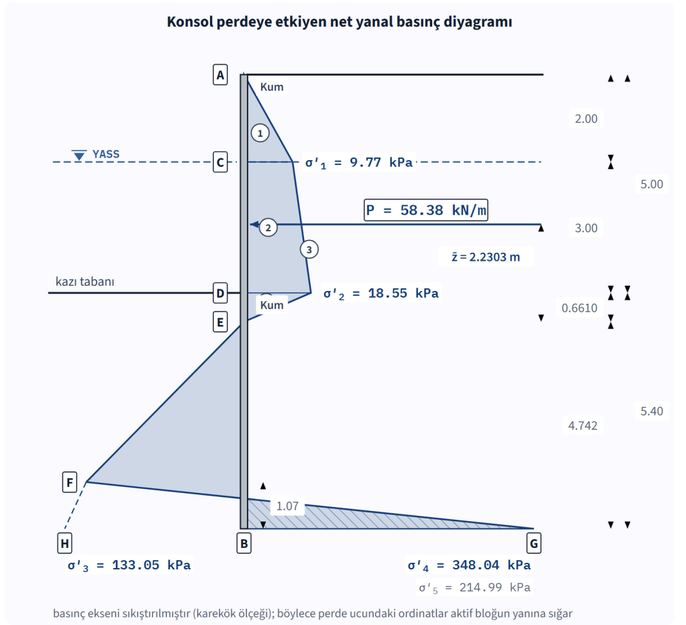
Geoteknik ders sunumu · Palplanş ve destekli kazılar

Kumda konsol palplanş duvar

Ders anlatımı: kumda konsol palplanş duvarın tasarımı; kazı tabanı üstü ve altı basınçlar, gömme derinliği, en büyük moment, kesit kontrolü, deprem ve yerdeğiştirme; her konuda çözümlü örnek.

- Konsol palplanş
- Net basınç diyagramı
- Gömme derinliği · en büyük moment
- EN 1993 · AISC 360
- Deprem · yerdeğiştirme



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Konsol palplanşın **nasıl döndüğünü** ve kazı tabanı üstünde, altında ve ucunda hangi basınçların oluştuğunu
- Kazı tabanı üstünde **aktif basıncı** (su, sürşarj) ve altında **net basınç doğrusunu**; sıfır noktası E
- Yatay ve moment dengesinden **gömme derinliğini**: L_4 için dördüncü derece denklem, D_{teorik}
- Tasarım derinliğine **güvenlik payı** eklemenin yollarını (f katsayısı, K_p/FS_p, verilen derinlik)
- **En büyük momenti** (kesmenin sıfır olduğu yer) ve palplanşı **EN 1993-1-1 / AISC 360-22** ile doğrulamayı
- Suyun, sürşarjın, eğimli yüzeyin ve **depremin** etkisini; **yerdeğiştirmeyi** yatak katsayısı yöntemiyle

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

1 · **Kuram**: kural nedir, neden öyle?

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Örnek duvar: kazı tabanı üstünde L = 5 m kum (γ = 15,9; γ_{sat} = 19,33 kN/m³; φ′ = 32°), yeraltı suyu üstten 2 m aşağıda ve iki yüzde aynı seviyede; palplanş aynı kuma çakılmıştır. Kuvvetler duvarın metresi içindir.

Nasıl çalışır, nasıl döner?

KURAM

Palplanş duvar, birbirine kenetlenen çelik kazıkların sıralanmasıdır; kazı tabanının (L) üstündeki zemini tutar ve **gömme derinliği D** ile ayakta kalır. **Konsol** duvarın başka desteği yoktur: çit direği gibi yalnız çakıldığı zeminin **pasif direnciyle** tutulur; bu nedenle genelde kazı tabanından itibaren yaklaşık 6 m'ye kadar ekonomiktir.

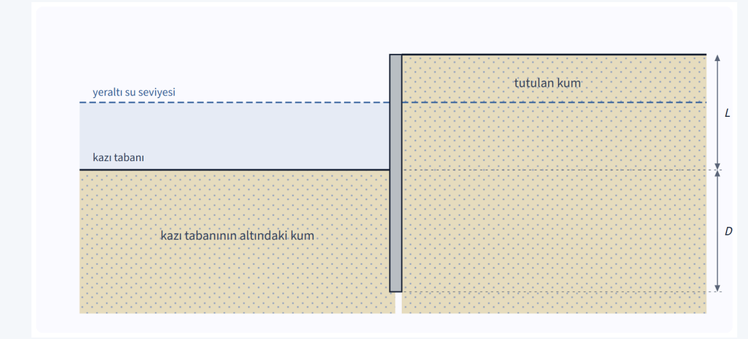
Duvar, O noktası (uca yakın) etrafında rijit döner. **A bölgesi** (kazı tabanı üstü): yalnız tutulan zemin, aktif basınç.

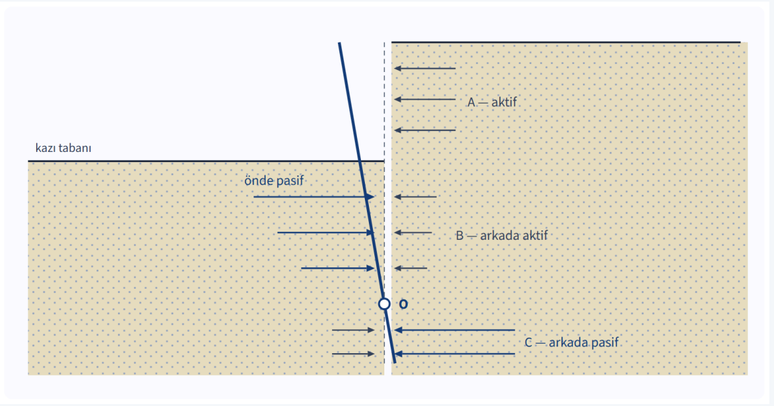
B bölgesi (kazı tabanı–O): arkada aktif, önde (itilen) pasif basınç.

C bölgesi (O altı): taraflar yer değiştirir; arkada pasif, önde aktif.

Gerçek dağılım eğridir; kaynak **doğrusal bir kurguyla** değiştirir: kazı tabanı altındaki net basınç, sıfır noktası E'den geçen tek doğru; uçtaki dönüş L_5 yüksekliğinde bir blok.

Rankine basınçları, **duvar sürtünmesi sayılmadan**, efektif düşey gerilme üzerinden; iki yüzde su aynı seviyedeyse hidrostatik basınçlar birbirini götürür.





