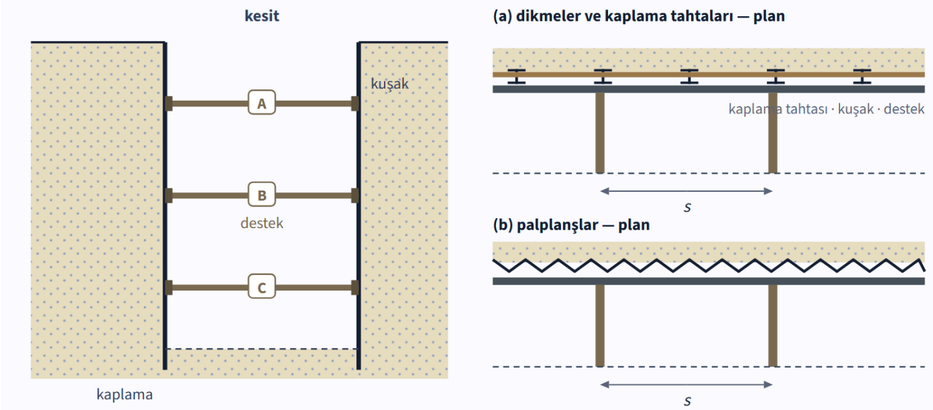
Geoteknik ders sunumu · Palplanş ve destekli kazılar

Kilde destekli (payandalı) kazı

Ders anlatımı: kilde destekli (payandalı) kazı; kil zarfları, çekme çatlağı, destek yükleri, palplanş ve kuşak boyutlandırma, çelik doğrulaması ve taban kabarması; her konuda çözümlü örnek.

Kazı destekleme · Peck zarfı (kil) · Çekme çatlağı · ilk destek · Destek · kuşak · palplanş · Taban kabarması



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Destekli kazıda basıncın **neden Rankine olmadığını** ve **zarfların** ölçülen yüklerden nasıl yapıldığını
- Kilin **γH/c kararlılık sayısıyla** iki zarfı: yumuşak–orta kil (γH/c > 4) ve sert kil (≤ 4)
- **Sürşarjın** ayrı basınç olarak eklenmesini, kilde suyun yalnız birim ağırlığı değiştirmesini; **çekme çatlağı $z_c = 2c/\gamma$** ve ilk destek
- Zarftan **destek yüklerini** (mafsallı parçalar), **palplanş** ve **kuşak** boyutlandırmasını
- Çeliği **EN 1993-1-1 ve AISC 360-22** ile doğrulamayı
- Kilde kazı tabanının **taban kabarması** kontrolünü (Terzaghi sütunu, Chang'ın düzeltmesi)

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

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

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Örnek kazı: kil (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, φ = 0), derinlik H = 7,00 m, genişlik B = 6,00 m; destekler 1,00 · 3,50 · 6,00 m derinlikte, yatay aralık s = 3,00 m. Kuvvetler duvarın metresi içindir (destek yükleri s ile çarpılmış).

Destekleme sistemi ve elemanları

KURAM

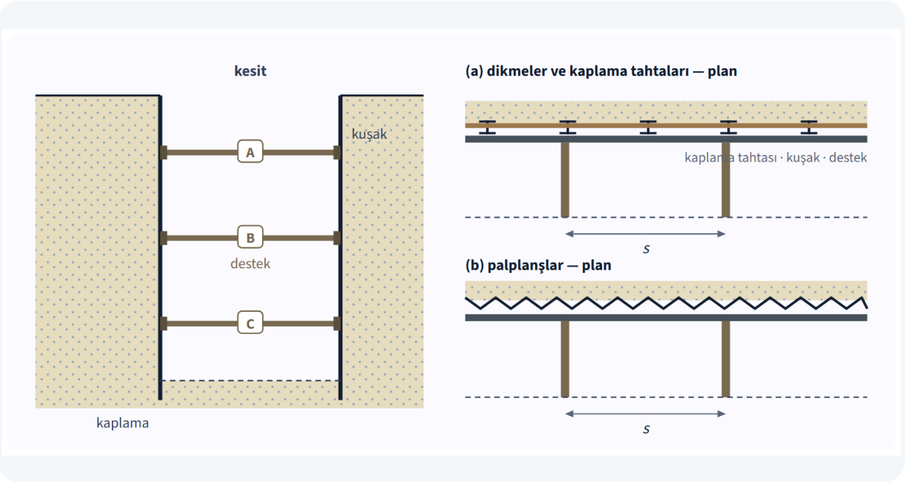
Düşey cepheli derin kazılar (şehir içi bodrum, aç-kapa tünel) geçici bir **destekleme sistemiyle** açık tutulur. İki düzen yaygındır: önceden çakılan **düşey kazıklar** (çelik ya da ahşap) arasına kazı ilerledikçe yatay ahşap kaplama konur; ya da birbirine kenetlenen **palplanşlar** sürekli bir duvar oluşturur.

Her destek seviyesinde kazı o seviyeye indiği anda yatay **kuşaklar** (wale) yerleştirilir; **destekler** (strut) kuşaktan kuşağa kazıyı kesen, basınç taşıyan yatay çelik elemanlardır.

