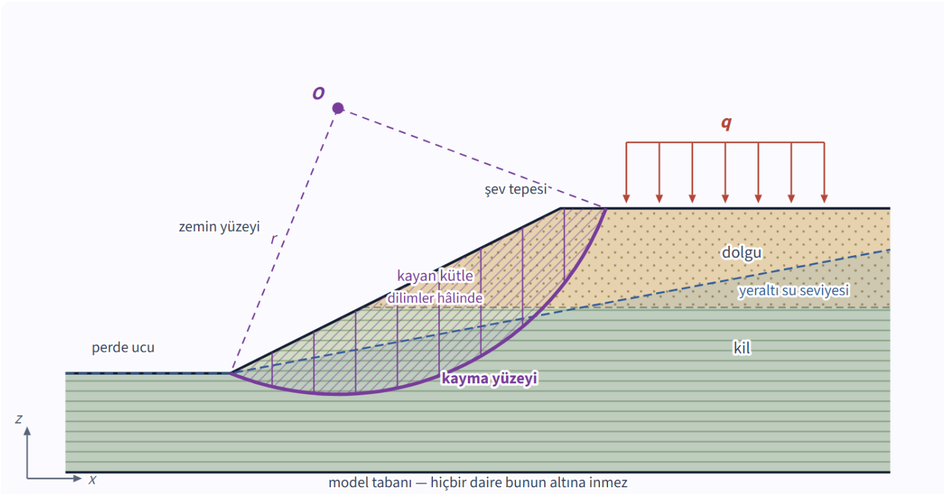
Geoteknik ders sunumu · Şev stabilitesi

Şev stabilitesi: limit denge (dilimler)

Ders anlatımı: limit denge dilim yöntemi; bir kayma dairesi ve bir dilimin ayrıntılı elle çözümü, kalan dilimler ve konular tablolarla.

Dilim yöntemi | Sıradan · Bishop · Spencer | Kritik daire | Su · yük · deprem · çatlak | Donatı · Hoek–Brown



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

Limit denge fikrini: kayma yüzeyi üzerindeki kütle, dayanımın aynı oranda kullanıldığı bir rijit cisimdir; **FS = dayanım / gereken gerilme**

Kütlenin **dilimlere** bölünmesini: her dilimin ağırlığı W, taban eğimi α, taban uzunluğu L, su kuvveti U

Üç yöntemi (sıradan/Fellenius, basit Bishop, Spencer) tek bir kayma dairesinde ve **tek bir dilimde** ayrıntılı çözmeyi

Aynı hesabın **kalan 32 dilimde** nasıl tekrarlandığını ve sonuçların tablolarını; kritik dairenin aranmasını

Su, yük, deprem, çekme çatlağı, donatı (çivi, ankraj, geogrid) ve kaya (Hoek–Brown) etkilerini

DERS AKIŞI

Önce **kuram**, sonra tek daire ve tek dilimle **elle çözüm**:

1 · **Kuram**: FS, dilim, üç yöntem

2 · **Soru**: tek daire, tek dilim

3 · **Çözüm**: dilim 22 elle; kalanlar **tablo**

Model: 10 m yüksekliğinde 2:1 şev; üstte dolgu (γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), altta kil (γ = 17,5, c′ = 20, φ′ = 18°); su, yük ve deprem yok. Kuvvetler kesitin metresi başınadır (kN/m).

Drenajlı, drenajsız, derinlikle artan

KURAM

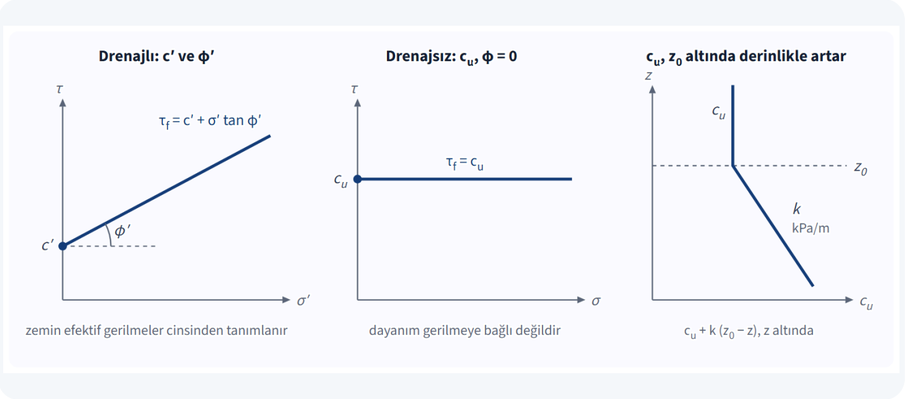
Drenajlı zeminin kayma dayanımı, efektif gerilme σ′ = σ − u cinsinden Mohr–Coulomb zarfıyla verilir ve c′ ile φ′ parametreleriyle tanımlanır.

Drenajın gerçekleşebileceğinden hızlı yüklenen doygun kilde dayanım, normal gerilmeden bağımsız **drenajsız dayanım** c_u olup φ = 0 alınır; birçok doğal kilde c_u derinlikle doğrusal olarak artar.

Bir dilimin dayanımı taban ortası seviyesinde okunur; kayanın kendine özgü ölçütü ayrıdır ve drenajlı ya da drenajsız seçimi mühendise ait olup analizin ilk kabulünü oluşturur.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad \text{(drenajlı)}$$

$$\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0) \qquad \text{(drenajsız)}$$



zemin efektif gerilmeler cinsinden tanımlanır — dayanım gerilmeye bağlı değildir — $c_u + k\,(z_0 - z)$, z altında

Dayanım / gereken gerilme; daire merkezine göre moment

KURAM

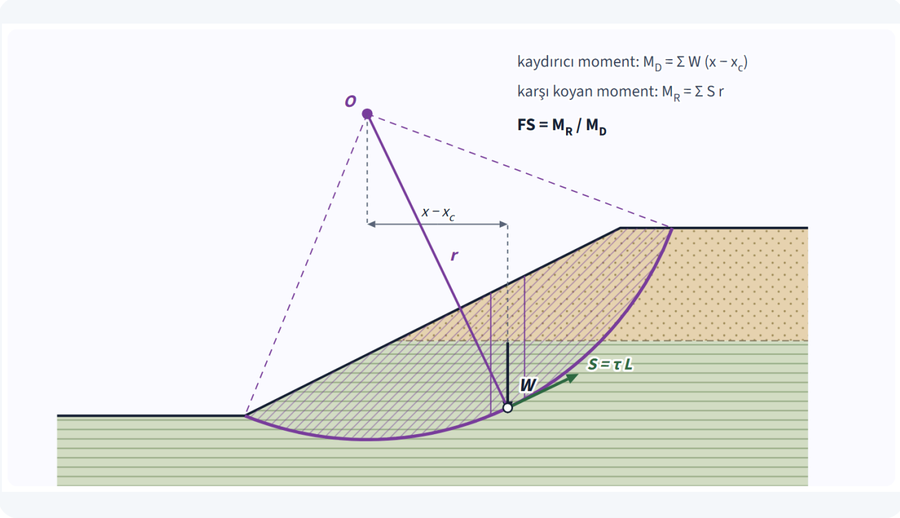
Güvenlik sayısı (FS), zeminin sahip olduğu kayma dayanımının denge için gerekli kayma gerilmesine oranıdır ve kayma yüzeyi boyunca her noktada aynı değerde kabul edilmektedir.

Dairesel yüzeyde belirleyici denge, O merkezi etrafındaki moment dengesidir; momentler yarıçapa bölünerek oran FS = ΣR / ΣD biçiminde yazılmakta ve her iki toplam da kN/m cinsindedir.

Üç yöntem, her tabana etkiyen efektif normal kuvvetin (N′) bulunuşunda ayrışır: basit dilimler yalnızca ağırlıktan, Bishop düşey dengeden, Spencer ise hem kuvvet hem moment dengesinden elde eder.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \tau = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



Geometri, ağırlık, taban kuvvetleri

KURAM

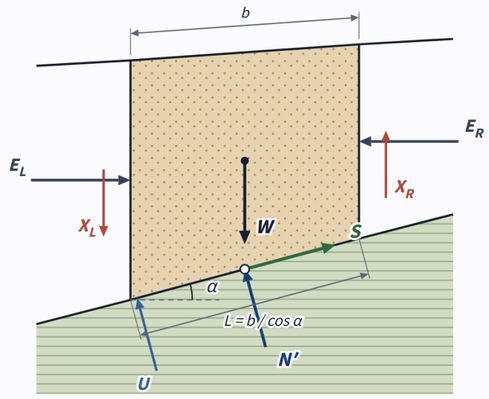
Kayma yüzeyi ile zemin yüzeyi arasındaki kütle, dilim sayısına ya da en büyük dilim genişliğine göre düşey çizgilerle dilimlere ayrılmaktadır.

Kütle içindeki her önemli kesişim noktası zorunlu bir dilim kenarıdır; böylece her taban tek bir zemin içinden geçer ve her dilim tek bir tür yük taşır.

Dilimin orta düşeyinde taban eğimi α, merkezin şev tepesi tarafında pozitif, şev topuğu tarafında ise negatif alınmaktadır.

Efektif normal kuvvet N′ = N − U; negatif N′ çekme altındaki tabanı gösterir ve basit dilimler ile Bishop yöntemlerinde N′ sıfırda tutulur.