σ'_1 ve σ'_2

KURAM

Kazı tabanı üstünde yalnız tutulan kum vardır; Rankine aktif basıncı = efektif düşey gerilme × K_a. Su, duvar tepesinden L_1 aşağıda, kalan $L_2 = L - L_1$ suyun altındadır ($\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$):

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

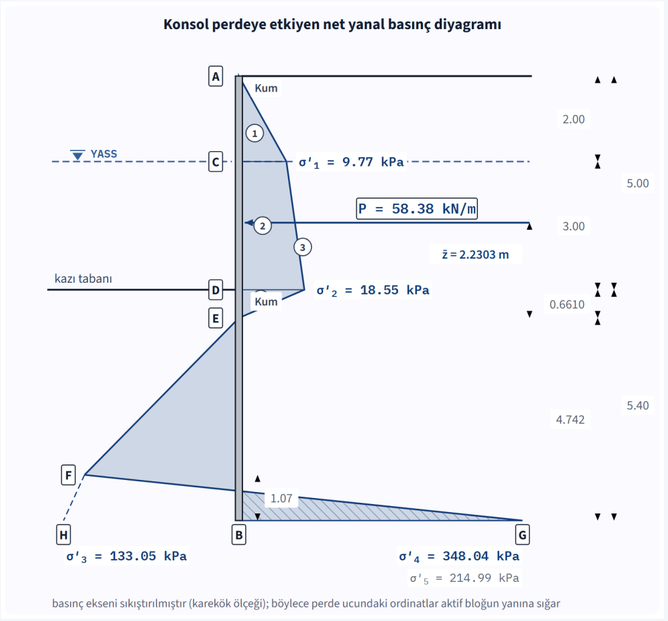
$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \qquad \sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2)\, K_a$$

İki yüzde su aynı seviyedeyse hidrostatik basınçlar **götürülür**; yalnız bu efektif basınçlar duvarı yükler.

Üniform sürşarj q (trafik, depo) her derinlikte efektif gerilmeye q ekler: diyagram $\sigma'_0 = qK_a$ ile başlar, her ordinat qK_a kadar artar: $\sigma'_2 = (q + \gamma L_1 + \gamma' L_2)K_a$.

Kazı tabanı altında q, tutulan tarafın düşey gerilmesinde kalır: net doğru daha büyük σ'_2'den başlar ve uçtaki pasif basınç qK_p kadar artar; kazı yüzü sürşarj taşımaz.

Sınırlı bir yük (şerit, nokta) sabit bir $K_a q$ eklemez: yanal basıncı yarı-sonsuz ortamdan alınır, rijit duvar için **ayna yöntemiyle iki katına** çıkarılır; modül net diyagramı sayısal integre eder.



Çözümlü örneğin net basınç diyagramı (modülün çizdiği biçim).

Soru

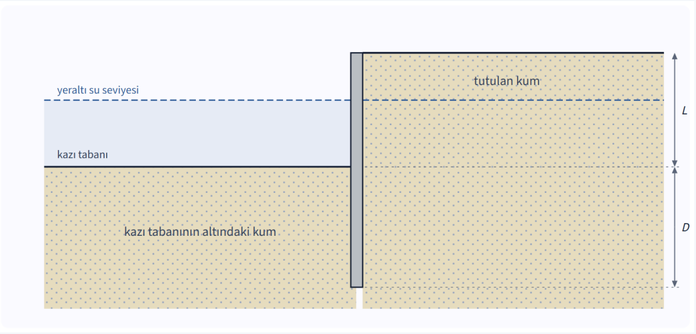
SORU

Verilenler

Zemin	**kum:** $\gamma = 15{,}9$, $\gamma_{sat} = 19{,}33$ **kN/m³,** $\varphi' = 32^\circ$ **(tutulan ve gömülü kısım aynı kum)**
Duvar	$L = 5$ **m; yeraltı suyu üstten** $L_1 = 2$ **m aşağıda, iki yüzde aynı seviyede; sürşarj yok**

İSTENEN

K_a, K_p, γ'; **σ'_1** ve **σ'_2** (kazı tabanında).



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Basınç katsayıları ve batık birim ağırlık

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0{,}3073} \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + 16^\circ) = \mathbf{3{,}2546}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 19{,}33 - 9{,}81 = 9{,}52\ \mathrm{kN/m^3}$$

2 Su seviyesinde ve kazı tabanında aktif basınç

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a = 15{,}9(2)(0{,}3073) = \mathbf{9{,}77}\ \mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2)\, K_a = (15{,}9(2) + 9{,}52(3))\,(0{,}3073)$$

$$\sigma'_v(L) = 60{,}36\ \mathrm{kPa} \ \Rightarrow\ \sigma'_2 = \mathbf{18{,}55}\ \mathrm{kPa}$$

Aktif basınç su seviyesinde **9,77 kPa**, kazı tabanında **18,55 kPa**; pasif katsayı K_p = 3,2546. Su altında batık birim ağırlık (γ′ = 9,52 kN/m³) kullanıldığı için basınç artışı yavaşlar.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Sıfır noktası E, P ve z̄, dördüncü derece denklem

KURAM

Kazı tabanı altında iki yüzde de zemin vardır; arkada aktif, önde pasif basınç ve pasif daha hızlı büyür: net basınç σ'_2'den başlar, derinlikle doğrusal azalır ve E noktasında sıfırlanır:

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'\,(K_p - K_a)} \qquad \sigma'_5 = \sigma'_v(L)K_p + \gamma' L_3(K_p - K_a)$$

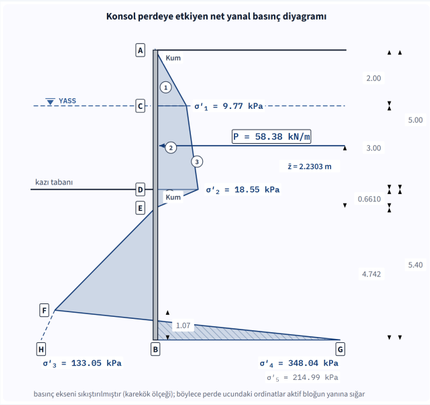
E'nin üstünde diyagramın bileşkesi **P** (alan), E'nin **z̄** üstünde etkir. L_4 = ucun E'nin altındaki derinliği; $\Sigma F_H = 0$ ve uca göre $\Sigma M = 0$ şartlarından:

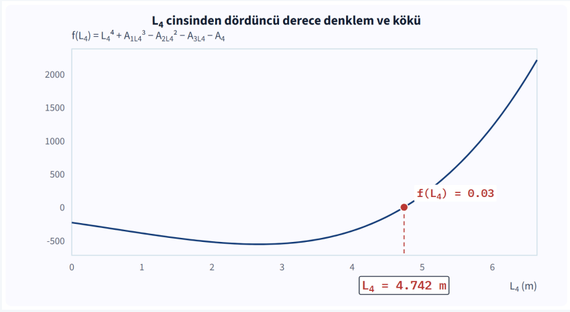
$$\sigma'_3 = L_4(K_p - K_a)\gamma' \quad \sigma'_4 = \sigma'_5 + \gamma' L_4(K_p - K_a) \quad L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4}$$

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 - A_2 L_4^2 - A_3 L_4 - A_4 = 0$$

$$A_1 = \frac{\sigma'_5}{m} \quad A_2 = \frac{8P}{m} \quad A_3 = \frac{6P\,(2\bar{z}m + \sigma'_5)}{m^2} \quad A_4 = \frac{P\,(6\bar{z}\sigma'_5 + 4P)}{m^2} \quad (m = \gamma'(K_p - K_a))$$

Teorik gömme derinliği **$D_{teorik} = L_3 + L_4$**: pasif direncin tam harekete geçtiği, hiç payın kalmadığı derinlik.