Eleman seçmek için destekleme sisteminin alacağı yanal basınç gerekir. Kuram toplam itkiyi verir, **dağılımını** vermez: dağılım zemine, işin sırasına ve hızına, ekibe ve ekipmana bağlıdır.

Tasarım basınçları bu yüzden **ampirik zarflardır**: gerçek kazılarda ölçülen destek yüklerinden geri hesaplanan basınçların çevresine çizilir.

Destek aralığı yapımda düşeyde en az yaklaşık 2,75 m olmalıdır.



Duvar üstünden döner

KURAM

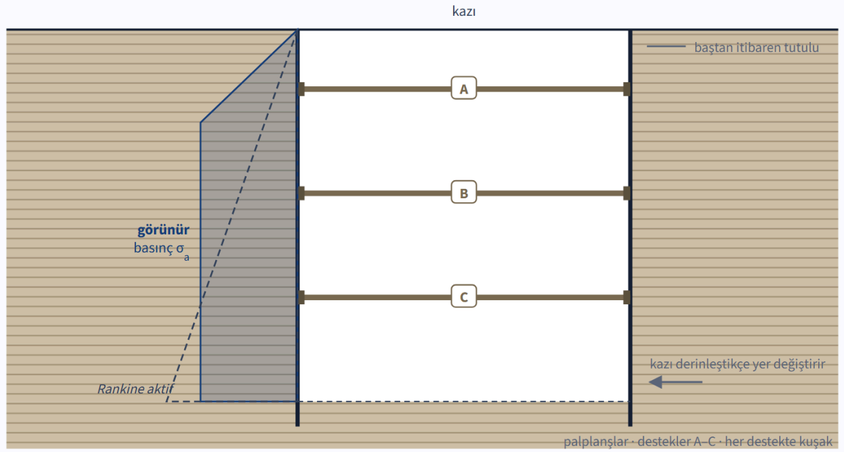
Konsol istinat duvarı tabanından döner ve Rankine aktif basıncı (üstte sıfır, altta en büyük) onu iyi anlatır. **Destekli duvar tersine hareket eder**: ilk destek kazı sığken konur, üst kısım neredeyse hiç kıpırdamaz; sonraki her kademe destek takılmadan önce kazılır ve aradaki süre derinlikle uzar, duvar giderek daha aşağıdan eğilir: kazı bittiğinde **üstünden dönmüştür**.

Üstte basınç **sükunet değerine** yakın kalır (zemin çok az hareket etmiştir).

Altta basınç Rankine aktif değerinin altına düşebilir (zemin plastik dengeyi çoktan aşmıştır).

Bileşke itki P_a, üçgenin üçte birinden **daha yukarıda** etkir: tabandan n_aH yükseklikte, $n_a > 1/3$.

Toplam itki logaritmik spiral kamasıyla bulunur ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$); granüler zeminde Coulomb'un değerinin %15–20 üstündedir. Ama dağılımı ve n_a zemine ve şantiyeye bağlı olduğundan kazılar **zarflarla** tasarlanır.



Zarflar nasıl yapıldı?

KURAM

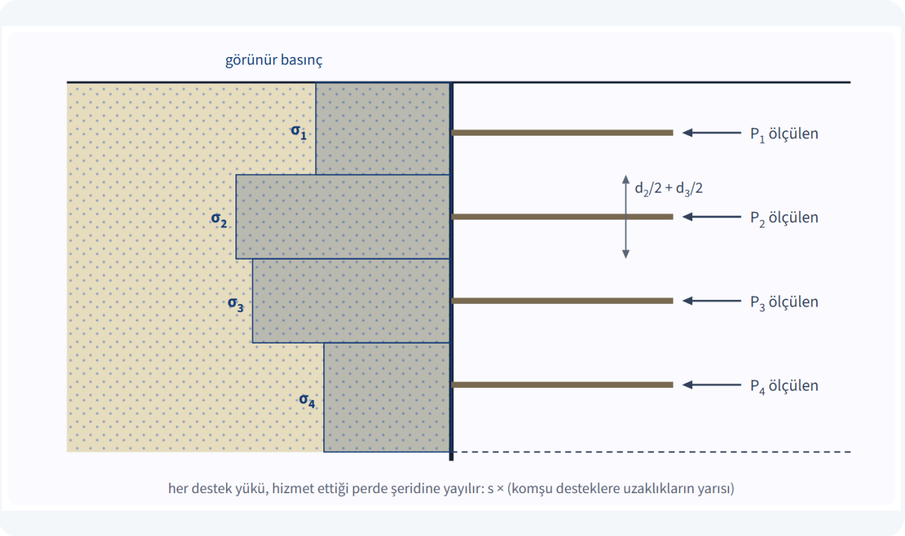
Basınç yerden yere değişir ve her destek karşılaşabileceği **en büyük yüke** göre boyutlanmalıdır. Zarflar bunun için kurulur: araçlı bir kazıda her desteğin yükü ölçülür, desteğin tuttuğu perde şeridine bölünür (yatay aralık s × üstteki ve alttaki desteğe uzaklıkların yarısı) ve bu bant üzerinde **görünür basınca** çevrilir:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 ilk desteğin derinliği, d_i sonraki destekler arası uzaklıklardır. Kazı kazı üst üste çizilen tüm diyagramların çevresi bir **görünür basınç zarfıdır**.