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



W	dilimin ağırlığı
N′	efektif normal kuvvet
U = uL	tabandaki boşluk suyu kuvveti
S	kayma kuvveti (kullanılan dayanım)
E, X	dilimler arası kuvvetler

Dilimler arası kuvvet yok

KURAM

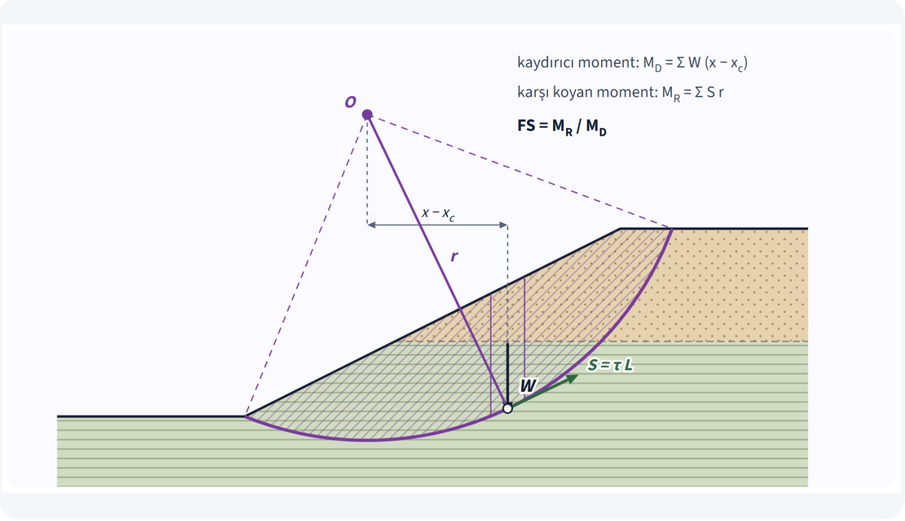
Fellenius (İsveç) yönteminde dilimler arası kuvvetler tamamen ihmal edilir ve her dilim yalnızca tabanına dik doğrultuda dengededir.

Bu denge normal kuvveti ağırlık ve yüklerden verir; güvenlik sayısı moment oranıyla elde edilir ve homojen zeminde FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α bağıntısına dönüşür.

Yöntem basit, kararlı ve güvenli taraftadır; hatası dairenin derinliği ve boşluk suyu basıncıyla artar, derin bir dairede diğer iki yöntemin oldukça altında sonuç verebilir.

$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum \left[cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi'\right]}{\sum W\sin\alpha}$$



Her dilimin düşey dengesi; yinelemeli çözüm

KURAM

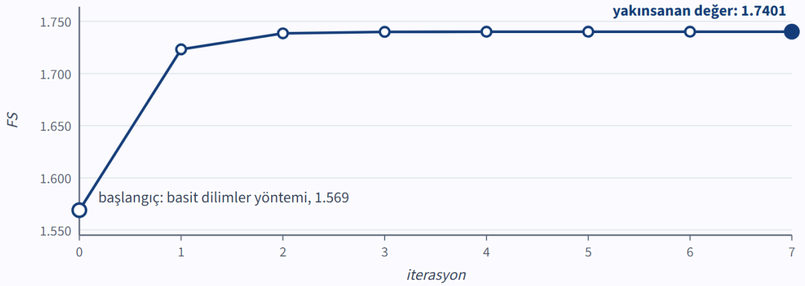
Basitleştirilmiş Bishop yönteminde dilimler arası kayma kuvvetleri ihmal edilir, ancak her dilimin düşey dengesi sağlanır ve tabandaki kayma kuvveti mobilize dayanıma eşit alınır.

FS denklemin her iki tarafında yer aldığından denklem, basit dilimler yönteminin değerinden başlanarak iterasyonla çözülür; birkaç adım yeterlidir.

Negatif **N′** sıfırda tutulur ve $\mathbf{m_\alpha}$ değerinin 0.2'nin altına düşmesine izin verilmez; bu sınırlama derin dairelerin topuk kesiminde önem taşır.

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum [cL + N'\tan\varphi']}{\sum D}$$



Kuvvet ve moment dengesi; paralel dilimler arası kuvvetler

KURAM

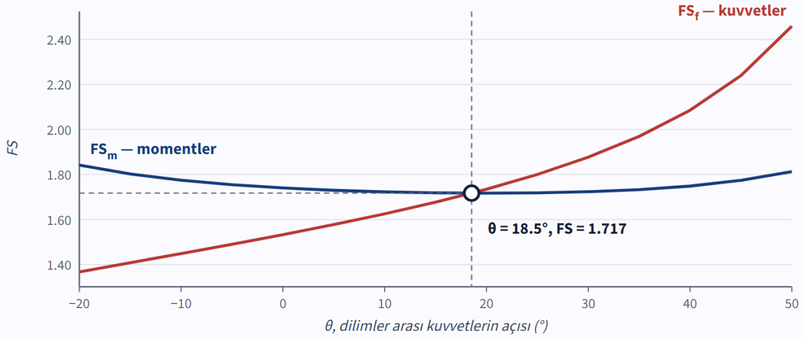
Spencer yöntemi hem kuvvet hem moment dengesini sağlar; dilimler arası kuvvetler birbirine paraleldir ve kayma kuvveti normal kuvvetin sabit oranıdır.

Kütlenin iki ucundaki yan yüzler serbest olduğundan ΣΔE = 0 kuvvet dengesini verir ve her θ açısı için bir FS_f güvenlik sayısı elde edilir.

Daire merkezi etrafındaki momentler ikinci bir değer verir: FS_m = Σ[c L + N′ tan φ] / Σ D; $FS_f(\theta)$ ve $FS_m(\theta)$ tek bir açıda kesişir ve bu çözümü oluşturur.

$$X = E \tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi' \left(W\cos\alpha - U\right) - FS\, W \sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta \sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$



Neyi sağlar, neyi ihmal eder

KURAM

Yöntem	Dilimler arası kuvvet	Kuvvet dengesi	Moment dengesi	Yüzey	FS (aynı daire)
Sıradan (Fellenius)	yok	yalnız taban normali	✓	daire	**1,569**
Basit Bishop	yalnız normal (kayma yok)	dilim başına düşey	✓	daire	**1,740**
Spencer	paralel: X = E tanθ	yatay + düşey	✓	her yüzey	**1,717**

Basit dilimler yöntemi el hesabıyla kontrol edilebilen ve ihtiyatlı olan varsayılan yöntemdir; sonucu üç yöntemin en düşüğüdür.

Bishop yöntemi dairesel yüzeyler için olağan seçimdir; sonucu dairesel bir yüzeyde Spencer yönteminin sonucundan yalnızca yüzde birkaç farklıdır.

Spencer yöntemi dengenin tamamını sağlar ve dairesel olmayan yüzeyler için kullanılır; hesap yükü en ağır olan yöntemdir ve bazı dairelerde çözümü bulunmamaktadır.

Soru

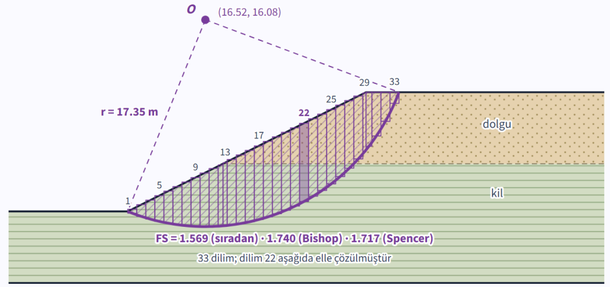
SORU

Verilenler

Kesit	**zemin yüzeyi** $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ **m; taban** $z=-6$ **m;** $z=4$ **m'nin üstü dolgu, altı kil**
Zeminler	**dolgu** $\gamma=18$ **kN/m³,** $c'=5$ **kPa,** $\varphi'=30°$**; kil** $\gamma=17{,}5$ **kN/m³,** $c'=20$ **kPa,** $\varphi'=18°$**; su, yük, deprem yok**
Kayma dairesi	**merkez** $x_c=16{,}52$ **m,** $z_c=16{,}08$ **m; yarıçap** $r=17{,}35$ **m (kritik daire, bkz. aramada bulunan)**

İSTENEN

Dairenin zemini kestiği **x_a** ve **x_b** noktaları, en alçak noktası ve **dilimleme**.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Daire ile zemin yüzeyinin kesişimi: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16{,}518 - \sqrt{301{,}08 - (0 - 16{,}080)^2} = \mathbf{10{,}00}\ \text{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16{,}518 + \sqrt{301{,}08 - (10 - 16{,}080)^2} = \mathbf{32{,}77}\ \text{m} \quad (z_b = 10)$$

2 En alçak nokta ve dilimleme

$$z_{min} = z_c - r = 16{,}080 - 17{,}352 = -1{,}27\ \text{m} \ \ (> -6\ \text{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22{,}771}{30} = 0{,}759\ \text{m} \ \Rightarrow\ 30\ \text{dilim}$$

Daire x = 10,00 (ayak) ile 32,77 m (üst) arasında kütleyi keser; x = 10, 18 ve 30 m'deki kenarlar 3 dilimi daha böler: **33 dilim**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

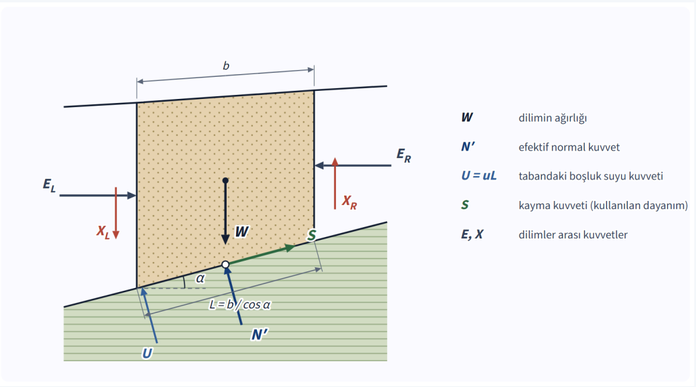
SORU

Verilenler

Dilim	**Örnek 1'deki dairenin 22. dilimi: orta noktası $x_m = 24{,}800$ m, genişliği $b = 0{,}759$ m**
Zemin	**dolgu $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); kil $\gamma = 17{,}5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$ (taban kilde); $u = 0$**

İSTENEN

Dilimin **α**, **L**, **W** değerleri; **N′**, **R** ve **D** (sıradan yöntem).