Soru

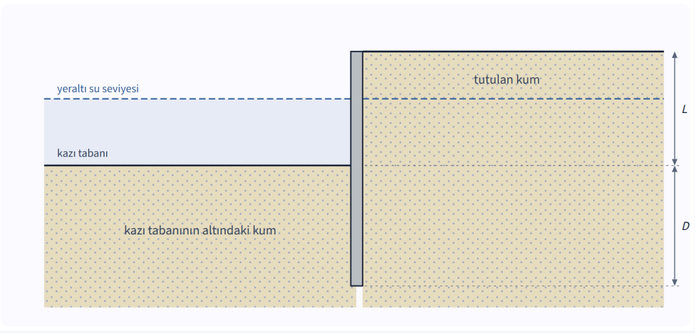
SORU

Verilenler

Verilenler	**Örnek 1'deki duvar:** $\sigma'_1 = 9{,}77$, $\sigma'_2 = 18{,}55$ **kPa;** $K_a = 0{,}3073$, $K_p = 3{,}2546$, $\gamma' = 9{,}52$ **kN/m³**

İSTENEN

Net basıncın sıfır noktası **L_3**; E'nin üstündeki diyagramın bileşkesi **P** ve kolu **z̄**.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Sıfır noktası

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'(K_p - K_a)} = \frac{18{,}55}{9{,}52(3{,}2546 - 0{,}3073)} = \frac{18{,}55}{28{,}059} = \mathbf{0{,}6610}\ \mathrm{m}$$

2 Aktif diyagramın parçaları (üstten E'ye): P = Σ alan, z̄ = Σ(alan × kol)/P

Parça	Şekil	Alan (kN/m)	E'ye kol (m)	Alan × kol
1	üçgen: 0–2 m	9,77	4,328	42,28
2	dikdörtgen: 2–5 m	29,31	2,161	63,34
3	üçgen: 2–5 m	13,16	1,661	21,86
4	üçgen: 5 m–E	6,13	0,441	2,70
Toplam		**58,38**		**130,19**

P = 58,38 kN/m; z̄ = 130,19 / 58,38 = **2,2303 m** (E'nin üstünde). Kazı tabanının 0,661 m altında net basınç sıfırlanır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

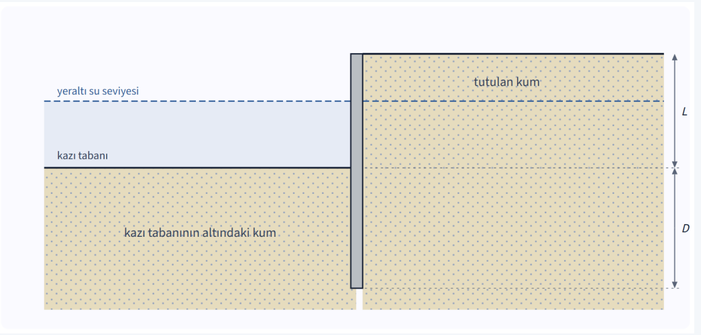
SORU

Verilenler

Verilenler	**Örnek 2:** $L_3 = 0{,}661$ **m,** $P = 58{,}38$ **kN/m,** $\bar{z} = 2{,}2303$ **m;** $\sigma'_v(L) = 60{,}36$ **kPa**
Katsayılar	$K_a = 0{,}3073$**,** $K_p = 3{,}2546$**,** $m = \gamma'(K_p - K_a) = 28{,}06$ **kN/m³**

İSTENEN

σ′$_5$, A$_1$…A$_4$; kök **L$_4$**; **D$_{teorik}$**; σ′$_3$, σ′$_4$, **L$_5$**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Uçtaki ordinat σ'_5 (tutulan tarafın pasifi + net doğru)

$$\sigma'_5 = \sigma'_v(L)K_p + \gamma' L_3(K_p - K_a) = 60{,}36(3{,}2546) + 28{,}059(0{,}6610) = \mathbf{214{,}99}\ \text{kPa}$$

2 Denklemin katsayıları

$$A_1 = \sigma'_5/m = 214{,}99/28{,}059 = 7{,}6623 \qquad A_2 = 8P/m = 8(58{,}38)/28{,}059 = 16{,}6439$$

$$A_3 = 6P\left(2\bar{z}m + \sigma'_5\right)/m^2 = 151{,}328 \qquad A_4 = P\left(6\bar{z}\sigma'_5 + 4P\right)/m^2 = 230{,}633$$

3 Pozitif kök (denklem sayısal çözülür; f = 0'ı sağlar)

$$L_4^4 + 7{,}662L_4^3 - 16{,}644L_4^2 - 151{,}33L_4 - 230{,}63 = 0$$

$$L_4 = \mathbf{4{,}742}\ \text{m} \qquad D_{teorik} = L_3 + L_4 = 0{,}6610 + 4{,}742 = \mathbf{5{,}40}\ \text{m}$$

Teorik gömme derinliği **D = 5,40 m** (kazı tabanından); L_4 = 4,742 m. Bu derinlikte pasif direnç tamamen harekete geçmiştir ve **hiç pay yoktur**.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

4 Uçtaki basınç bloğu

$$\sigma'_3 = L_4\, m = 4{,}742(28{,}059) = \mathbf{133{,}05}\ \mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_4 = \sigma'_5 + L_4 m = 214{,}99 + 133{,}05 = \mathbf{348{,}04}\ \mathrm{kPa}$$

$$L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4} = \frac{133{,}05(4{,}742) - 2(58{,}38)}{133{,}05 + 348{,}04} = \mathbf{1{,}0686}\ \mathrm{m}$$

Diyagram tamamlandı: E'den geçen net doğru, ucun **L_5 = 1,069 m** üstünde σ'_3 = 133,0 kPa'dan σ'_4 = 348,0 kPa'a dönen blok. Kontrol: dördüncü derece denklemin sol tarafı kökte yalnız 0,03 (ölçeğe göre sıfır).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Güvenlik payı eklemenin yolları

KURAM

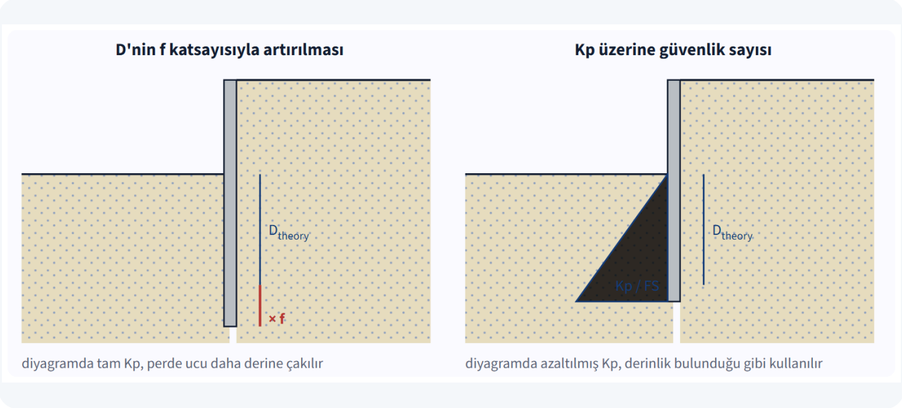
Teorik derinlikte pay yoktur. Kaynak iki yol önerir (yandaki şekil):

Derinliği artırmak: diyagram tam K_p ile kurulur, derinlik %20–30 artırılır: $D_{tasarım} = f \cdot D_{teorik}$, f = 1,2–1,3. Basınçlar ve moment teorik duvarınkidir.