Peck zarfları Berlin, Münih ve New York metro kazılarında ölçülen kum yüklerinden; yumuşak–orta ve sert killer için aynı yöntemle kurdu.

Zarf, duvara herhangi bir anda etkiyen basınç **değildir**: bir destek için ondan alınan yük, ölçülen yüklerin güvenli tarafında kalacak biçimde çizilmiştir.



Yumuşak–orta ya da sert: γH/c

KURAM

Kilde zarfın biçimi **kararlılık sayısı γH/c** ile belirlenir (c drenajsız kohezyon, φ = 0). γH/c > 4 olan **yumuşak–orta kil**, kazıyla dayanımının çok ötesinde çalıştırılır:

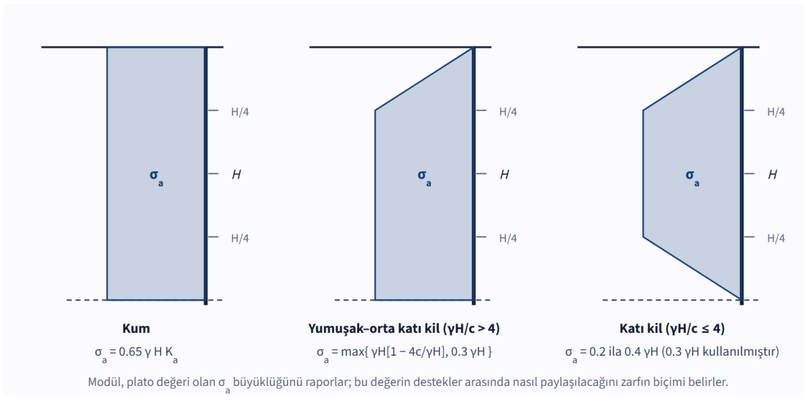
$$\frac{\gamma H}{c} > 4: \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0{,}3\gamma H\right)$$

Zarf yüzeyde sıfırdır, üst çeyrekte doğrusal artar, tabana kadar sabit kalır; iki ifadenin büyüğü belirler. **Sert kil** elastik aralığına daha yakındır:

$$\frac{\gamma H}{c} \le 4: \quad \sigma_a = 0{,}2\gamma H \text{ ile } 0{,}4\gamma H \ \ (\text{ortalama } 0{,}3\gamma H)$$

Sert kilde zarf üst çeyrekte artar, orta yarıda sabittir, alt çeyrekte sıfıra döner. Koşullar kum zarfındakilerle aynıdır (≳ 6 m derinlik, su taban altında, kil drenajsız).

Kazı birkaç kilden geçerse kaynak bunları kalınlıkla ortalar: $c_{av} = \Sigma c_i H_i / H$, $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i / H$, sonra kil zarfları ortalamalarla kullanılır.



Soru

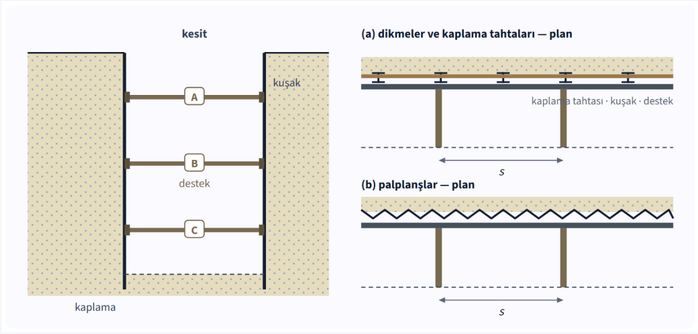
SORU

Verilenler

Açılış kazısı	$H = 7{,}0$ **m,** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c = 35$ **kPa**
Daha yumuşak kil	**aynı kazı,** $c = 20$ **kPa**

İSTENEN

Her iki kil için **γH/c**, zarfın türü ve σ_a.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Açılış kili (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3{,}60} \leq 4 \Rightarrow \text{sert kil}$$

$$\sigma_a = 0{,}3\gamma H = 0{,}3(18)(7) = \mathbf{37{,}80}\ \text{kPa}$$

2 Daha yumuşak kil (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6{,}30} > 4 \Rightarrow \text{yumuşak–orta kil}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0{,}635) = \mathbf{46{,}00}\ \text{kPa} \geq 0{,}3\gamma H = 37{,}8$$

Açılış kili sert sayılır: σ_a = **37,80 kPa** (en büyük destek yükü P = 271,3 kN). Kohezyon 20 kPa'a düşünce kazı yumuşak–orta kil davranışına geçer: σ_a = **46,0 kPa** ve zarfın tabanı sabit plato olur (P = 338,1 kN).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Zarfın yanına; birim ağırlıkla; ilk desteğin yeri

KURAM

Sürşarj q zarfa katılmaz (ampirik katsayılar ona da uygulanırdı); tüm yükseklikte kendi üniform basıncı olarak taşınır, drenajsız kilde $K_a = 1$: $\Delta p_q = q$.