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Taban eğimi ve uzunluğu

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24{,}800 - 16{,}518}{17{,}352} = 0{,}4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28{,}51}^\circ,\; \cos\alpha = 0{,}8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0{,}759}{0{,}8787} = \mathbf{0{,}864}\ \mathrm{m}$$

2 Kolon yüksekliği ve ağırlık (dolgu + kil)

$$z_{yüzey} = \frac{x_m - 10}{2} = 7{,}3998\ \mathrm{m};\quad z_{taban} = z_c - r\cos\alpha = 0{,}8327\ \mathrm{m}$$

$$h_1 = 7{,}3998 - 4 = 3{,}3998\ \mathrm{m}\ (\text{dolgu});\quad h_2 = 4 - 0{,}8327 = 3{,}1673\ \mathrm{m}\ (\text{kil})$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0{,}7590(3{,}3998 \cdot 18 + 3{,}1673 \cdot 17{,}5) = \mathbf{88{,}52}\ \mathrm{kN/m}$$

Dilim 22, **en ağır dilimdir** (W = 88,52 kN/m); tabanı 28,5° eğimlidir ve kilde kalır (c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Normal kuvvet ve direnç (u = 0)

$$N' = W\cos\alpha = 88{,}52 \times 0{,}8787 = \mathbf{77{,}79}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0{,}864) + 77{,}79(0{,}3249) = 17{,}27 + 25{,}27 = \mathbf{42{,}55}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Kaydırıcı etki

$$D = W\sin\alpha = 88{,}52 \times 0{,}4773 = \mathbf{42{,}25}\ \mathrm{kN/m}$$

Dilim 22: **R = 42,55** kN/m, **D = 42,25** kN/m. Her dilimin R ve D değeri **aynı üç adımla** bulunur; güvenlik sayısı hepsinin toplamlarının oranıdır: **FS = ΣR/ΣD** (sonraki sayfalarda tablo).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

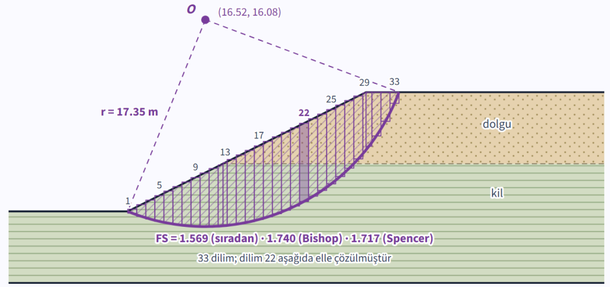
SORU

Verilenler

Dilimler	**Örnek 1'deki daire, 33 dilim; her dilim Örnek 2'deki üç adımla çözülür**
Yöntem	**Sıradan (Fellenius): dilimler arası kuvvet yok**

İSTENEN

Tüm dilimlerin tablosu: **W, N′, R, D** ve toplamları; **FS = ΣR / ΣD**.



Çözüm (1/3)

ÇÖZÜM

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
1	10,00	0,001	−22,1	0,001	0,00	20	18	0,00	0,03	−0,00
2	10,38	0,758	−20,7	0,810	4,49	20	18	4,20	17,57	−1,59
3	11,14	0,759	−18,1	0,798	13,08	20	18	12,43	20,01	−4,06
4	11,90	0,759	−15,4	0,787	21,15	20	18	20,39	22,37	−5,63
5	12,66	0,759	−12,9	0,779	28,74	20	18	28,02	24,67	−6,40
6	13,41	0,759	−10,3	0,771	35,84	20	18	35,27	26,89	−6,41
7	14,17	0,759	−7,8	0,766	42,49	20	18	42,10	29,00	−5,74
8	14,93	0,759	−5,2	0,762	48,68	20	18	48,47	30,99	−4,45
9	15,69	0,759	−2,7	0,760	54,42	20	18	54,36	32,86	−2,59
10	16,45	0,759	−0,2	0,759	59,72	20	18	59,72	34,59	−0,23
11	17,21	0,759	2,3	0,760	64,58	20	18	64,53	36,16	2,57
12	17,79	0,411	4,2	0,412	36,85	20	18	36,75	20,19	2,71
13	18,17	0,348	5,5	0,349	32,15	20	18	32,01	17,39	3,07
14	18,73	0,759	7,3	0,765	73,11	20	18	72,51	38,87	9,31
15	19,49	0,759	9,9	0,770	76,77	20	18	75,64	39,98	13,13
16	20,25	0,759	12,4	0,777	79,97	20	18	78,11	40,92	17,18
17	21,00	0,759	15,0	0,786	82,70	20	18	79,89	41,67	21,38

Çözüm (2/3)

ÇÖZÜM

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
18	21,76	0,759	17,6	0,796	84,94	20	18	80,97	42,23	25,68
19	22,52	0,759	20,2	0,809	86,67	20	18	81,32	42,60	29,99
20	23,28	0,759	22,9	0,824	87,86	20	18	80,91	42,77	34,25
21	24,04	0,759	25,7	0,842	88,49	20	18	79,74	42,76	38,37
22	**24,80**	**0,759**	**28,5**	**0,864**	**88,52**	**20**	**18**	**77,79**	**42,55**	**42,25**
23	25,56	0,759	31,4	0,889	87,89	20	18	75,02	42,16	45,80
24	26,32	0,759	34,4	0,920	86,56	20	18	71,43	41,60	48,89
25	27,08	0,759	37,5	0,956	84,44	20	18	67,00	40,90	51,38
26	27,84	0,759	40,7	1,001	81,43	20	18	61,72	40,08	53,11
27	28,59	0,758	44,1	1,056	77,34	20	18	55,53	39,17	53,83
28	29,35	0,760	47,7	1,129	72,09	5	30	48,51	33,65	53,33
29	29,87	0,267	50,3	0,418	23,72	5	30	15,15	10,84	18,25
30	30,25	0,492	52,3	0,805	40,15	5	30	24,55	18,20	31,76
31	30,87	0,759	55,8	1,351	50,12	5	30	28,16	23,01	41,46
32	31,63	0,759	60,6	1,545	33,40	5	30	16,41	17,20	29,09
33	32,39	0,759	66,2	1,878	12,72	5	30	5,14	12,36	11,64
Σ					**1841,11**			**1613,77**	**1006,25**	**641,34**

Çözüm (3/3)

ÇÖZÜM

1 Toplamlar ve güvenlik sayısı

$$\sum R = 1\,006{,}25\ \mathrm{kN/m} \qquad \sum D = 641{,}34\ \mathrm{kN/m} \qquad \sum W = 1\,841{,}1\ \mathrm{kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1\,006{,}25}{641{,}34} = \mathbf{1{,}569}$$

Bu daire için sıradan yöntemle **FS = 1,569**. Ayak tarafındaki dilimlerde (α < 0) taban kaymaya karşı eğimlidir: D negatiftir ve ΣD'yi azaltır. Dilim 22, tablonun 22. satırıdır ve elle bulunan değerlerle aynıdır.

ΣR/ΣD: **dayanımın** kaydırıcı etkiye oranı; FS > 1 ise bu daire boyunca kayma beklenmez.

Sıradan yöntem en düşük değeri verir; Bishop ve Spencer aynı dairede daha yüksektir (sonraki örnekler).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

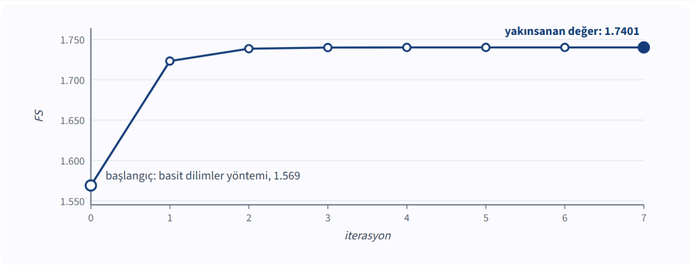
SORU

Verilenler

Dilim ve daire	**Örnek 2'deki 22. dilim ve Örnek 1'deki daire; başlangıç değeri Örnek 3'teki $FS_0 = 1{,}569$**
Yöntem	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

İSTENEN

Dilim 22 için **m_α**, **N′**, **R**; tüm daire için **yineleme** ve **FS**.



Çözüm (1/4)

ÇÖZÜM

1 İlk yineleme (FS_0 = sıradan yöntemin değeri = 1,5690)

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS_0} = 0{,}8787 + \frac{0{,}4773(0{,}3249)}{1{,}5690} = 0{,}9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88{,}52 - 20(0{,}864)(0{,}4773)/1{,}5690}{0{,}9776} = 85{,}17\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0{,}864) + 85{,}17(0{,}3249) = 44{,}95\ \mathrm{kN/m}$$

Çözüm (2/4)

ÇÖZÜM

2 Yakınsanan değerle (FS = 1,7401)

$$m_\alpha = 0{,}8787 + \frac{0{,}4773(0{,}3249)}{1{,}7401} = \mathbf{0{,}9679}$$

$$N' = \frac{88{,}52 - 20(0{,}864)(0{,}4773)/1{,}7401}{0{,}9679} = \mathbf{86{,}56}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0{,}864) + 86{,}56(0{,}3249) = \mathbf{45{,}40}\ \mathrm{kN/m} \qquad D = 42{,}25\ \mathrm{kN/m}$$

Dilim 22'nin normal kuvveti sıradan yöntemdeki 77,79'den **86,56** kN/m'ye çıkar (dilimler arası düşey denge); direnç 42,55 → **45,40** kN/m. Aynı adımlar 33 dilimde yinelenir.

Çözüm (3/4)

ÇÖZÜM

2 Her yinelemede ΣR yeniden hesaplanır, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

Yineleme k	FS_k	Fark
0 (sıradan)	1,5690	
1	1,7232	0,1542
2	1,7385	0,0153
3	1,7399	0,0014
4	1,7401	0,0001
5	1,7401	0,0000
6	1,7401	0,0000
7	**1,7401**	0,0000



7 yinelemede **FS = 1,740**; ΣR = 1115,97, ΣD = 641,34 kN/m. Sıradan yöntemden (1,569) 10,9% yüksektir.

