk gelen yayın yatayla yaptığı açısı,
- $r \sin \alpha_n$; dilimin O noktasına olan yatay uzaklığı,

54

54

Dilimin denge durumu göz önüne alınarak;

$$N_r = W_n \cos \alpha_n \quad \text{olup}$$

Karşı koyan kayma kuvveti, T_p ve Normal gerilme, σ' sırası ile aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanabilir.

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c' + \sigma' \tan \phi'] \Delta L_n$$

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n}$$

Zemin kütesi içerisinde yer altı su seviyesi bulunması durumunda dilim tabanındaki efektif normal gerilme aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\sigma' = \sigma - u = (N_r / \Delta L_n) - u$$

AC potansiyel kayma yüzeyi üzerinde yer alan ABC zemin kamasının dengede olması şartından yola çıkarak, hareket ettiren kuvvetlerin O noktasına göre momentleri toplamı karşı koyan kuvvetlerin O noktasına göre momentleri toplamına eşit olmalıdır. Diğer bir ifade ile O merkezine göre alınan momentler toplamı sıfıra eşit olmalıdır.

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{F_s} \left(c' + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi' \right) (\Delta L_n) (r) \quad \text{ya da}$$

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

56

56

Q = force applied at the top of the slice U_g = water force applied at top of slice W = total weight of slice $k_h W$ = horizontal static force due to earthquake $k_v W$ = vertical static force due to earthquake Z_L = earth pressure force on left side of slice Z_R = earth pressure force on right side of slice S_m = mobilized shear force at bottom of slice N' = normal force on base of slice transmitted through the grains U_g = water force applied at bottom of slice	δ = angle of force Q with the vertical θ = angle of bottom of slice with horizontal β = angle of top of slice with horizontal λ_L = angle of force Z_L with horizontal λ_R = angle of force Z_R with horizontal h_L = height of point of application of Z_L above bottom of left side of slice h_R = height of point of application of Z_R above bottom of right side of slice h_c = height of center of gravity of slice above the middle of the bottom of slice h = height of slice from center of bottom to center of top b = width of slice
---	--

61

61

Bishop (1955) önerdiği yaklaşımlar ile dilim yöntemini modifiye ederek Basitleştirilmiş Bishop Yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde; her bir dilimin kenar yüzeylerinde etkiyen kuvvetlerin şevin stabilitesine etkisi bir dereceye kadar hesaba katılmaktadır. Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi, belki de, en yaygın kullanılan stabilite analiz yöntemidir. Bilgisayar programları ile birlikte kullanılan yaklaşım birçok durumda güvenilir sonuçlar vermiştir. Bu yöntemle elde edilen güvenlik sayısı değerleri gerçek değerinden yaklaşık %2 daha küçüktür. Fellenius; dilimler arasında etkiyen dik ve kesme kuvvetlerinin bileşkesinin sıfır olduğunu kabul etmiştir. Elde edilen güvenlik sayısı değerleri, gerçek değerden yaklaşık %15 - %20 daha küçüktür. Basit dilim yöntemi olarak da bilinen bu yaklaşım, oldukça muhafazakar sonuçlar vermesi nedeni ile günümüzde artık nadiren kullanılmaktadır. Janbu (1957), Morgenstern ve Price (1965) ve Spencer (1967) yöntemleri	62
---	----

62

Name of Method	Reference	Assumptions	Comment
Ordinary method of slices	Fellenius 1927	Resultant of Z forces on each slice is equal to zero.	Based on writing equilibrium perpendicular to base. Does not satisfy all equilibrium equations. Overdeterminate.
Janbu simplified method	Janbu 1954	Z forces are horizontal.	Does not satisfy all equilibrium equations. Overdeterminate.
Bishop simplified method	Bishop 1955	Shear forces on the side of all slices are zero (i.e., Z forces are horizontal).	Based on writing vertical force equilibrium. Does not satisfy all equilibrium equations. Overdeterminate.
Bishop rigorous method	Bishop 1955	Shear forces on the side of all slices are assumed.	Satisfies all equilibrium equations.
Lowe and Karafiath method	Lowe and Karafiath 1960	Z_R forces inclined at an angle equal to the average between the angle of the top and bottom of the slice.	Does not satisfy all equilibrium equations.
Morgenstern-Price method	Morgenstern and Price 1965	Inclination of Z forces given by a function of the horizontal distance multiplied by a scalar.	Satisfies all equilibrium equations.
Spencer method	Spencer 1967	Z forces have a constant but unknown inclination.	Satisfies all equilibrium equations.
Corps of Engineers method	U.S. Army Corps of Engineers 1970	Z forces inclined parallel to the ground surface or parallel to the line joining the beginning and the end of the failure circle.	Does not satisfy all equilibrium equations.
Janbu generalized method	Janbu 1973	Location of point of application of the Z forces on an assumed thrust line.	Does not satisfy all equilibrium equations.
Sarma method	Sarma 1973	Inclination of Z forces given by a function of the horizontal distance multiplied by a scalar.	Makes use of horizontal seismic coefficient. Satisfies all equilibrium equations.