Su: kil zarfları drenajsız, toplam gerilme kurgularıdır; killeki su zaten birim ağırlığın ve drenajsız dayanımın içindedir. Taban üstündeki su çizilir ve not edilir, ayrı yük olarak eklenmez; tek değiştirdiği zemin ağırlığıdır: su altında doygun birim ağırlık, suyun kestiği tabakada iki değerin kalınlık ortalaması $\gamma = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

Çekme çatlağı: kil yüzü, çekme çatlağının kapandığı derinliğe kadar desteksiz durabilir (kohezyonlu Rankine aktif basıncının sıfır olduğu derinlik). $\varphi = 0$'da $K_a = 1$; ilk destek bu derinliğin **üstüne** konmalıdır, ki perde kilin tutamayacağı açık yüze dayanmasın.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ (\text{sürşarj q})$$



çatlak derinliğinin üstünde yüz, kilde bulunmayan bir çekme dayanımıyla tutulmak zorunda kalırdı

Soru

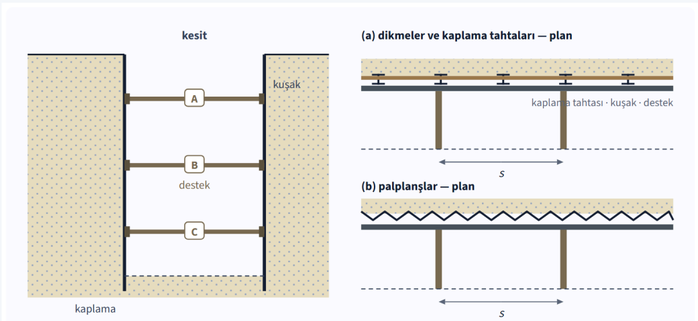
SORU

Verilenler

Kazı	**Örnek 1'deki açılış kazısı ($H = 7$ m, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, $c = 35$ kPa); ilk destek $z = 1{,}0$ m**
Durumlar	**(a) q = 0, su yok; (b) sürşarj $q = 10$ kPa; (c) yeraltı suyu $z_w = 3$ m**

İSTENEN

z_c, ilk desteğin yeri uygun mu; (c)'de **$\bar{\gamma}$** ve **$\bar{\gamma}H/c$**; her durumda toplam yük R ve en büyük destek yükü.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Çekme çatlağı ve ilk destek

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3{,}889\ \mathrm{m}} > 1{,}00\ \mathrm{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3{,}333\ \mathrm{m}\ \ (q = 10\ \mathrm{kPa})$$

İlk destek (z = 1,0 m) çatlak derinliğinin (3,89 m) çok üstündedir: uygun. Sürşarjla çatlak 3,33 m'ye iner.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Su (c): $\bar{\gamma} = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$; üç durumun özeti

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18{,}571\ \text{kN/m}^3 \qquad \frac{\bar{\gamma} H}{c} = \frac{18{,}571(7)}{35} = 3{,}714$$

$$\sigma_a = 0{,}3\bar{\gamma} H = 39{,}00\ \text{kPa}$$

Durum	γH/c	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) q = 0, su yok	3,60	37,80	3,89	198,4	271,3
(b) q = 10 kPa	3,60	37,80	3,33	268,4	334,3
(c) su z_w = 3 m	3,71	39,00	—	204,8	279,8

Sürşarj yalnız $\Delta p_q = q = 10$ kPa ekler (R 198,4 → 268,4 kN/m); su yalnız $\bar{\gamma}$'yü 18,57 kN/m³'e çıkarır (σ_a 37,8 → 39,0 kPa).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Zarftan destek yüklerine

KURAM

Destekler yatay kolonlardır: basıncı eksenleri boyunca taşır, kendi ağırlıklarıyla eğilir; kapasite narinliğe bağlıdır, geniş kazılarda ek gerekebilir. Kaynak yük için basit ve tutucu bir yöntem verir:

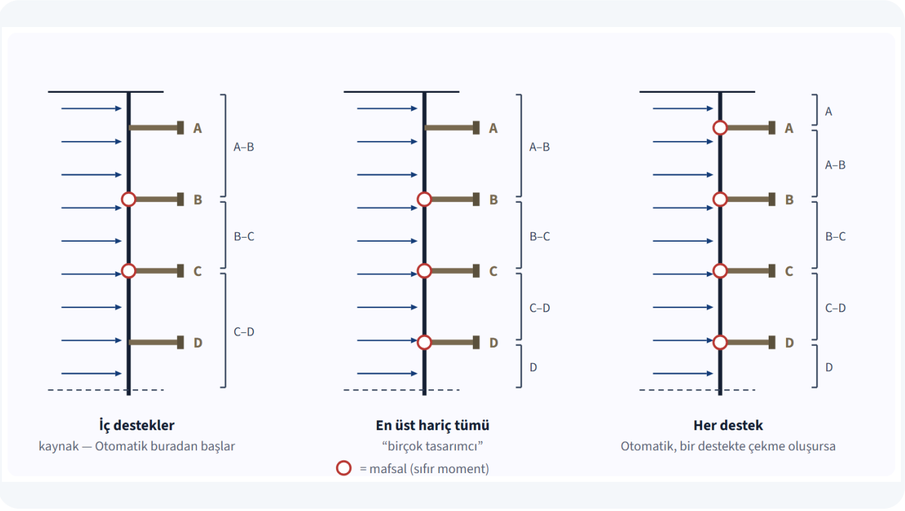
Basınç zarfını ve destek seviyelerini çiz. Palplanşı en üst ve en alt hariç **her destek seviyesinde mafsallı** al (birçok tasarımcı en üst hariç hepsinde).