Çözüm (4/4)

ÇÖZÜM

No	α (°)	W	m_α	N′	R
1	−22,1	0,00	0,8566	0,01	0,03
2	−20,7	4,49	0,8693	8,95	19,11
3	−18,1	13,08	0,8928	17,83	21,76
4	−15,4	21,15	0,9141	25,78	24,12
5	−12,9	28,74	0,9333	32,92	26,27
6	−10,3	35,84	0,9505	39,38	28,22
7	−7,8	42,49	0,9656	45,23	30,02
8	−5,2	48,68	0,9788	50,55	31,67
9	−2,7	54,42	0,9900	55,39	33,20
10	−0,2	59,72	0,9993	59,80	34,61
11	2,3	64,58	1,0066	63,81	35,93
12	4,2	36,85	1,0110	36,10	19,98
13	5,5	32,15	1,0133	31,35	17,18
14	7,3	73,11	1,0156	70,88	38,34
15	9,9	76,77	1,0172	73,99	39,45
16	12,4	79,97	1,0168	76,77	40,49
17	15,0	82,70	1,0143	79,24	41,46

No	α (°)	W	m_α	N′	R
18	17,6	84,94	1,0097	81,39	42,37
19	20,2	86,67	1,0028	83,22	43,22
20	22,9	87,86	0,9937	84,71	44,01
21	25,7	88,49	0,9821	85,83	44,74
22	**28,5**	**88,52**	**0,9679**	**86,56**	**45,40**
23	31,4	87,89	0,9508	86,84	46,00
24	34,4	86,56	0,9307	86,59	46,53
25	37,5	84,44	0,9072	85,70	46,98
26	40,7	81,43	0,8798	84,02	47,33
27	44,1	77,34	0,8480	81,24	47,52
28	47,7	72,09	0,9183	75,89	49,46
29	50,3	23,72	0,8941	25,50	16,81
30	52,3	40,15	0,8741	43,83	29,33
31	55,8	50,12	0,8363	56,09	39,14
32	60,6	33,40	0,7803	37,85	29,58
33	66,2	12,72	0,7076	11,00	15,74
Σ		**1841,11**			**1115,97**

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

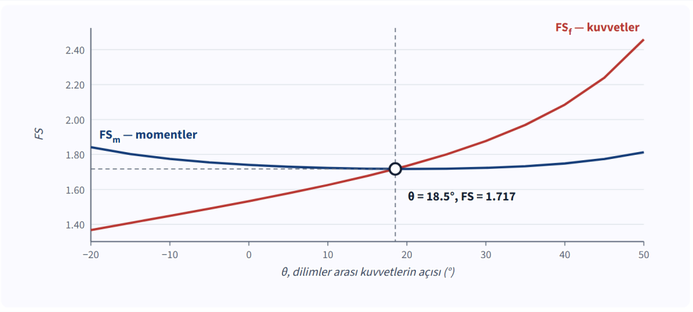
SORU

Verilenler

Dilim ve daire	**Örnek 2'deki 22. dilim, Örnek 1'deki daire; dilimler arası kuvvetler paralel, $X = E \tan\theta$**
Çözüm açısı	**$\theta = 18{,}54^\circ$ (aşağıdaki iki eğrinin kesiştiği açı), $FS = 1{,}717$**

İSTENEN

Dilim 22 için **ΔE**, **N′**, **R**, **E** ve **X**; θ–FS eğrileri ve tüm daire.



Çözüm (1/4)

ÇÖZÜM

1 Dilimin normal kuvvet farkı ΔE (θ = 18,54°, tan θ = 0,3354, FS = 1,717)

$$\text{pay} = cL + \tan\varphi' \, W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17{,}275 + 25{,}274 - 72{,}542 = -29{,}99$$

$$\text{payda}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1{,}7837$$

$$\text{payda}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0{,}0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{pay}}{\text{payda}_1 + \text{payda}_2} = \frac{-29{,}99}{1{,}8430} = \mathbf{-16{,}27}\ \text{kN/m}$$

Çözüm (2/4)

ÇÖZÜM

2 Normal kuvvet, direnç ve dilimler arası kuvvetler

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77{,}786 + (-16{,}27)(-0{,}1826) = \mathbf{80{,}76}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43{,}51}\ \mathrm{kN/m}$$

$$E_{ayak} = 254{,}69\ \mathrm{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{üst} = E_{ayak} + \Delta E = 238{,}41\ \mathrm{kN/m}$$

$$X_{ayak} = E\tan\theta = \mathbf{85{,}42}$$

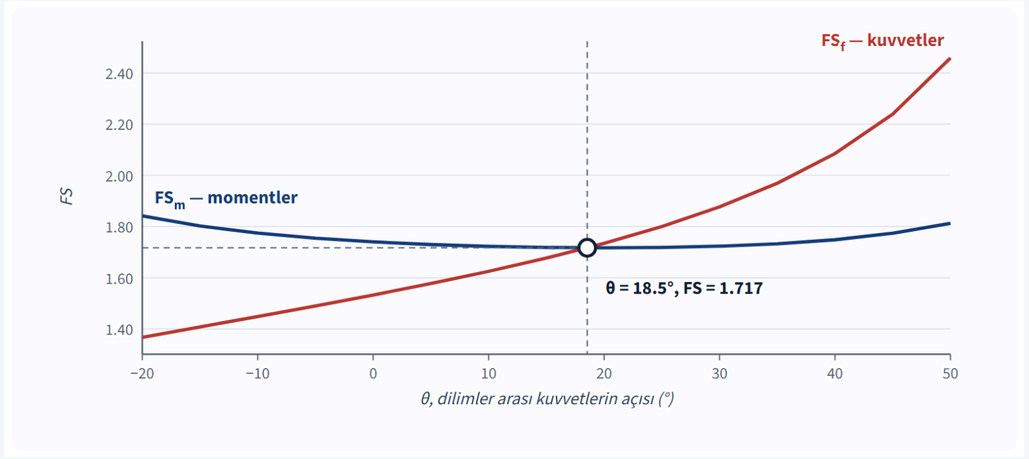
Spencer'da dilim 22'nin normal kuvveti **80,76** kN/m (sıradan 77,79, Bishop 86,56); dilimler arası kuvvet olarak ayak tarafına E = 254,69 kN/m etkir.

Çözüm (3/4)

ÇÖZÜM

3 Her θ için FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) ve FS_m (moment); kesişim çözümdür

θ (°)	FS_m (moment)	FS_f (kuvvet)
-20	1,842	1,367
-15	1,802	1,408
-10	1,774	1,449
-5	1,755	1,490
0	1,740	1,533
5	1,730	1,577
10	1,723	1,625
15	1,718	1,677
20	1,717	1,735
25	1,718	1,800
30	1,723	1,877
35	1,733	1,969
40	1,748	2,085
45	1,774	2,239
50	1,812	2,458
18,54	**1,717**	**1,717**



Çözüm (4/4)

ÇÖZÜM

No	ΔE	E (ayak)	N′	R
1	0,02	−0,00	0,02	0,03
2	17,12	0,02	15,62	21,28
3	21,59	17,14	26,01	24,42
4	24,46	38,73	34,81	27,06
5	26,08	63,19	42,35	29,33
6	26,67	89,27	48,84	31,30
7	26,41	115,94	54,44	33,01
8	25,43	142,35	59,29	34,51
9	23,87	167,78	63,49	35,83
10	21,80	191,65	67,12	36,99
11	19,32	213,45	70,24	38,01
12	9,30	232,78	39,17	20,97
13	7,19	242,08	33,72	17,95
14	13,38	249,26	75,26	39,76
15	10,03	262,64	77,24	40,50
16	6,48	272,67	78,84	41,16
17	2,77	279,15	80,07	41,73
18	−1,03	281,92	80,95	42,23
19	−4,89	280,89	81,47	42,65
20	−8,75	276,01	81,62	43,01
21	−12,57	267,25	81,39	43,29
22	**−16,27**	**254,69**	**80,76**	**43,51**
23	−19,80	238,41	79,67	43,67
24	−23,06	218,61	78,07	43,76
25	−25,94	195,55	75,88	43,79
26	−28,29	169,61	72,98	43,74
27	−29,89	141,32	69,14	43,59
28	−30,84	111,42	64,36	42,80
29	−11,02	80,59	21,27	14,37
30	−19,70	69,57	36,10	24,87
31	−26,62	49,87	45,17	32,83
32	−18,69	23,25	29,61	24,82
33	−4,56	4,56	8,70	14,41
Σ	0,00			**1 101,18**

θ = 18,54°; ΣR = 1 101,18, ΣD = 641,34 → **FS = 1,717**. E_{max} = 281,9 kN/m.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Ağırlık, boşluk suyu basıncı, şevdeki su

KURAM

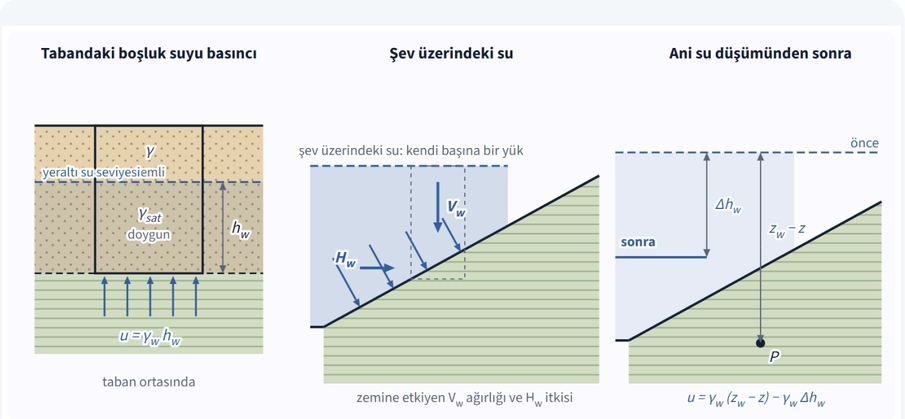
Su analize üç yolla girer: doygun zeminin ağırlığı, her dilimin tabanında dayanımı azaltan boşluk suyu basıncı ve şev üzerinde bulunduğu yerde kendi başına bir yük olarak.