K_p'ye güvenlik katsayısı: diyagram baştan K_p/FS_p (FS_p = 1,5–2) ile kurulur, çıkan derinlik olduğu gibi kullanılır. Kazı tabanı altındaki her ordinat değişir, **moment de büyür**.

Verilen derinlik: derinlik analizden değil mühendisten gelirse, seçilen yolun gerektirdiği derinlikle doğrulanır ($D_{verilen} \geq D_{tasarım,gerekli}$) ve harekete geçen güvenlik $FS_{p,mob}$ bulunur: K_p bu sayıya bölünürse diyagram verilen derinlikte tam dengededir.

$$D_{given} \geq D_{design,req} \qquad D(K_p/FS_{p,mob}) = D_{given}$$



Verilen derinlikte **iç kuvvetler** iki durum için çalışılır: gerekli derinlik durumu ve $K_p/FS_{p,mob}$ ile verilen derinlik dengesi. Verilenin momenti ötekinden büyük olabilir (uzun duvar, kısmen harekete geçmiş pasifle daha çok eğilir); palplanş **ikisinin büyüğüne** göre seçilir.

Soru

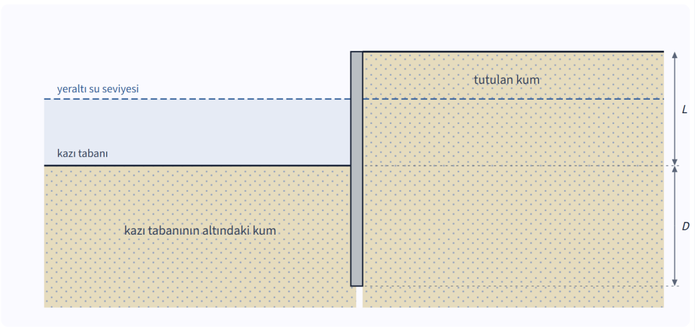
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1–3'teki duvar ($D_{teorik} = 5{,}40$ m, $M_{max} = 209{,}58$ kN·m/m)**
Yollar	**$f = 1{,}3$; $FS_p = 1{,}5$ ve $2{,}0$; verilen derinlik $6{,}0$ ve $8{,}0$ m; palplanş: $W_{el} = 1\,400$ cm³/m, S275 (EN 1993-1-1, $\gamma_F = 1{,}35$)**

İSTENEN

Her yolun **$D_{tasarım}$**, toplam boy, **M_{max}** ve palplanş kullanım oranı **η**.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 f yolu: $D_{tasarım} = 1{,}3 \times 5{,}403 = 7{,}023$ m (moment aynı)

Yol	$D_{tasarım}$ (m)	L + D (m)	M_{max} (kN·m/m)	η (EN 1993)	Not
f = 1,3 ($D = f \cdot D_{teorik}$)	7,02	12,02	209,58	0,735	moment teorik duvarınki
FS_p = 1,5 (K_p/1,5)	7,10	12,10	263,53	0,924	K_p = 2,170
FS_p = 2,0 (K_p/2)	8,84	13,84	325,91	1,143	**η > 1**
Verilen D = 6,0 m	6,00	11,00	227,74	0,799	D < 7,02: yetersiz; $FS_{p,mob}$ = 1,18
Verilen D = 8,0 m	8,00	13,00	294,92	1,034	D ≥ 7,02; $FS_{p,mob}$ = 1,76; **η > 1**

K_p/FS_p yolunda diyagram baştan zayıflatıldığı için derinlik (7,10 m) ve moment (263,5 kN·m/m) birlikte artar; FS_p = 2 ile moment 325,9 kN·m/m ve palplanş yetmez. **Verilen D = 8 m** tasarım derinliğinden uzun olsa da kısmen harekete geçen pasifle moment (294,9) **büyür**: derinliği artırmak her zaman momenti azaltmaz.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Kesmenin sıfır olduğu yer

KURAM

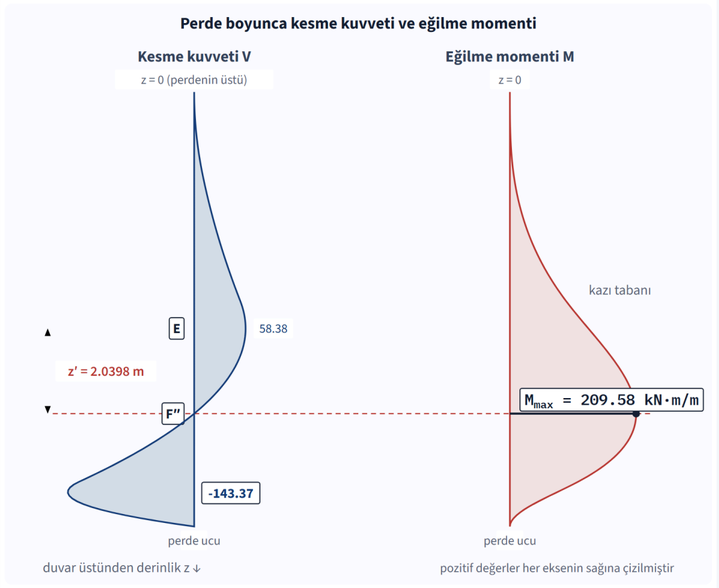
Eğilme momenti kesme kuvvetinin sıfır olduğu yerde en büyüktür. E'nin altında net pasif üçgen ½γ′(K_p − K_a)z′² büyür; P'yi E'nin **z′** altında dengeler:

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{\gamma'(K_p - K_a)}} \qquad M_{max} = P\,(\bar{z} + z') - \tfrac{1}{2}\gamma' z'^2\,(K_p - K_a)\,\frac{z'}{3}$$

Kesme E'de (net basınç sıfır) en büyük değerine ulaşır, z′ derinlikte sıfırdır; moment burada en büyüktür ve uçta sıfıra döner.

M_{max} teorik duvarın momentidir (f yolunda); K_p/FS_p yolunda diyagram zayıflatılmış K_p ile kurulduğu için M_{max} daha büyüktür.

Palplanş seçimi **S = M_{max}/σ_{izin}** ile (klasik) ya da sınır durum doğrulamasıyla (aşağıda EN 1993-1-1, AISC 360-22) yapılır.