Duvarı mafsallarda **uçlarda basit konsollara, aralarda basit kirişlere** ayır; her parçanın reaksiyonlarını statikle bul (dört destekli kazıda A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

Bir desteğin yükü, aldığı reaksiyonların toplamı × yatay aralık s'dir.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

Her parça statikçe belirlidir: iki mesnet taşır; mesnetlerden birine göre moment ve yatay kuvvet dengesi ikisini de verir. Mafsaldaki destek iki tarafa da ait olduğundan **iki reaksiyon** toplar. Reaksiyonlar duvarın birim uzunluğu içindir (kN/m); s onları destek yüküne çevirir.



Soru

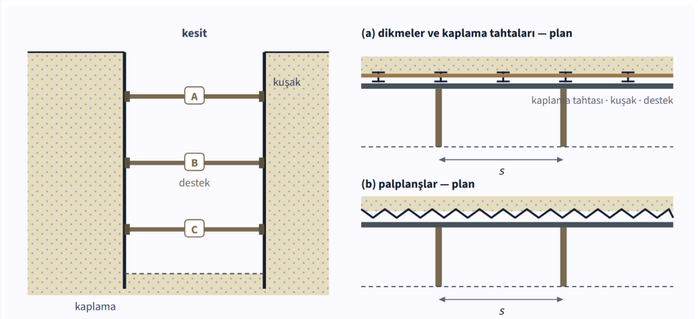
SORU

Verilenler

Kazı	$H = 7,00$ m; $B = 6$ m; destekler $z = 1,00, 3,50, 6,00$ m (A, B, C); yatay aralık $s = 3,00$ m
Basınç	Örnek 1: sert kil (γH/c = 3,6): trapez zarf $\sigma_a = 0{,}3\gamma H = 37{,}8$ kPa (üst çeyrekte artar, alt çeyrekte sıfıra iner); palplanş B desteğinde mafsallı (en üst ve en alt hariç)

İSTENEN

Parçaların **bileşkesi W** ve kolu **z̄**; reaksiyonlar **A, B_1, B_2, C**; destek yükleri **P_A, P_B, P_C**.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Zarfı mafsallarda parçalara ayır; her parçanın bileşkesi ve kolu (üst yüzeyden derinlik)

Parça	Aralık (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	Mesnetler
1	0,00 – 3,50	99,23	2,139	A (z = 1,00), B (z = 3,50)
2	3,50 – 7,00	99,23	4,861	B (z = 3,50), C (z = 6,00)

2 Birinci parça: ilk mesnede göre moment dengesi

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99{,}23(2{,}139 - 1{,}00)}{3{,}50 - 1{,}00} = \mathbf{45{,}20} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54{,}02}\ \mathrm{kN/m}$$

Birinci parça iki mesnedi 54,02 ve 45,21 kN/m ile taşır; en üst desteğin (A) reaksiyonu konsol kısmının yükünü de içerdiğinden büyüktür.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 İkinci parça

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99{,}23(4{,}861 - 3{,}50)}{6{,}00 - 3{,}50} = \mathbf{54{,}02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45{,}20}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Her destek aldığı reaksiyonları toplar; yük = toplam × s (s = 3,00 m)

Seviye	z (m)	Aldığı reaksiyonlar (kN/m)	Toplam (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1,00	54,02	54,02	**162,06**
B	3,50	45,21 + 45,21	90,42	**271,26**
C	6,00	54,02	54,02	**162,06**

En büyük destek yükü **P_B = 271,26 kN** (seviye B): bu yük strut boyutlandırmasını belirler. B desteği iki parçaya ait olduğundan iki reaksiyon toplar.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

En büyük moment ve gereken mukavemet momenti

KURAM

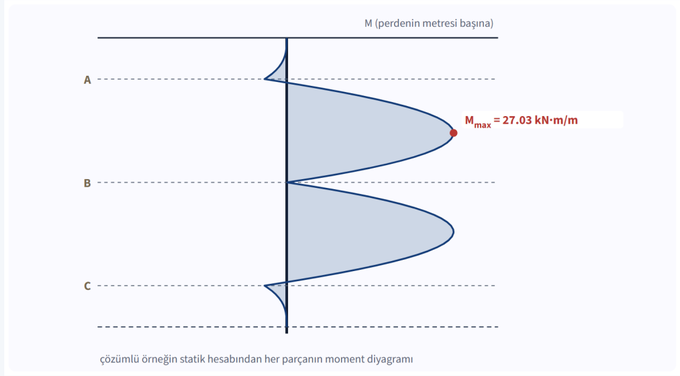
Palplanş aynı parçalardan tasarlanır: her parçada en büyük eğilme momenti (kesmenin işaret değiştirdiği yer: açıklık içinde ya da konsolun mesnetle buluştuğu destekte) bulunur; en büyüğü duvarın birim uzunluğu için tasarım momentidir. Gereken mukavemet momenti izinli eğilme gerilmesinden gelir ve tablodan en az o değerde bir kesit seçilir:

$$M_{max} = \max_{parçalar} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{izin}}$$