Yeraltı su çizgisinin altında boşluk suyu basıncı hidrostatiktir; sızma analiz edilmediğinden eğimli bir yeraltı suyu seviyesi akım ağına bir yaklaşımdır ve batık birim hacim ağırlık hiçbir zaman kullanılmaz.

Boşluk suyu basıncı örtü yükünün bir oranı olarak bilindiğinde zemine bir r_u oranı verilir; bu durum inşa aşamasındaki bir dolgu ya da yumuşak kil üzerindeki bir dolgu için geçerlidir.

Şevin önündeki su drene olabileceğinden hızlı alçaldığında destek ortadan kalkar, boşluk suyu basıncı korunur ve güvenlik sayısı su düşümünün hemen sonrasındaki en düşük değere aittir.

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



Soru

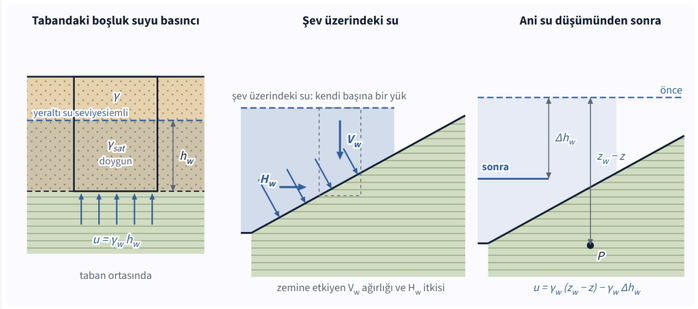
SORU

Verilenler

Su çizgisi	$(0;0)$–$(20;2{,}5)$–$(50;7)$ **m, hidrostatik; $\gamma_w = 9{,}81$ kN/m³; doygun birim ağırlıklar dolgu 20, kil 19,5 kN/m³**
Dilim	**aynı daire; $x_m = 24{,}800$ m'deki dilim (suyla 33. değil 24. dilim olur)**

İSTENEN

Dilimde **z_w, h_w, u, U**; yeni **W, N′, R, D**; tüm dairede **FS**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Su yüksekliği ve boşluk suyu basıncı

$$z_w = 2{,}5 + \frac{24{,}800 - 20}{30}(4{,}5) = 3{,}2199\ \text{m}$$

$$h_w = z_w - z_{taban} = 3{,}2199 - 0{,}8327 = \mathbf{2{,}3872}\ \text{m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9{,}81(2{,}3872) = \mathbf{23{,}42}\ \text{kPa} \qquad U = uL = 23{,}42(0{,}864) = \mathbf{20{,}23}\ \text{kN/m}$$

2 Ağırlık: suyun üstü nemli, altı doygun

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{kuru}\gamma_{nemli} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0{,}7590[3{,}3998(18) + 0{,}7801(17{,}5) + 2{,}3872(19{,}5)] = \mathbf{92{,}14}\ \text{kN/m}$$

Su hem ağırlığı kuru 88,52 kN/m'den **92,14** kN/m'ye çıkarır hem de tabanda **U = 20,23** kN/m su kuvveti doğurur.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Efektif normal kuvvet, direnç, kaydırıcı etki (dilim 22)

$$N' = W\cos\alpha - U = 92{,}14(0{,}8787) - 20{,}23 = \mathbf{60{,}74}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0{,}864) + 60{,}74(0{,}3249) = \mathbf{37{,}01}\ \text{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43{,}98}\ \text{kN/m}$$

4 Tüm daire (36 dilim, aynı dairede) ve kuru durumla karşılaştırma

Yöntem	ΣU	ΣR	ΣD	FS (su)	FS (kuru)
Sıradan	476,94	879,96	655,41	**1,343**	1,569
Bishop	476,94	981,07	655,41	**1,497**	1,740
Spencer	476,94	970,22	655,41	**1,480**	1,717

Aynı daire için su FS'yi 1,569 → **1,343** (sıradan) düşürür; su çizgisiyle kritik daire yeniden aranırsa daha sığ ve **1,255 / 1,568 / 1,564** olur (sıradan / Bishop / Spencer).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Şerit ve tekil yük; düşey, dik, eğik

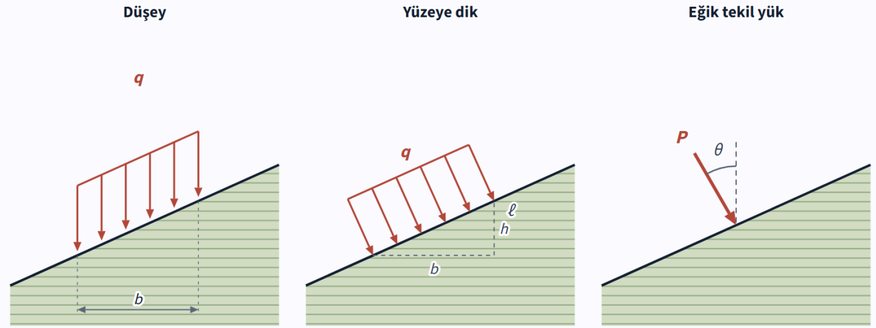
KURAM

Düşey ya da eğik etkiyen şerit yük yatay izdüşüm üzerinde alınır ve yatay genişliği b olan parça üzerindeki kuvvet q b değerindedir.

Yüzeye dik etkiyen yük yüzey uzunluğu üzerinde alınır; ℓ uzunluğundaki parçadaki kuvvet q ℓ olup düşey bileşeni q b, yatay bileşeni q h'dir.

Her dilim, bir yükün kenarları arasına düşen bölümünü yatay genişliğe göre paylaştırılmış olarak taşır ve tekil yük uygulama noktasını içeren dilime aittir.

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



kuvvet q b, yatay izdüşüm üzerinde — q ℓ zemine doğru: q b aşağı, q h yana — tekil yük, uygulama noktasını içeren dilime aittir

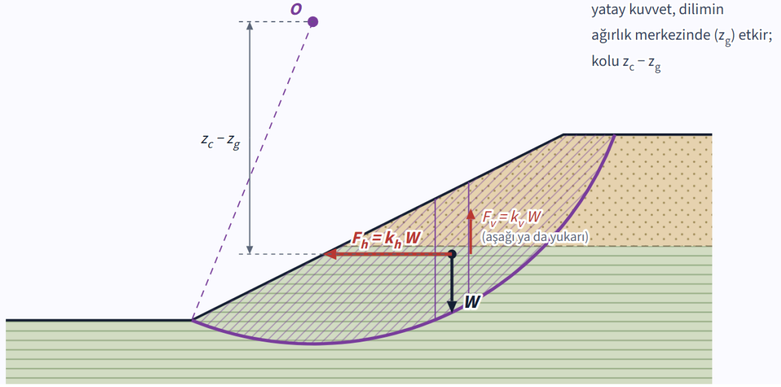
Dilimin ağırlık merkezinde atalet kuvvetleri

KURAM

Psödo-statik yaklaşımda deprem sarsıntısı, kayan kütleye uygulanan ve g'nin bir oranı olarak ifade edilen sabit bir ivmeyle temsil edilir.

Her dilimde zemin kütlesinin ($\mathbf{W_{soil}}$) atalet kuvvetleri, dilim üzerinde biriken su bu kuvveti taşımadığından, dilim içindeki zeminin nemli ve doygun bölümlerinden bulunan ağırlık merkezinde ($\mathbf{z_g}$) uygulanır.

Kritik durum seçeneğinde her iki yatay ve her iki düşey yön denenip en düşük güvenlik sayısı esas alınır; katsayılar kullanıcı tarafından verilir ve statik ile **psödo-statik** FS birlikte raporlanır.



$$F_h = k_h W_{zemin} \qquad F_v = k_v W_{zemin}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$

Soru

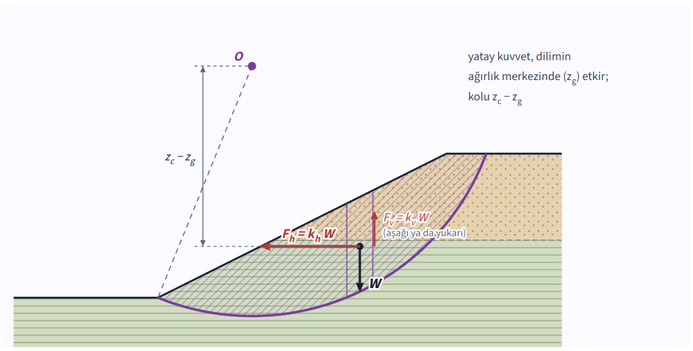
SORU

Verilenler

Deprem	$k_h = 0{,}15$, $k_v = 0$; **yatay kuvvet ayak yönünde (kritik yön)**
Dilim ve daire	**Örnek 2'deki dilim 22 ve daire; ağırlık merkezi z_g moment kolu için gerekir**

İSTENEN

Dilim 22'de **F_h, N′, R, D**; tüm dairede üç yöntemle **FS_{deprem}**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Atalet kuvveti ve moment kolu

$$F_h = k_h W = 0{,}15(88{,}52) = \mathbf{13{,}28}\ \mathrm{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i}/W = (46{,}45(5{,}700) + 42{,}07(2{,}416))/88{,}52 = 4{,}139\ \mathrm{m}$$

$$\text{moment kolu} = (z_c - z_g)/r = (16{,}080 - 4{,}139)/17{,}352 = 0{,}6882$$

2 Normal kuvvet, direnç, kaydırıcı etki

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77{,}79 - 6{,}34 = \mathbf{71{,}45}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0{,}864) + 71{,}45(0{,}3249) = \mathbf{40{,}49}\ \mathrm{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h\,\frac{z_c - z_g}{r} = 42{,}25 + 13{,}28(0{,}6882) = \mathbf{51{,}39}\ \mathrm{kN/m}$$

Kaydırıcı etki 42,25 → **51,39** kN/m (+22%), direnç 42,55 → **40,49** kN/m: yatay kuvvet normal kuvveti azaltır, kayma momenti ekler.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Aynı dairede üç yöntem (k_h = 0,15, k_v = 0)