63



64

Bir şevin stabilite analizinin toplam veya efektif gerilmeler cinsinden yapılabilmesi mümkündür. Toplam gerilme analizinde suya doygun zeminler için içsel sürtünme açısı (ϕ_u) sıfır alınarak drenajsız kayma mukavemeti kohezyon (c_u) parametresi ile ifade edilir ve boşluk suyu basınçları hesaplamaya dahil edilmez. Efektif gerilme analizinde ise zeminin efektif kayma mukavemeti parametreleri (c' ve ϕ') kullanılır ve boşluk suyu basınçları hesaplamada bağımsız parametre olarak yer alır.

Şevin kazı veya dolgu yapılarak inşa edilmesi sırasında şev kesiti içerisinde yer alan boşluk suyu basınçlarında değişimler meydana gelecektir. Kısa dönemde ortaya çıkan bu değişimler zaman içerisinde sönümlenerek denge durumuna ulaşır ve boşluk suyu basınçlarının nihai değerleri şartlara bağlı olarak statik su tablası seviyesinden, veya sızma durumu mevcutsa, akım ağı kullanılarak belirlenir.

65

65

Tasarımda toplam veya efektif kayma mukavemeti parametrelerinin seçimi söz konusu durum için stabilite probleminin kısa veya uzun hangi dönem için daha kritik olacağını belirlenmesine bağlıdır.

DOYGUN YUMUŞAK KİL ZEMİN ÜZERİNE İNŞA EDİLEN BİR KİL DOLGU

P, daire yayı şeklindeki potansiyel APB göçme yüzeyi üzerinde bir nokta olsun. Dolgunun inşasından önce P noktasındaki boşluk suyu basıncı $u=h*\gamma_w=u_0$ kadardır. u_0 şev inşası öncesindeki mevcut boşluk suyu basıncıdır.

67

67

Zeminin permeabilitesinin düşük olduğu durumlarda boşluk suyu basınçlarının denge durumuna ulaşması için uzunca bir süre geçmesi gerekir. Bu gibi durumlarda, şev inşasının tamamlanması sonrasında şevi teşkil eden zeminin pratik olarak drenajsız durumda olduğu kabulüyle, toplam gerilme analizi yapılması uygundur. Alternatif olarak, kısa dönem için boşluk suyu basınçlarında meydana gelen değişimlerin hesaplamaya dahil edilerek efektif gerilmeler cinsinden analiz yapılması da mümkündür. Bu durumda boşluk suyu basınçları:

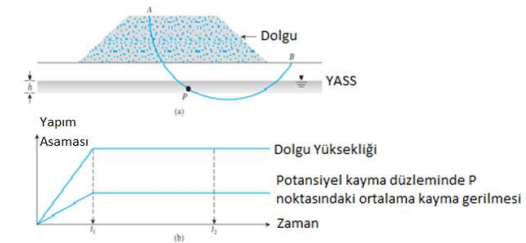
$$u = u_0 + \Delta u$$

Burada u_0 şev inşası öncesinde mevcut boşluk suyu basıncını, Δu ise şev inşaatı nedeniyle oluşan boşluk suyu basıncındaki farklılaşmayı ifade etmektedir. Ancak, efektif gerilmeler cinsinden analiz yapılması durumunda boşluk suyu basınçlarındaki değişimlerin sahada ölçülerek belirlenmesi gerektiğinden, toplam gerilme analizi daha pratiktir ve uygulamada genellikle tercih edilir. Uzun dönemde ise boşluk suyu basınçları denge durumuna ulaşacağından şev stabilitesi ancak efektif analiz yoluyla belirlenebilir.

66

66

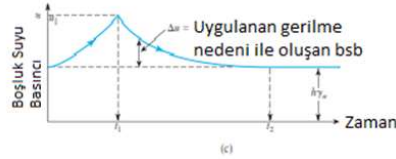
H yüksekliğinde inşa edilecek dolgunun üniform olarak etkideğini kabul edelim. $t=t_1$ zamanında dolgu yüksekliği H 'a eşittir ve ondan sonra da ($t>t_1$) sabit kalacaktır. Dolgunun inşası ile birlikte potansiyel göçme yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesi, τ , artar. τ değeri $t=t_1$ zamanına kadar doğrusal olarak artar ve sonrasında sabit kalır.