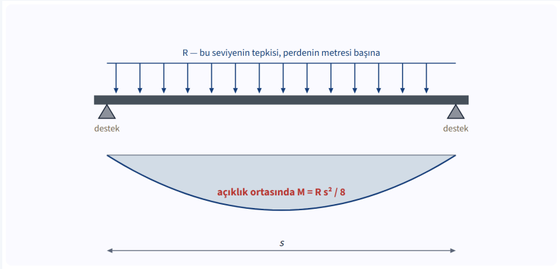
Kuşaklar uygun eklenirse sürekli sayılabilir; tutucu olarak desteklerde **mafsallı** alınır: s açıklıklı basit kiriş, seviyenin reaksiyonu R (duvarın birim uzunluğu başına) yayılı yük:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{izin}}$$

En büyük reaksiyonlu seviye belirleyicidir. Kuşaklar bazen palplanşa, ihtiyaç duydukları yanal desteği sağlayacak noktalarda bağlanır.



çözümlü örneğin statik hesabından her parçanın moment diyagramı



Soru

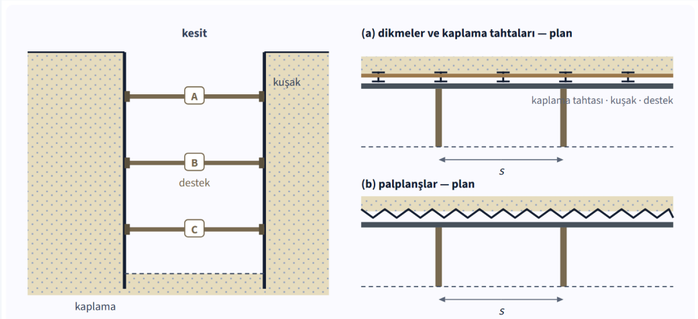
SORU

Verilenler

Kazı	**Örnek 1'deki kazı ($H = 7$ m, sert kil, $\sigma_a = 37{,}8$ kPa); destekler 1,0 · 3,5 · 6,0 m; yatay aralık $s = 3{,}0$ m; B'de mafsal**
Çelik	**izinli eğilme gerilmesi $\sigma_{izin} = 170\,000$ kPa**

İSTENEN

Palplanşın **M_{max}** ve gereken **S** (cm³/m); en büyük reaksiyonlu seviyede kuşağın **M_{max}** ve **S** (cm³).



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Palplanş: her parçanın en büyük momenti

Parça	Aralık (m)	M_{max} (kN·m/m)	Yeri z (m)
1	0,00 – 3,50	27,03	2,30
2	3,50 – 7,00	27,03	4,70

2 Gereken mukavemet momenti

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{izin}} = \frac{27{,}03}{170\,000} = 0{,}0001590\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{159{,}0\ cm^3/m}$$

Palplanşta **M_{max} = 27,03 kN·m/m** (parça 1, z = 2,30 m): **S ≥ 159,0 cm³/m**.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kuşak: her seviyede basit kiriş (s = 3,000 m)

Seviye	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{izin} (cm³)
A	54,02	60,77	357
B	90,42	101,72	598
C	54,02	60,77	357

En büyük reaksiyon **B seviyesinde** (R = 90,42 kN/m): kuşak **M_{max} = 101,72 kN·m**, **S ≥ 598 cm³** ile boyutlanır; diğer seviyelerin kuşakları daha küçük olabilir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Tasarım etkileri, sınıf, eğilme ve burkulma

KURAM

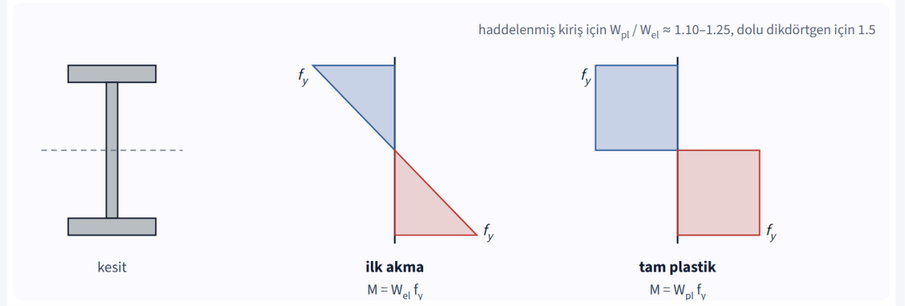
Zarftan çıkan yükler **çalışma değerleridir** (Peck zarfı ölçülen yüklerin üst sınırıdır); bir kez tasarım değerine çıkarılır: $E_d = \gamma_F E_k$. Her eleman kendi çelik sınıfının akma dayanımıyla (f_y) doğrulanır; kesit, elemanın **mukavemet momentiyle** (palplanş: metre başına W_{el}; kuşak: W; destek: A ve zayıf eksen I) verilir.