Yöntem	ΣR	ΣD	FS (statik)	FS (deprem)
Sıradan	967,97	840,48	1,569	**1,152**
Bishop	1 083,01	840,48	1,740	**1,289**
Spencer	1 069,09	840,48	1,717	**1,272**

k_h = 0,15 FS'yi yaklaşık 27% düşürür (sıradan 1,569 → **1,152**). Deprem etkisinde kritik daire de değişir: sayfadaki modelde (k_h = 0,15, k_v = 0,05, kritik yönler) arama sonucu 1,138 / 1,265 / 1,250 olur.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Derinlik ve çatlaktaki su

KURAM

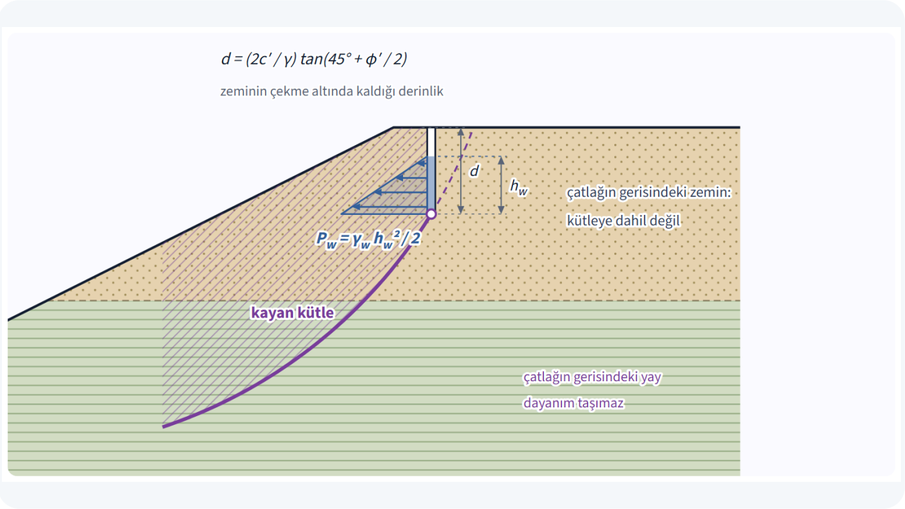
Çekme çatlağı derinliği d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2) ile bulunur; drenajsız durumda bu derinlik $2c_u/\gamma$ olur.

Çatlak etkin olduğunda kayma yüzeyi kayan kütlenin derinliği çatlak derinliğine eşit olan noktada son bulur; çatlağın gerisindeki zemin kayan kütleye dahil değildir ve yayın çatlak içinde kalan bölümü dayanım taşımaz.

Çatlakta h_w yüksekliğine kadar duran su hidrostatik kuvvetle basınç uygular; suyla dolu çatlak güvenlik sayısını düşürür ve bu durum daha sık gözden kaçar.

$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{taban} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{çatlak} = \frac{P_w\,(z_c - z_f)}{r}$$



Soru

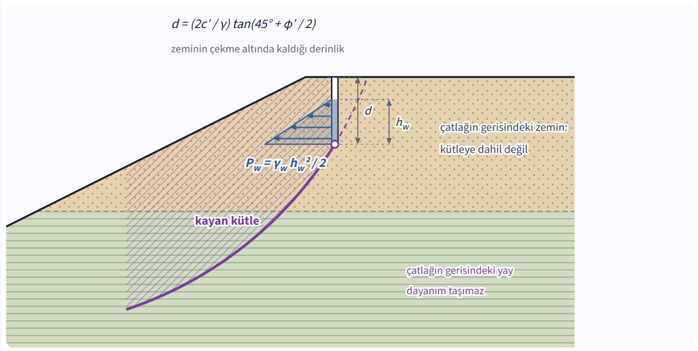
SORU

Verilenler

Çatlak	**üstte, $d = 2$ m derinlikte düşey çatlak (modelin başlangıç değeri); kuru ve suyla dolu ($h_w = 2$ m) iki durum**
Daire	**Örnek 1'deki daire; çatlağın tabanında son bulur**

İSTENEN

Çatlağın **x** konumu; **P_w**, **z_f**, **$D_{çatlak}$**; üç yöntemle **FS**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Çatlağın yeri: daire z = 10 − 2 = 8 m kotuna indiği yerde son bulur

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16{,}518 + \sqrt{301{,}08 - (8 - 16{,}080)^2} = \mathbf{31{,}87}\ \mathrm{m}$$

2 Çatlaktaki su (h_W = 2 m): kuvvet ve moment

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9{,}81(2)^2}{2} = \mathbf{19{,}62}\ \mathrm{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8{,}667\ \mathrm{m}$$

$$D_{çatlak} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19{,}62(16{,}080 - 8{,}667)}{17{,}352} = \mathbf{8{,}38}\ \mathrm{kN/m}$$

Rankine derinliği dolguda 0,96 m, kilde 3,15 m'dir; modül çatlak derinliğini mühendisin girdiği değerle (burada 2 m) alır. Suyla dolu çatlak ΣD'ye **8,38** kN/m ekler.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Çatlaksız, kuru çatlak ve suyla dolu çatlak (aynı daire; çatlakta 34 dilim)

Yöntem	FS çatlaksız	ΣR	ΣD (kuru)	FS kuru çatlak	ΣD (su)	FS dolu çatlak
Sıradan	1,569	991,18	625,52	**1,585**	633,91	**1,564**
Bishop	1,740	1 096,39	625,52	**1,753**	633,91	**1,727**
Spencer	1,717	1 083,00	625,52	**1,731**	633,91	**1,702**

Kuru çatlak FS'yi çok az değiştirir (yukarıdaki sürücü kütle ile yaydaki direnç birlikte gider: 1,569 → 1,585); **suyla dolu çatlak** düşürür (1,564). Çatlaktaki su en çok unutulan durumdur.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Merkez ızgarası, yarıçaplar, inceltme

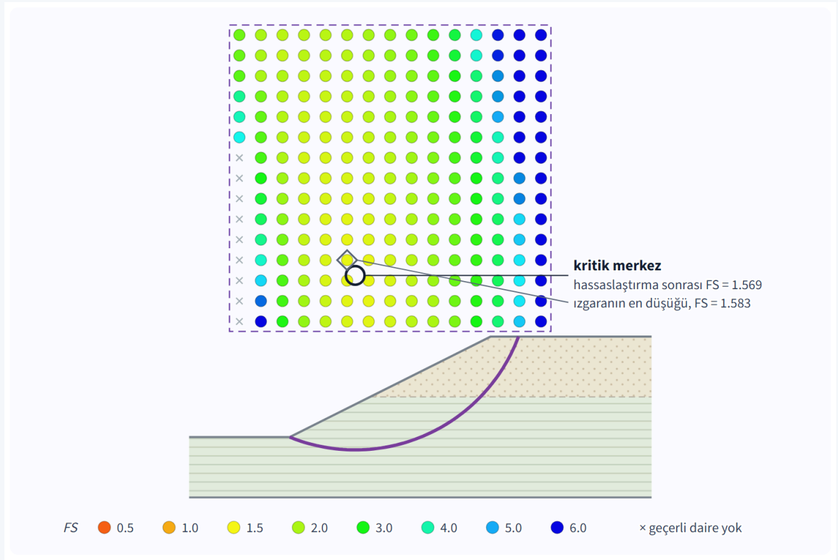
KURAM

Kritik daire araması, şev üzerine yerleştirilen $n_x \times n_z$ noktalı bir merkez ızgarası üzerinde yürütülür ve her merkezde eşit aralıklı bir yarıçap takımı denenir.

Her daire dilimlere ayrılıp çözülür ve her merkez için bulunan en düşük güvenlik sayısı ilgili yarıçapla birlikte saklanır; çözümlü modelde 15 × 15 merkez ve 12 yarıçapla 4650 daire denenmiştir.

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{krit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

Çözümlü model	Değer
Izgara ($n_x \times n_z \times$ yarıçap)	15 × 15 × 12
Denenen / kabul edilen daire	4 650 / 3 487
Izgaranın en düşüğü	FS = 1,583
İnceltmeden sonra	**FS = 1,569**
Kritik daire	x_c = 16,52, z_c = 16,08, r = 17,35 m



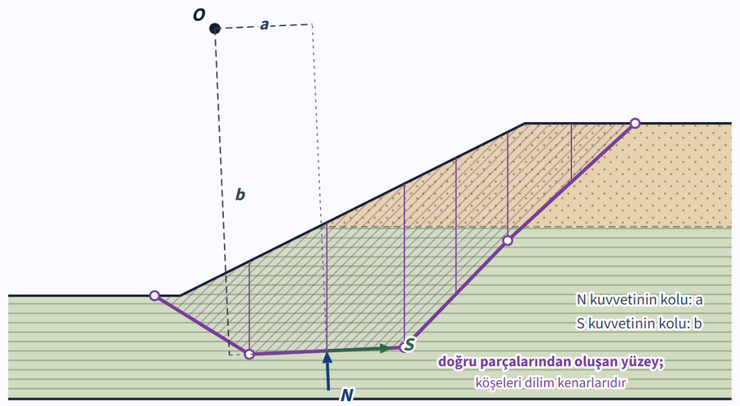
Kırık çizgi, yalnız Spencer

KURAM

Dairesel olmayan yüzey, şev tepesinden inip şev topuğuna doğru yükselen kamalarla zayıf bir tabakayı izleyebilir ve iki ucu zemin yüzeyinde olan poligonal bir yüzeydir.

Çoklu doğrusal yüzeyde moment denklemi, kütlenin topuk ucunun üzerinde seçilen bir O noktasına göre yazılır; N'nin kolu a, S'nin kolu b'dir.

En düşük güvenlik sayılı yüzey n parçalı çoklu doğru olarak aranır; hareket yalnızca yüzey kabul edilebilir kaldığında korunur ve dışbükey kısıtı zikzaklı yüzeylere yönelmeyi önler.