Soru

SORU

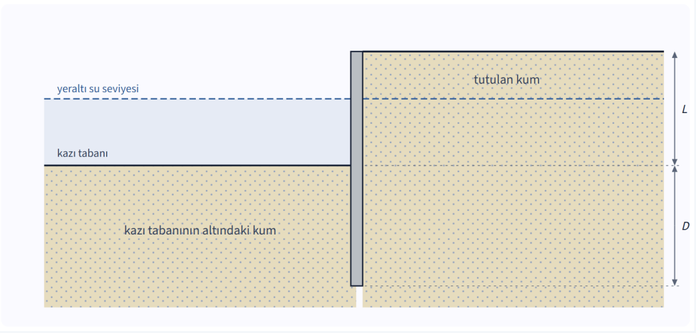
Verilenler

Verilenler

Örnek 2–3: $P = 58{,}38$ **kN/m,** $\bar{z} = 2{,}2303$ **m;** $m = \gamma'(K_p - K_a) = 28{,}06$ **kN/m³**

İSTENEN

Kesmenin sıfır olduğu derinlik **z′** (E'nin altında) ve $\mathbf{M_{max}}$; duvar tepesinden derinliği.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Kesmenin sıfır olduğu yer (E'nin altında)

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{m}} = \sqrt{\frac{2(58{,}38)}{28{,}059}} = \mathbf{2{,}0398}\ \mathrm{m}$$

2 En büyük moment

$$M_{max} = P(\bar{z} + z') - \tfrac{1}{6}\, m\, z'^3$$

$$= 58{,}38(2{,}2303 + 2{,}0398) - \tfrac{1}{6}(28{,}059)(2{,}0398)^3 = \mathbf{209{,}58}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

M_{max} = 209,58 kN·m/m, duvar tepesinden L + L_3 + z′ = 5 + 0,661 + 2,040 = **7,70 m** derinlikte. Palplanş bu momente göre seçilir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Aynı kurgu, farklı girdiler

KURAM

Su yok: aynı kurgu doğal birim ağırlıkla; $\sigma'_2 = \gamma L K_a$, $L_3 = \sigma'_2/(\gamma(K_p - K_a))$; denklemlerdeki her γ' yerine γ gelir, gömme denklemi aynı biçimini korur.

Üniform sürşarj q: her ordinat qK_a artar; net doğru büyük σ'_2'den başlar, uçtaki pasif qK_p kadar büyür (önceki bölüm).

İki yüzde farklı su seviyesi (kaynağın ötesinde): hidrostatik basınçlar götürülmez; sızma olmayan hâlde net su basıncı eklenir. Net doğru parçalıdır, E ve denge denklemleri diyagram üzerinde sayısal çözülür.

Eğimli tutulan yüzey (β, sonsuz): Rankine eğimli dolgu aktif katsayısının yatay bileşeni tutulan tarafta kullanılır; kazı tarafı ve uçtaki pasif düz yüzeyde kalır (güvenli taraf). $\beta \geq \varphi'$ için çözüm yoktur.

$$u_{net}(z) = \gamma_w(z - D_w) - \gamma_w(z - D_{w,exc}) \quad (\text{her terim} \geq 0)$$

$$p(z) = K_a \sigma'_{v,r}(z) - K_p \sigma'_{v,e}(z) + u_{net}(z)$$

$$K_{a,\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_{a,h} = K_{a,\beta}\cos\beta$$

Soru

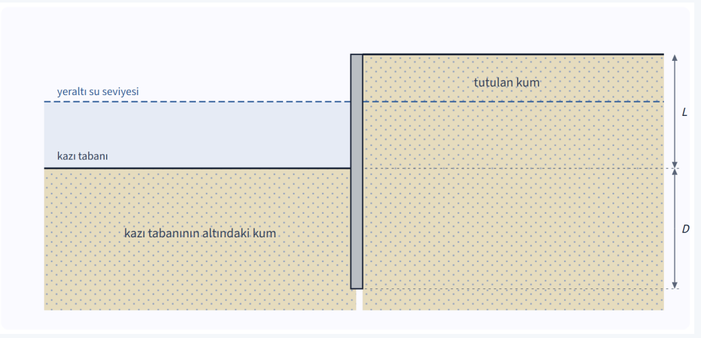
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1–5'teki duvar (f = 1,3; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m)**
Değişiklikler	**(a) su yok; (b) üniform sürşarj $q = 10$ kPa; (c) ön yüzde su $z = 6$ m'de (kazı kuru, arkada 2 m); (d) tutulan yüzey $\beta = 15°$ eğimli**

İSTENEN

Her durum için **L_3**, P, **D_{teorik}**, $D_{tasarım}$, **M_{max}**, η; su yoksa elle doğrulama.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Su yok (elle): $\sigma'_2 = \gamma L K_a$, $L_3 = \sigma'_2/(\gamma(K_p - K_a))$

$$\sigma'_2 = 15{,}9(5)(0{,}3073) = 24{,}43\ \text{kPa} \qquad L_3 = \frac{24{,}43}{15{,}9(3{,}2546 - 0{,}3073)} = \mathbf{0{,}521}\ \text{m}$$

2 Beş durumun özeti (diğerleri modülün aynı yöntemle çözümüdür)

Durum	L_3 (m)	P (kN/m)	D_{teorik} (m)	$D_{tasarım}$ (m)	M_{max} (kN·m/m)	η (EN 1993)
Açılış (su 2 m, iki yüzde aynı)	0,661	58,38	5,40	7,02	209,6	0,735
(a) Su yok	0,521	67,43	4,53	5,89	212,1	0,744
(b) Sürşarj q = 10 kPa	0,770	75,94	6,15	7,99	305,5	**1,071**
(c) Ön yüzde su z = 6 m	1,319	126,29	8,00	10,39	543,8	**1,907**
(d) Eğimli yüzey β = 15°	0,713	63,00	5,64	7,33	232,1	0,814

Su yoksa γ′ yerine γ gelir: sıfır noktası yaklaşır, gömme 4,53 m'ye **azalır**. **Sürşarj** D'yi 6,15 m'ye, momenti 306 kN·m/m'ye çıkarır (η > 1); **farklı su seviyesi** en kötüsüdür: M = 544 kN·m/m (P = 126 kN/m). Eğim β = 15°: $K_{a,h}$ = 0,3289 (düz: 0,3073).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