68

68

Dolgu yapımının ilerlemesi ile P noktasındaki boşluk suyu basıncı da (bsb) artmaya devam eder. $t=t_1$ zamanında $u = u_1 > h \cdot \gamma_w$ dur. $U = u_0 + \Delta u = h \cdot \gamma_w + \Delta u$ şev inşaatı nedeni ile oluşan ilave ya da aşırı bsb dır. Bunun nedeni kil tabakasının drenaj hızının düşük olmasıdır. Bununla birlikte dolgu inşaatının tamamlanmasının ardından ($t > t_1$), bsb kil zemindeki drenaja (konsolidasyona) bağlı olarak zamanla azalacaktır. $t=t_2$ zamanında $u=h \cdot \gamma_w$ dur. Yani $\Delta u=0$ olmuştur.

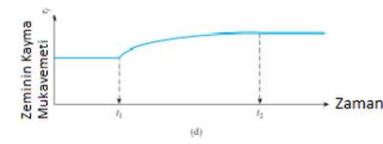


69

69

Dolgu yapımının hızlı bir şekilde gerçekleştiğini kabul edersek bu durumda dolgunun yapımı süresince kil tabakasında drenaj olmayacaktır. Kilin ortalama kayma mukavemeti $t=0$ ile $t=t_1$ aralığında (dolgu bitene kadar) sabit kalacak ve $\tau_f = c_u$ olacaktır. $t > t_1$ için konsolidasyon süreci başladığından (sabit dolgu yükü altında) kilin kayma mukavemeti, τ_f de'de artmaya başlayacaktır. Konsolidasyonun tamamlanmasından sonra, $t \geq t_2$, kilin ortalama kayma mukavemeti $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ (drenajlı kayma mukavemeti) olacaktır. Potansiyel kayma yüzeyi boyunca dolgunun güvenlik katsayısı

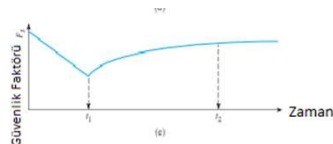
$$FS = \frac{\text{Kayma yüzeyi boyunca kilin ortalama kayma mukavemeti, } \tau_f}{\text{Kayma yüzeyi boyunca kilin ortalama kayma gerilmesi, } \tau} \text{ dir.}$$



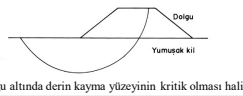
70

70

Güvenlik katsayısı FS'in değeri başlangıçta zamanla azalır. Dolgunun yapımının tamamlanması ile $t=t_1$, güvenlik katsayısının değeri minimumdur. Bu noktanın ötesinde, $t=t_2$ zamanına kadar meydana gelecek denaj (konsolidasyon) ile FS değeri artmaya devam eder. (τ_f sabit ve τ_d artıyor; t_1 sonuna kadar).



Dolgu yapılarak inşa edilen şevlerde yük artışına bağlı olarak kısa dönemde toplam gerilmeler ve bsb ları artacak, daha sonra bsb larının zaman içerisinde denge durumuna doğru sönümlenmesi ile efektif gerilmeler artacaktır. Dolayısı ile dolgu yolu ile inşa edilen şevlerin kısa dönem stabilitesi daha kritiktir. Bu tür şevlerde dolgunun üzerine oturduğu zeminin kayma mukavemeti şev stabilitesi üzerinde belirleyici bir rol oynayabilir.



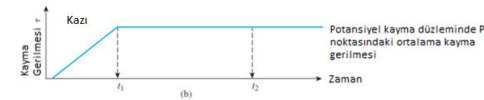
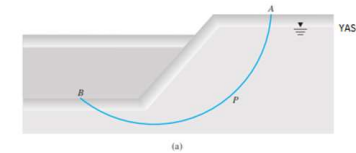
71

71

DOYGUN KİLLERDE KAZI DURUMU

Doygun yumuşak bir kil zemin de kazı yolu ile inşa edilen bir şev görülmektedir. APB dairesel bir potansiyel göçme yüzeyidir.

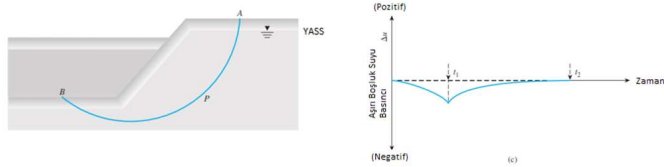
Kazının ilerlemesi sırasında P noktasından geçen potansiyel göçme yüzeyinde ortalama kayma gerilmesi τ artacaktır. Yük azalmasına bağlı olarak kayma düzlemine dik yöndeki gerilmeler azalacaktır. $t=t_1$ zamanında kazının tamamlanması ile ortalama kayma gerilmesi maksimum değerine ulaşacaktır.