$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{donatı} + M_{çatlak} = 0$$

Pasif ve aktif elemanın FS'ye katkısı

KURAM

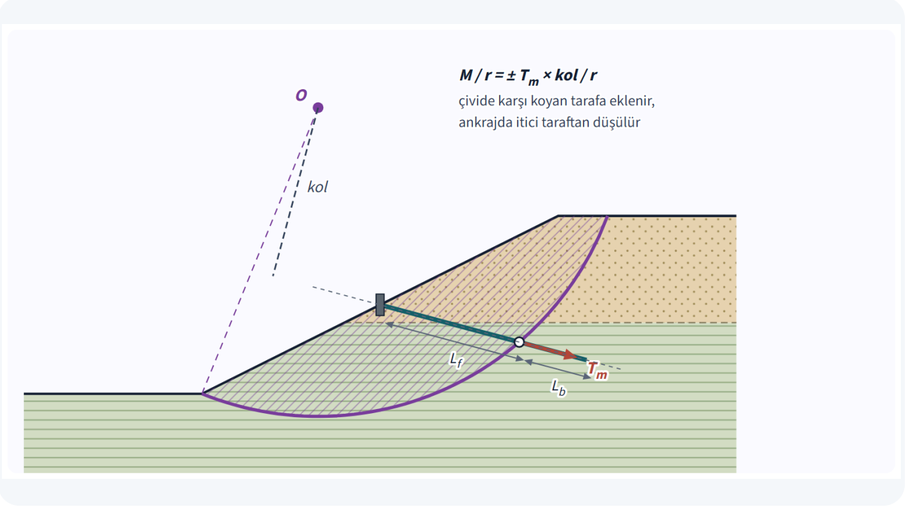
Donatı elemanı kayma yüzeyini kesen bir çizgi olup yayı kestiği noktaya kadar kayma yüzeyinin önündeki uzunluk L_f, bu noktanın gerisindeki bağlı uzunluk L_b ile gösterilir.

Pasif eleman (çivi, geogrid) momenti karşı koyan tarafa eklenir; aktif eleman (ankraj) yükünü hareketten önce taşıdığından momenti itici taraftan düşülür.

Aynı kuvvet için aktif bir eleman güvenlik sayısını pasif elemandan daha fazla artırır; kuvvet statik ve psödo-statik durumda aynı alınmıştır.

$$\frac{M}{r} = \pm \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{pasif}/r}{\sum D - \sum M_{aktif}/r}$$



Üç değerin en küçüğü

KURAM

Zemin çivisinin çekme kuvveti $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$ olarak üç değerin en küçüğüdür.

Çivi pasif bir elemandır: kütle hareket ettikçe devreye girer ve Sh aralığına bölünen çivi kuvveti $T_m = T/S_h$ ile ifade edilir.

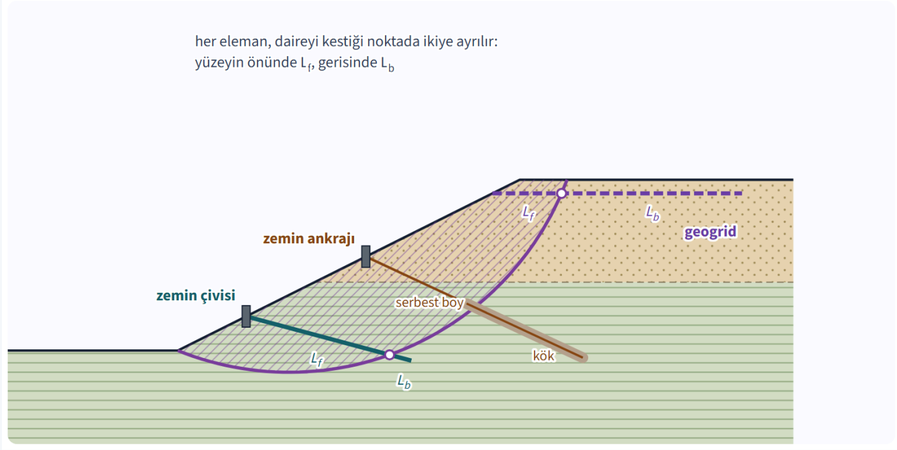
Başı dairenin dışında kalan ya da ucu kütlenin içinde bulunan bir çivi o daire için kuvvet taşımaz.

Serbest boyda bağ oluşmaz; ankrajı kök tutar ve ankrajın bir kayma dairesini keserek aktardığı kuvvet üç değerin en küçüğüdür: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

Ankraj aktif bir elemandır: yük kütle hareket etmeden önce tendonda bulunur ve Spencer denklemlerinde ankraj verilen bir kuvvettir; orada **FS** değerine bölünmez.

$$\text{çivi: } T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

$$\text{ankraj: } T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$



Tasarım dayanımı, sıyrılma, bağlantı

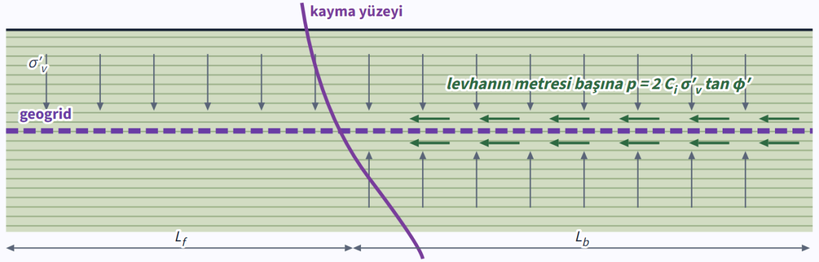
KURAM

Geogrid; uzunluğu L, kesitin metresi başına uzun süreli tasarım dayanımı T_d, zemin ile geogrid arasındaki etkileşim katsayısı C_i ve cephe kaplamasına bağlandığında bağlantı dayanımı T_c ile tanımlanır.

Uzunluğun metresi başına sıyrılma direnci, efektif örtü yükü σ'_v altında iki yüzündeki sürtünmeden kaynaklanır; geogrid pasif bir elemandır ve levha doğrultusunda etkir.

σ'_v, levhanın üzerindeki zeminin ağırlığından — yeraltı su seviyesinin altında doygun birim hacim ağırlıkla — boşluk suyu basıncının çıkarılmasıyla elde edilir; yüzey yükleri güvenli tarafta kalınarak hesaba katılmamıştır.

$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\,\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$



Soru

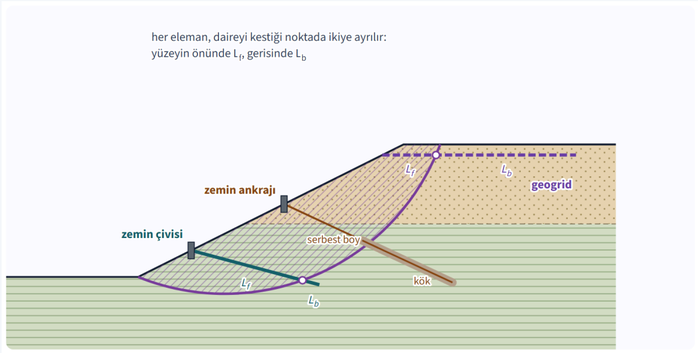
SORU

Verilenler

Çiviler	**dört çivi, başları $x = 14, 18, 22, 26$ m'de (yüzeyde), 15° eğimli, $L = 14$ m; $T_t = 250$ kN, $q_u = 120$ kPa, $D_h = 120$ mm, $S_h = 1{,}5$ m**
Daire	**çivili modelde aramanın bulduğu daire: merkez $(18{,}29;\ 13{,}90)$, $r = 18{,}18$ m**

İSTENEN

Her çivi için **L_f, L_b, T** ve **T_m**; moment katkısı; **FS**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Bağ dayanımı (birim uzunluk) ve çivi N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0{,}120) = \mathbf{45{,}239}\ \mathrm{kN/m}$$

$$L_f = 11{,}282\ \mathrm{m},\ L_b = 2{,}718\ \mathrm{m} \qquad P(32{,}90;\ 3{,}08)$$

$$T = \min[250,\ 45{,}239(2{,}718) = 122{,}94,\ 45{,}239(11{,}282) = 510{,}4] = \mathbf{122{,}94}\ \mathrm{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122{,}94}{1{,}5} = \mathbf{81{,}96}\ \mathrm{kN/m}$$

2 Kuvvetin daire merkezine göre momenti

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79{,}17, \quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21{,}21\ \mathrm{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14{,}606)(-21{,}21) - (-10{,}822)(79{,}17)}{18{,}178} = \mathbf{30{,}09}\ \mathrm{kN/m}$$

Çivi N3 kütleyi tutan **81,96** kN/m yük taşır; momenti ΣR'ye 30,09 kN/m ekler (pasif eleman).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Dört çivinin kuvvetleri (aynı yöntem)

Çivi	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	Belirleyen	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	ucu kütle içinde: yük taşımaz	0	0
N2	13,13	0,87	39,32	arkada sıyrılma	26,21	13,90
N3	11,28	2,72	122,94	arkada sıyrılma	81,96	30,09
N4	8,82	5,18	234,18	arkada sıyrılma	156,12	31,82

4 Çivili model: aramanın bulduğu daire üzerinde FS

Yöntem	Çivisiz (açılış)	Çivili
Sıradan	1,569	**1,753**
Bishop	1,740	**2,018**
Spencer	1,717	**2,031**

Çiviler FS'yi yaklaşık 12% artırır (sıradan 1,569 → 1,753; Bishop 1,740 → 2,018).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Eğrisel dayanım zarfı ve her tabandaki teğeti

KURAM

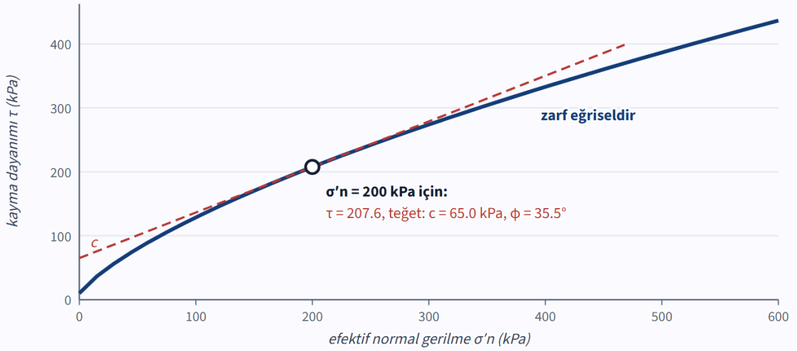
Genelleştirilmiş Hoek–Brown ölçütünde kaya kütlesi; σ_{ci}, GSI, m_i ve D ile tanımlanır; örselenmemiş kütlede D=0, yoğun patlatma veya gevşemede D=1 alınır.