EN 1993-1-1 ve AISC 360-22

KURAM

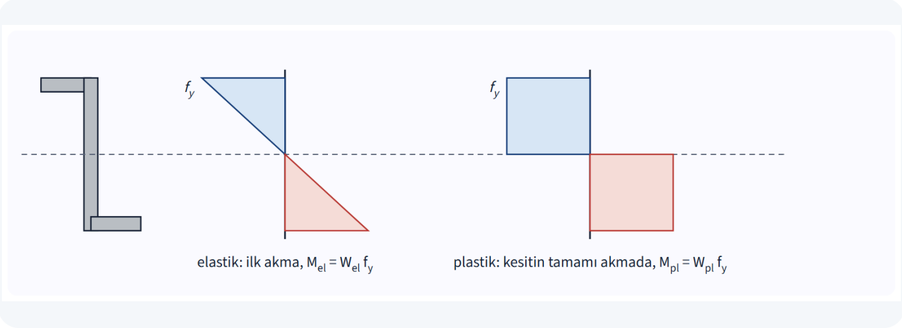
Klasik yol: S = M_{max}/σ_{izin}. Modül bunu sınır durum doğrulamasıyla değiştirir; net basınç diyagramının momenti karakteristik bir etkidir, kısmi katsayı onu tasarım değerine çıkarır:

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \quad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} \quad M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \quad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1$$

Tabloda iki mukavemet momenti vardır: **W_{el}** ilk akmaya kadar (sınıf 3'e kadar geçerli), **W_{pl}** tam plastik momente (sınıf 1–2). Gömme derinliğinin payı çelik koduyla ayrıca çarpılmaz.

$$\text{LRFD: } M_u = \gamma_H M_{max} \le \phi_b M_n,\ \phi_b = 0{,}90 \qquad \text{ASD: } M_a = M_{max} \le \frac{M_n}{\Omega_b},\ \Omega_b = 1{,}67$$

$M_n = F_y Z$ (kompakt kesit) ya da ilk akmada $F_y S$. Zemin basıncı yanal toprak basıncı H sayılır: LRFD birleşiminde γ_H = 1,6, ASD'de 1,0.



Soru

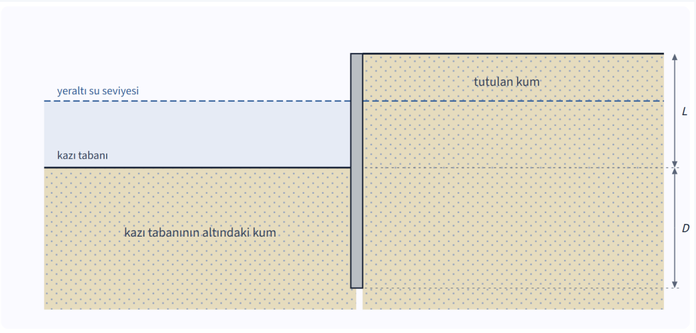
SORU

Verilenler

Kesit	**S275 ($f_y = 275$ MPa); elastik mukavemet momenti $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Moment	**Örnek 5: $M_{max} = 209{,}58$ kN·m/m; EN 1993-1-1: $\gamma_F = 1{,}35$, $\gamma_{M0} = 1{,}00$; AISC: $\gamma_H = 1{,}6$, $\Omega_b = 1{,}67$ ($M_n = F_y S$)**

İSTENEN

EN 1993-1-1 için **M_{Ed}**, **W_{req}**, $M_{c,Rd}$, **η**; AISC LRFD ve ASD için η.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 EN 1993-1-1

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} = 1{,}35(209{,}58) = \mathbf{282{,}93}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

$$W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} = \frac{282{,}93(1{,}00)}{275\,000} = \mathbf{1\,028{,}8}\ \mathrm{cm^3/m}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = 1\,400 \cdot 10^{-6}(275\,000) = 385{,}00\ \mathrm{kN\cdot m/m} \qquad \eta = \frac{282{,}93}{385{,}00} = \mathbf{0{,}735} \le 1\ \checkmark$$

Seçilen palplanş EN 1993-1-1'e göre yeterlidir: η = **0,735**; gereken W = 1 029 cm³/m < 1 400 cm³/m. Tabloda W_{pl} yazılı ve kesit sınıf 1–2 ise plastik moment kullanılabilir (W_{pl} = 1 650 cm³/m varsayımıyla η = 0,624).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

1 AISC 360-22: nominal eğilme dayanımı $M_n = F_y S = 275\,000\,(1\,400 \cdot 10^{-6}) = 385{,}0$ kN·m/m

$$\text{LRFD: } M_u = 1{,}6(209{,}58) = 335{,}32\ \text{kN·m/m} \le \phi_b M_n = 0{,}90(385{,}0) = 346{,}5 \quad \eta = \mathbf{0{,}968}$$

$$\text{ASD: } M_a = 209{,}58\ \text{kN·m/m} \le \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{385{,}0}{1{,}67} = 230{,}5 \quad \eta = \mathbf{0{,}909}$$

AISC ile de yeterli: LRFD η = **0,968** (ilk akma), ASD η = **0,909**. Aynı moment EN 1993-1-1'de 0,735, LRFD'de 0,968 kullanım oranı verir: kodlar farklı güvenlik felsefesi kullandığından oranlar farklıdır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Yarı-statik Mononobe–Okabe kurgusu

KURAM

Deprem, zemin kamalarına sabit atalet kuvvetleri ($k_h W$ yatay, $k_v W$ düşey) ekleyerek statik limit denge kurgusunu korur. Düşey duvar, yatay yüzey, duvar sürtünmesi yok (statik Rankine tasarımıyla aynı idealleştirme):

$$\tan\theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin\varphi' \sin(\varphi' - \theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad K_{PE} = \ldots \left[1 - \sqrt{\ldots}\right]^2$$

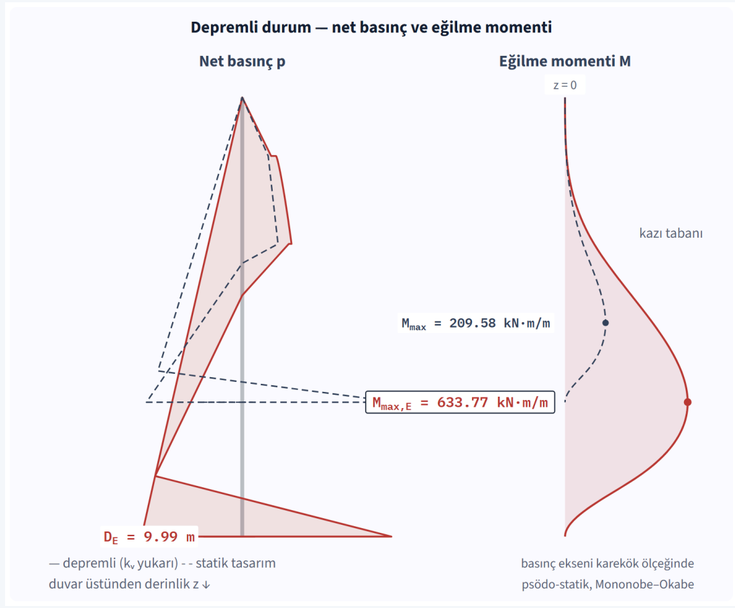
$$\text{su altında:} \quad \tan\theta_w = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \cdot \frac{k_h}{1 \mp k_v}$$

Basınçlar $(1 \mp k_v)K_{AE}\sigma'_v$ ve $(1 \mp k_v)K_{PE}\sigma'_v$; **$k_v$'nin iki yönü** de kontrol edilir. θ = 0'da K_a ve K_p; θ > φ′ ise denge kaması yoktur.