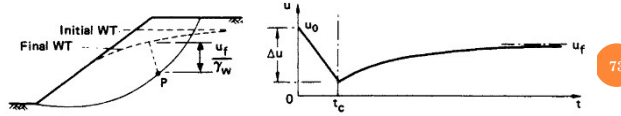
72

72

Zeminin kazılması nedeni ile P noktasındaki efektif örtü basıncı azalacaktır. (yük kalktığı için negatif $-\Delta u$ oluşur. Y.a.s.s. sabit ve yük kalktığı için σ azalıyor. Ancak u ' nun değişmediği varsayılıyor.) Kazının tamamlanmasının ardından ($t > t_2$) net negatif ilave bsb yavaş yavaş sönümlenecektir. $t \geq t_2$ zamanında $\Delta u = 0$ olacaktır.

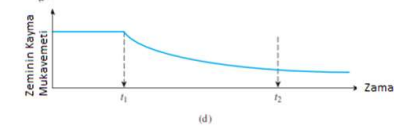


Bir şev kazı yolu ile oluşturulduğunda, toplam gerilmelerde meydana gelen azalma potansiyel kayma yüzeyi boyunca boşluk suyu basınçlarında da değişime neden olacaktır. Şekilden de görüldüğü gibi kazı sonrası boşluk suyu şeve doğru akmakta ve su seviyesinde bir düşüş meydana gelmektedir. Sonrasında, ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ile birlikte son haldeki su basıncı kararlı sızma davranışına bağlı olarak ortaya çıkan su basıncıdır.

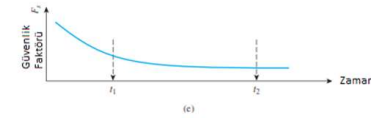


73

Kazı sonrası zeminin kayma mukavemeti yavaş yavaş azalır. Bu azalmanın nedeni negatif ilave bsb larının sönümlenmesidir.



Güvenlik katsayısının değeri zamanla azalır ve $t \geq t_2$ zamanında minimum değerine ulaşır.



Uzun dönemde bsb larının denge durumuna ulaşmak üzere artışı ile efektif gerilmeler daha da azalacak, dolayısı ile şev stabilitesi daha kritik bir safhaya girmiş olacaktır.

74

Kazı yolu ile inşa edilen şevlerde stabilite uzun dönemde daha kritiktir ve denge durumundaki (uzun dönem) bsb ları dikkate alınarak efektif gerilme analizi ile hesaplanmalıdır.

Geçici süreler için gerek duyulan ve kazı yoluyla inşa edilen şevlerde kısa dönemli şev stabilitesinin belirlenmesi için toplam gerilme analizi uygulanır. Ancak bu gibi durumlarda zaman içerisinde artış gösterecek bsb ları ile birlikte güvenlik sayısının azalacağı göz önüne alınmalıdır.

Doğal şevlerde stabilite problemi çoğunlukla uzun dönemli olarak sınıflandırılabilir. Zeminde yeraltı su seviyesinin yağışlı dönemlerde yükselmesine bağlı olarak meydana gelecek efektif gerilme azalmalarının veya şev topuğunda erozyona bağlı olarak ortaya çıkabilecek bir boşalmanın şev kesitinde neden olacağı kayma gerilmesi artışlarının şev stabilitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi genel olarak efektif gerilme analizi yoluyla yapılabilir.

Efektif gerilmeler cinsinden analiz yapılması durumunda bsb larındaki değişiminin ölçülerek belirlenmesi gerekir. $\sigma' = \sigma - u$.

Uzun dönemde bsb ları denge durumuna ulaşacağından ve $\Delta u = 0$ olacağından şev stabilitesi efektif analiz yoluyla belirlenebilir.

Bsb ları statik su tablasının pozisyonu veya sızma durumunda akım ağı yardımı ile belirlenebilir.

75

Kaynaklar

- Jean-Louis Briaud, Geotechnical Engineering – Unsaturated and Saturated Soils, John Wiley & Sons, 2013.
- R. F. Craig, Craig's Soil Mechanics, Spon Press, 2004.
- B. M. Das and K. Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, Cengage Learning, 2014.
- V.N.S. Murty, Geotechnical Engineering ; Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Marcel Dekker Inc.
- Geoteknik Kursu Kitabı – İller Bankası Yayını.
- TS 8853, Yamaç ve şevlerin dengesi ve hesap metodları – Zeminde, 1991.
- V. Kumbasar ve F. Kip, Zemin Mekaniği problemleri, Çağlayan Kitabevi, 1999.

76