Dilim tabanındaki kayma dayanımı normal gerilmeye bağlı olduğundan eğrisel zarf Balmer bağıntılarıyla τ–σ′n düzlemine çevrilir; teğet tabanda ci ve φi değerlerini verir.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i$$



Soru

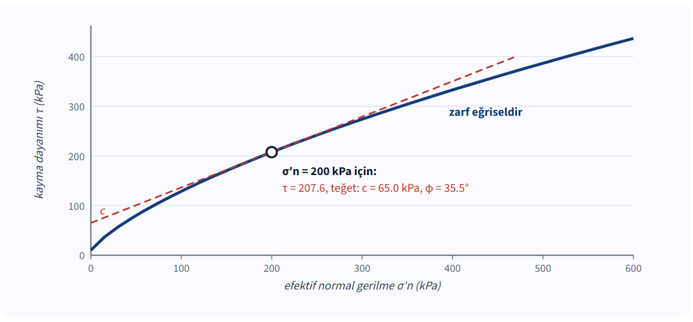
SORU

Verilenler

Kaya kütlesi	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
Taban	**efektif normal gerilme** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

İSTENEN

m_b, s, a; bu gerilmede **τ**, **φ_i** ve **c_i**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Kaya kütlesi sabitleri

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0{,}6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0{,}000419$$

$$a = 0{,}5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0{,}5223$$

2 σ'_n = 200 kPa için σ'_3 = 93,05 kPa (yinelemeli bulunur)

$$d = 1 + a\,m_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3{,}767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602{,}9\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200{,}0\ \text{kPa}\ \checkmark$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kayma dayanımı ve eşdeğer Mohr–Coulomb parametreleri

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207{,}6}\ \mathrm{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35{,}48}^\circ \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207{,}6 - 200(0{,}7128) = \mathbf{65{,}0}\ \mathrm{kPa}$$

Bu tabanda kaya, Mohr–Coulomb gibi **c_i = 65,0 kPa, φ_i = 35,5°** ile davranır (τ = 207,6 kPa); gerilme değişince bu değerler de değişir: her dilim kendi c ve φ'sini kullanır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

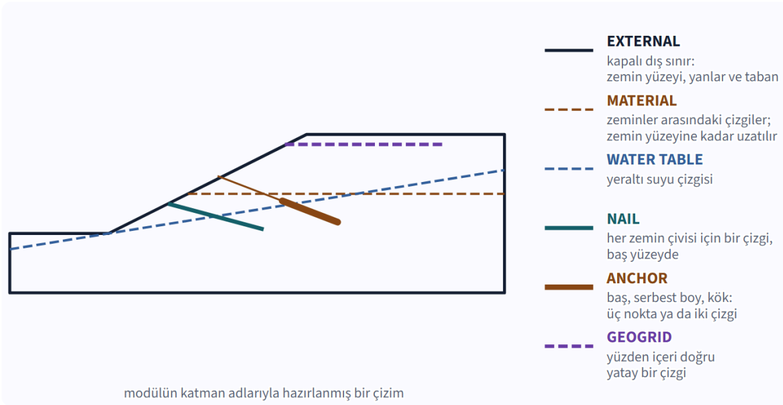
Katman adlarına göre okuma

KURAM

DXF kesiti katman adları büyük-küçük harf, boşluk, kısa çizgi ve alt çizgi farkı gözetilmeden okunur; **EXTERNAL** zemin yüzeyi, iki yan ve tabanı tek kapalı çizgi olarak verir.

MATERIAL zeminler arasındaki çizgilerdir; kesit içinde sona eren çizgi zemin yüzeyi boyunca uzatılır ve iki sınır arasındaki her bölgeye ayrı zemin atanır.

WATER TABLE yeraltı suyu çizgisidir; **NAIL**, **ANCHOR** ve **GEOGRID** donatılardır ve çizimde olmayan birim hacim ağırlık, dayanım, kapasite, yük ile deprem Model sekmesinde girilir.

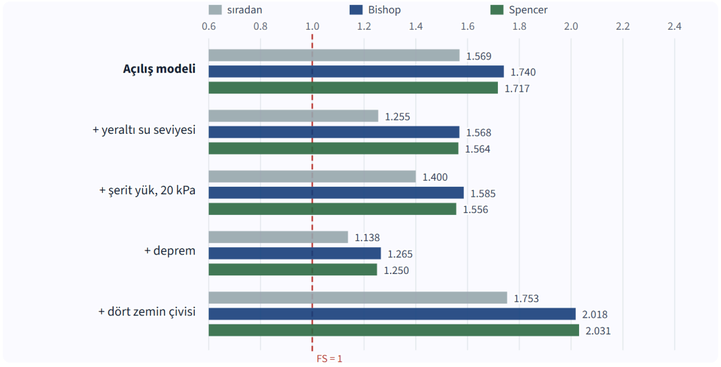


modülün katman adlarıyla hazırlanmış bir çizim

Sonuç tablosu

Aynı kesit, beş model, üç yöntem

Model (bir şey eklenir, daire yeniden aranır)	Merkez (x_c; z_c)	r (m)	Dilim	Sıradan	Bishop	Spencer
Açılıştaki model (statik)	16,52; 16,08	17,35	33	**1,569**	**1,740**	**1,717**
+ şevin içine doğru yükselen yeraltı su seviyesi	17,12; 11,45	16,85	36	**1,255**	**1,568**	**1,564**
+ 20 kPa şerit yük, x = 25 – 32 m	16,25; 15,44	16,66	35	**1,400**	**1,585**	**1,556**
+ deprem, kh 0.15, kv 0.05 (kritik)	16,72; 17,45	18,70	34	**1,138**	**1,265**	**1,250**
+ dört zemin çivisi, 14 m uzunluğunda	18,29; 13,90	18,18	34	**1,753**	**2,018**	**2,031**



Sıradan yöntem hep en düşüktür; Bishop ve Spencer birbirine yakındır (daire için fark yüzde birkaç).

Su ve deprem FS'yi en çok düşürür (1,255 ve 1,138, sıradan); dört çivi FS'yi 1,753'e çıkarır. Çivide Bishop ve Spencer 2,0'ın üstüne çıkar.

Varsayımlar

Modelin varsaydıkları ve yapmadıkları

Model düzlem şekil değiştirme varsayar: sonsuz uzunluktaki şevin bir metresi, her doğrultuda aynı dayanım (izotrop kaya ölçütü hariç) ve hareket başlayana kadar rijit zemin kabul edilir.

Su için bir çizginin altında hidrostatik ya da örtü yükünün r_u oranı kullanılır; sızma analizi yapılmaz ve ani düşümde $\bar{B} = 1$ ile anlık düşüm kabul edilir.

Dilimler için tüm büyüklükler dilimin orta düşeyinde alınır, negatif efektif normal kuvvet sıfırda tutulur; deprem psödo-statik katsayılarla ele alınır ve yüzeyde biriken suyun ataleti ihmal edilir.

Spencer yöntemi dilimler arası kuvvetleri tüm kütle için tek bir açıyla birbirine paralel kabul eder; moment dengesi üç yöntemde de, kuvvet dengesi yalnızca Spencer'da sağlanır.

Arama, başlangıç yüzeylerinin yakınında en düşük güvenlik sayılı yüzeyi bulur; bunun tüm yüzeyler arasında en düşük olduğu kanıtlanmış değildir.

YAPILMAYANLAR

- Üç boyutlu etkiler (kaymanın ucu, şevin genişliği)
- Deformasyon, ilerleyen göçme, gerilme yumuşaması
- Sızma ve konsolidasyon: boşluk suyu basıncı verilir, hesaplanmaz
- Dinamik analiz (Newmark): psödo-statik hesap bir kontroldür
- Hüküm: FS verilir; yeterli değeri mühendis ve şartname belirler

Özet

Akılda kalacak noktalar

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (daire merkezine göre moment). Üç yöntem yalnız **N′**'yi nasıl bulduklarıyla ayrışır

Dilim 22 (örnek): α = 28,51°, L = 0,864, W = 88,52 → sıradan N′ = 77,79, R = 42,55, D = 42,25; Bishop N′ = 86,56, R = 45,40; Spencer N′ = 80,76, R = 43,51 kN/m

Aynı daire: **1,569 (sıradan) · 1,740 (Bishop) · 1,717 (Spencer)**; kritik daire 15 × 15 × 12 ızgarada 4650 daire denenerek bulundu

Su: $u = \gamma_w h_w$ ile N′ azalır; **deprem**: F_h normali azaltır, moment ekler; **çatlaktaki su** ΣD'ye P_w momenti ekler

Donatı: pasif (çivi, geogrid) direnç tarafına, aktif (ankraj) kaydırıcı taraftan çıkarılır; **Hoek–Brown**: her tabanda teğet c_i, φ_i

Kaynaklar

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, 83–123.

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273.

Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271.

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007.

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap kitaplıklarıyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül sayfasındaki çözümlü model de bu kesittir (10 m yüksekliğinde 2:1 şev, dolgu üzerinde kil).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi kesitinizi çizin ya da DXF'ten okutun; zeminleri, suyu, yükleri, depremi ve donatıyı girin. Modül kritik daireyi arar, üç yöntemin güvenlik sayısını, dilim tablolarını, adım adım çözümü ve raporu verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.