Orta geçirgenlikli kumda boşluk suyu zeminle birlikte hareket eder (**kısıtlı**): atalet doygun kütledir, açı büyür. Kazıda serbest su varsa Westergaard hidrodinamik basıncı (ters yönde) eklenir.

Kontrol: net basınç diyagramı statik gibi kurulur; iki denge denklemi **D_E** verir. Deprem kazaya bağlı durumdur, K_{PE}'ye katsayı konmaz: duvar **$D_E \le D_{tasarım}$** ise dayanır. Konsolda sismik basınçlar statikler gibi, efektif gerilmeyle orantılı dağıtılır.

Sismik birleşimde etkiler 1,0 ile alınır: $M_{Ed,E} = M_{max,E}$.



Soru

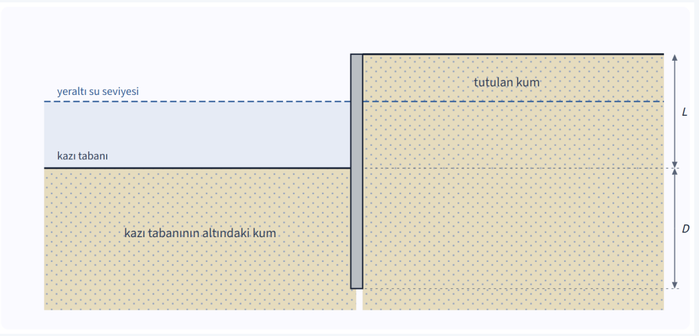
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1–5'teki duvar: $D_{tasarım} = 7{,}02$ m, $M_{max} = 209{,}58$ kN·m/m; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Deprem	**$k_h = 0{,}15$, $k_v = \pm 0{,}075$ (iki yön); boşluk suyu kısıtlı; kazıda 3 m serbest su**

İSTENEN

Sismik açılar ve katsayılar; **D_E** (iki k_V yönü), **$M_{max,E}$**; statik duvar bu depreme dayanır mı?



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Sismik açılar ve katsayılar ($\varphi' = 32°$; statik $K_a = 0{,}3073$, $K_p = 3{,}2546$)

$$\tan\theta = 0{,}15/(1-0{,}075) = 0{,}1622 \;\Rightarrow\; \theta = 9{,}21^\circ$$

$$\tan\theta_w = \frac{19{,}33}{19{,}33-9{,}81}(0{,}1622) = 0{,}3293 \;\Rightarrow\; \theta_w = 18{,}22^\circ$$

k_v	$f_v = 1 - k_v$	θ (üstte)	θ_w (suda)	K_{AE} / K_{PE} (üstte)	K_{AE} / K_{PE} (suda)
+0,075	0,925	9,21°	18,22°	0,411 / 2,948	0,562 / 2,589
−0,075	1,075	7,94°	15,82°	0,395 / 2,992	0,514 / 2,693

Su altında açı daha büyüktür (atalet doygun kütlede): K_{AE} 0,411'ten 0,562'e çıkar, K_{PE} 2,948'ten 2,589'e düşer; aktif basınç artar, pasif direnç azalır.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Sismik net basınç diyagramı ve gömme derinliği D_E

Durum	L_3 (m)	D_E / D_{teorik} (m)	M_{max} (kN·m/m)	D ≤ 7,02?
Statik (f = 1,3)	0,661	— / 5,40	209,58	$D_{tasarım}$ = 7,02
Deprem, k_v = +0,075	1,756	9,987	**633,77**	**Hayır**
Deprem, k_v = −0,075	1,497	8,988	603,87	**Hayır**

3 Kesit ve sonuç

$$W_{req,E} = \frac{M_{Ed,E}}{f_y} = \frac{633{,}77}{275\,000} = 2\,305\ \text{cm}^3/\text{m} \ > \ 1\,400 \qquad \eta_E = \mathbf{1{,}646} \ > 1 \ \ X$$

Statik duvar bu depreme **dayanmaz**: sismik diyagram ucu **2,96 m** daha derine (D_E = 9,99 > 7,02 m) ve statiğin **3,0 katı moment** (633,8 kN·m/m) ister; palplanş da yetmez (η_E = 1,65). Deprem birleşimi için gömme boyu ve kesit birlikte büyütülmelidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Yatak katsayısı yöntemi: yaylı zeminde elastik kiriş

KURAM

Limit denge gömme derinliğini ve momenti verir, ama duvarın **ne kadar yer değiştirdiğini** vermez (pasif direncin tam harekete geçtiği göçme anını anlatır). Çalışma durumundaki yerdeğiştirme için duvar elastik bir kiriş (EI), her yüzde zemin bağımsız yaylar (Winkler) olarak alınır:

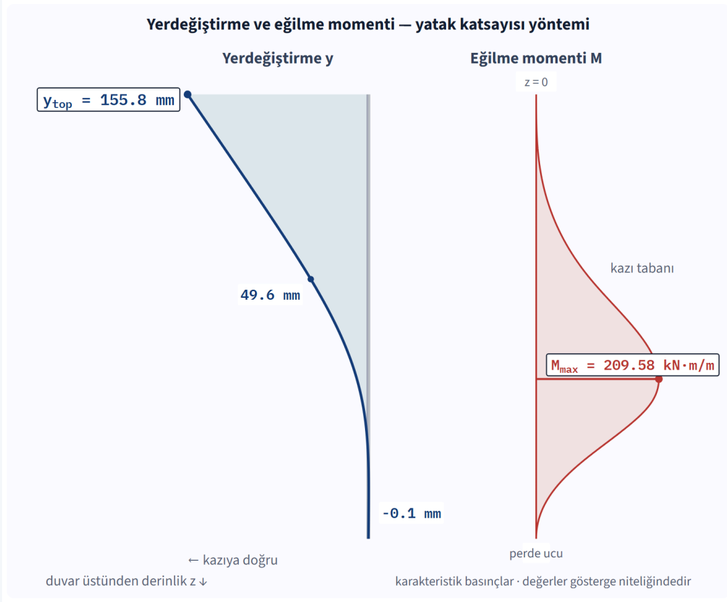
$$EI\frac{d^4y}{dz^4} = p_R(z) - p_E(z) + u_{net}(z)$$

$$p_R = K_0\sigma'_{v,r} - k_h y \;\; (K_a\sigma'_{v,r} \le p_R \le K_p\sigma'_{v,r}) \qquad p_E = K_0\sigma'_{v,e} + k_h y \;\; (\ldots) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

Yaylar sükunet basıncından başlar, yerdeğiştirmeyle orantılı değişir, aktif ve pasif sınırı geçmez. k_h zemin özelliğinden çok **model parametresidir**; kum için yönlendirici değerler: gevşek 4,8–16, orta sıkı 9,6–80, sıkı 64–128 MN/m³.

Duvar tasarım boyundadır (L + $D_{tasarım}$), iki ucu serbest; basınçlar karakteristik: tam Rankine K_p, güvenlik katsayısı yok; K_0 Jaky (1944). Duvar kazıdan önce yerindedir, kazı tek aşamadır.

Denklem kiriş sonlu elemanlarıyla, yaylar elastik/aktif/pasif duruma gelene kadar yinelenerek çözülür; sonuç **limitsiz bir tahmin** olarak verilir.



Soru

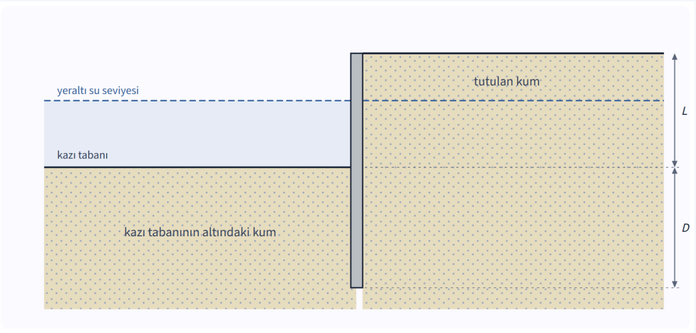
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1–5'teki duvar, tasarım boyu $L + D = 12{,}02$ m**
Palplanş	**$I = 21\,000$ cm⁴/m, $E = 210\,000$ MPa ($EI = 44\,100$ kN·m²/m)**
Zemin	**$k_h = 20$ MN/m³ (iki yüzde); $K_0 = 1 - \sin 32^\circ$; kazı tek aşamada**

İSTENEN

Duvar tepesinde, kazı tabanında ve uçta **yerdeğiştirme**; modelin en büyük momenti limit denge momentiyle uyuşuyor mu?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Sükunet katsayısı ve model

$$K_0 = 1 - \sin 32^\circ = 0{,}4701 \qquad EI = 210\,000\,000(21\,000 \cdot 10^{-8}) = 44\,100\ \mathrm{kN\cdot m^2/m}$$

$$EI\,y^{IV} = p_R - p_E \ \ (\text{sonlu eleman, yaylar elastik/aktif/pasif})$$

2 Sonuç (kazıya doğru, mm)

$$y_{üst} = \mathbf{155{,}8}\ \mathrm{mm} \qquad y_{kazı\ tabanı} = \mathbf{49{,}6}\ \mathrm{mm} \qquad y_{uç} = -0{,}1\ \mathrm{mm}$$

$$M_{max}^{model} = 209{,}58\ \mathrm{kN\cdot m/m}\ \ (z = 7{,}70\ \mathrm{m}) \ \approx\ M_{max}^{limit\ denge} = 209{,}58$$

Duvar tepesi kazıya doğru **155,8 mm**, kazı tabanında 49,6 mm kayar; uç neredeyse yerinde kalır (-0,1 mm) — duvar uca yakın bir noktadan döner. Modelin momenti (209,58) limit denge momentiyle (209,58) aynıdır: arkada aktif, önde pasif basınç, moment oluşan yüksekliğin tamamında sınırlarındadır. Yaylarda pasif direncin %40 kadarı kullanılmıştır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Çözümün kapsamı

KURAM

Rankine basınçları, duvar sürtünmesi olmadan, efektif düşey gerilme üzerinden; profil baştan sona kum (her sayıda tabaka); kil gömme ayrı bir modüldür. Gömülü kısımda tek kum için kaynağın kapalı çözümü, birden çok kum için aynı diyagram sayısal çözülür.

Kaynağın basitleştirilmiş net basınç diyagramı: E'den geçen tek doğru ve uç bloğu; dönme noktası O daha kesin aranmaz. Su iki yüzde aynı seviyede ya da farklı (sızmasız); sızma ve pasif dirence etkisi modellenmez.

Gömme derinliği kendi yolunun payını taşır (f ya da FS_p), çelik koduyla yeniden çarpılmaz. Palplanş eğilmede verilen mukavemet momentiyle doğrulanır; kesme, yerel burkulma ve korozyon kaybı kontrol edilmez.

Yerdeğiştirme yatak katsayısı yöntemiyle, karakteristik basınçlarla, limitsiz verilir; duvar arkasındaki oturma hesaplanmaz.

Konsol duvar D ≈ 1,5–2 L'nin ötesinde nadiren ekonomiktir; teorik gömme 3L'yi aşarsa modül uyarır. Ankrajlı duvar, farklı bir modülde (ayrı sunum) işlenir.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Konsol palplanş kazı tabanı altındaki pasif dirençle ayakta kalır; kazı tabanı üstünde aktif, altında net basınç: σ'_2'den başlayıp E'de sıfırlanan doğru ($L_3 = \sigma'_2/(\gamma'(K_p - K_a))$) ve uçta L_5 bloğu

Denge: P, $\bar{z}$ ve $\Sigma F_H = 0$, $\Sigma M = 0 \rightarrow L_4$ için dördüncü derece denklem; $\mathbf{D_{teorik} = L_3 + L_4}$ (örnek: 5,40 m)

Pay: f = 1,2–1,3 ile D (örnek: 7,02 m, moment aynı) ya da K_p/FS_p (derinlik ve moment büyür); verilen derinlikte $FS_{p,mob}$ ve **iki kuvvet durumunun büyüğü**

$\mathbf{M_{max}}$ kesmenin sıfır olduğu yerde: $z' = \sqrt{(2P/m)}$, $M_{max} = P(\bar{z} + z') - m\, z'^3/6$ (örnek: 209,58 kN·m/m)

Su, sürşarj, eğim: su yoksa $\gamma' \rightarrow \gamma$; q her ordinatı qK_a artırır; farklı su seviyesi ve sürşarj D ve M'yi çok büyütür

Kesit: EN 1993-1-1 $M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \leq W f_y/\gamma_{M0}$ ($\eta = 0{,}735$); AISC LRFD/ASD (0,968 / 0,909)

Deprem: K_{AE}, K_{PE}, θ_w; $D_E \leq D_{tasarım}$ aranır: örnek duvar dayanmaz (D_E = 9,99 m, M = 634 kN·m/m)

Yerdeğiştirme: yaylı zeminde elastik kiriş; örnekte tepe ≈ 156 mm, uç ≈ 0

Kaynaklar

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning.

EN 1993-1-1:2005 — Çelik yapıların tasarımı, genel kurallar.

ANSI/AISC 360-22 — Specification for Structural Steel Buildings.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressure during earthquakes. World Engineering Congress, Tokyo. Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 12(1).

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98, 418–433.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül sayfasındaki adım adım örnek de bu duvardır (L = 5 m, γ = 15,9; γ_{sat} = 19,33 kN/m³, φ′ = 32°, su 2 m).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın yüksekliğini, tabakalı kum profilini, suyunu, sürşarjını, palplanş kesitini ve deprem katsayılarını GeoTerva'da girin; modül basınç diyagramını, gömme derinliğini, momenti, kesit kontrolünü ve yerdeğiştirmeyi birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com