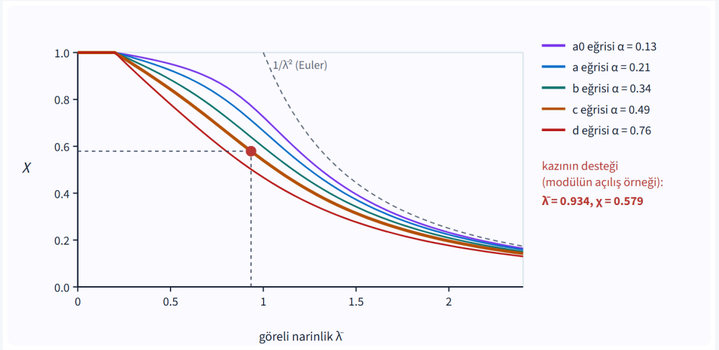
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{sınıf } 1\text{–}2),\ W_{el}\ (\text{sınıf } 3)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Destek zayıf ekseninde burkulur: I küçük atalet momenti, $L_{cr} = K\,L_b$ etkin boy (kazı genişliği, aradan kral kazık ya da çapraz bağ geçmiyorsa). α burkulma eğrisinden gelir (c eğrisi: 0,49).

Palplanşta aynı direnç birim genişlik için geçerlidir (EN 1993-5; U-profillerde kenet kayması β_B, Z-profilde 1,0). Kuşağın basınç başlığı perdeye yaslandığı için yanal burulmalı burkulma belirleyici değildir.





Soru

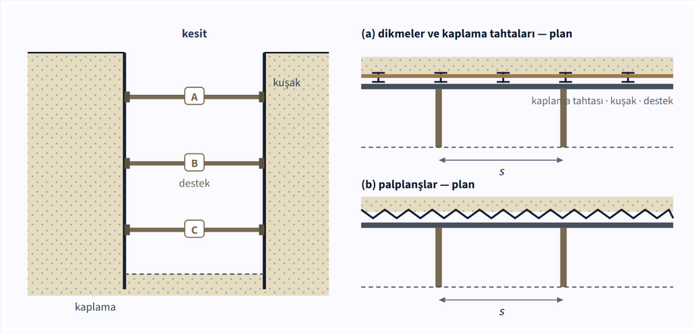
SORU

Verilenler

Kazı ve yükler	**Örnek 1'deki kazı ve Örnek 3'teki yükler: $P_{max} = 271{,}26$ kN (B desteği)**
Elemanlar	**S275 ($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1{,}35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1{,}00$: palplanş $W_{el} = 600$ cm³/m; kuşak $W_{el,y} = 1\,000$ cm³; destek $A = 65{,}7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, c eğrisi, $L_{cr} = 6{,}00$ m**

İSTENEN

Palplanş, en yüklü kuşak ve en yüklü destek için **η** (≤ 1).



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Palplanş ve kuşak (eğilme): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1{,}35(27{,}03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36{,}49}{165{,}0} = \mathbf{0{,}221}$$

$$\eta_{kuşak} = \frac{1{,}35(101{,}72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137{,}33}{275{,}0} = \mathbf{0{,}499}$$

Palplanş η = **0,221**, kuşak η = **0,499**: ikisi de yeterlidir ($\eta \le 1$).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Destek (burkulma): $N_{Ed} = 1{,}35\ P_{max} = 1{,}35(271{,}26) = 366{,}20$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6{,}00^2} = 2\,071{,}5\ \text{kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806{,}8}{2\,071{,}5}} = 0{,}9339$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49(0{,}9339 - 0{,}2) + 0{,}9339^2\right] = 1{,}1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0{,}5791 \quad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1\,046{,}4\ \text{kN}$$

$\eta_{destek} = 366{,}2 / 1\,046{,}4 =$ **0,350**. Üç eleman da yeterlidir ($\eta \le 1$); destekte **burkulma** belirleyicidir ($N_{c,Rd} = 1\,806{,}8$ kN, $N_{b,Rd} = 1\,046{,}4$ kN).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

LRFD ya da ASD; sınıflar, eğilme, kesme, kolon eğrisi

KURAM

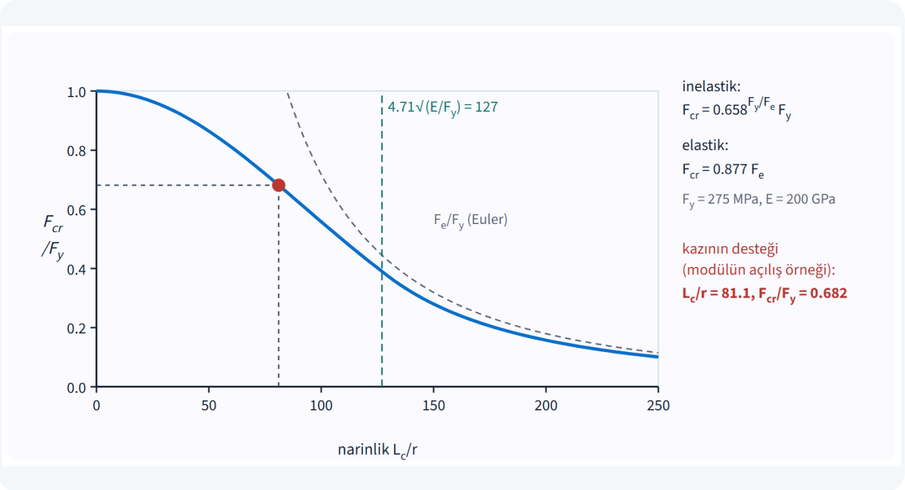
Her eleman, basınç, eğilme ve kesme hükümlerinden bulunan **nominal dayanım R_n** ile doğrulanır. LRFD'de yük çarpılır ve dayanım φ ile azaltılır; ASD'de çalışma yükü, dayanımın güvenlik katsayısı Ω'ya bölünmüşüyle karşılaştırılır:

$$R_u \le \phi R_n \ (\text{LRFD}) \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ (\text{ASD}) \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1{,}6$$

Zarftan çıkan yükler ASCE 7-22'nin **yanal toprak basıncı H**'sidir: LRFD birleşimlerinde, yüke eklendiği her yerde (kazı desteklerinde hep) 1,6 ile, ASD'de 1,0 ile girer. Palplanş ve modülle verilen kuşak, modülün iddia ettiği dayanımla alınır: kompaktta F_yZ, ilk akmada F_yS. Kuşak yanal olarak perdeyle tutulduğundan $L_b = 0$ ve yanal burulmalı burkulma sınır durum değildir.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \qquad F_{cr} = 0{,}658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\frac{L_c}{r} \le 4{,}71\sqrt{E/F_y}\right) \ \text{aksi hâlde } 0{,}877F_e \qquad P_n = F_{cr} A_g$$

Tek kolon eğrisi her kesite hizmet eder (EN 1993-1-1'deki gibi seçilecek eğri yok); r küçük atalet yarıçapı, $L_c = K L_b$ etkin boy; $L_c/r \le 200$ önerilir. AISC, EN 1993-1-1'in aksine, kesme kuvveti nedeniyle eğilme dayanımını azaltmaz.



Soru

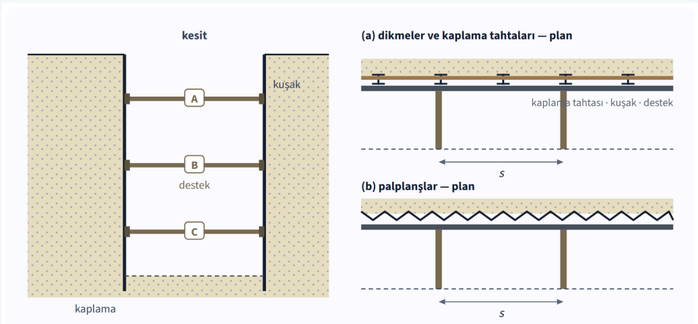
SORU

Verilenler

Kazı ve yükler	**Örnek 1'deki kazı ve Örnek 3'teki yükler: $P_{max} = 271{,}26$ kN (B desteği)**
Elemanlar	**Örnek 5'deki elemanlar (S275, $F_y = 275$ MPa); $E = 200$ GPa; LRFD $\gamma_H = 1{,}6$, $\phi_c = \phi_b = 0{,}90$; ASD $\Omega_c = 1{,}67$, $\Omega_b = 1{,}67$ ($M_n = F_y S$)**

İSTENEN

En yüklü destek için **L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n**; LRFD ve ASD oranları; palplanş ve kuşak için LRFD oranı.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Destek: kolon eğrisi (A_g = 65,7 cm², r = 7,40 cm, L_c = 6,00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7{,}40} = 81{,}1 \;\le 4{,}71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81{,}1)^2} = 300{,}3\ \text{MPa}$$

$$F_{cr} = 0{,}658^{275/300{,}3}(275) = 187{,}4\ \text{MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187{,}4 \times 6\,570\ \text{mm}^2 = \mathbf{1\,231{,}5}\ \text{kN}$$

Destekte **nominal dayanım P_n = 1 231,5 kN**; narinlik L_c/r = 81,1, elastik olmayan burkulma bölgesinde (sınır 127).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 LRFD ve ASD oranları (P = 271,26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1{,}6(271{,}26) = 434{,}0\ \text{kN} \le \phi_c P_n = 0{,}90(1\,231{,}5) = 1\,108{,}3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271{,}26\ \text{kN} \le \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1\,231{,}5}{1{,}67} = 737{,}4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}368}$$

Destek: LRFD η = **0,392**, ASD η = **0,368**. Palplanş (LRFD) 0,291, kuşak 0,658; EN 1993-1-1'de 0,221, 0,499 ve 0,350 idi.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Terzaghi sütunu, Chang'ın düzeltmesi

KURAM

Destekli kazı, destekler göçmeden de göçebilir: kazının yanındaki zeminin ve sürşarjın ağırlığı tabanın altındaki kili içeri ve yukarı sıkıştırır. B′ genişliğindeki zemin sütunu, taban seviyesinde cN_c taşıma gücüyle (N_c = 5,7) kil üzerinde yüktür; yan yüzdeki kayma cH onu hafifletir:

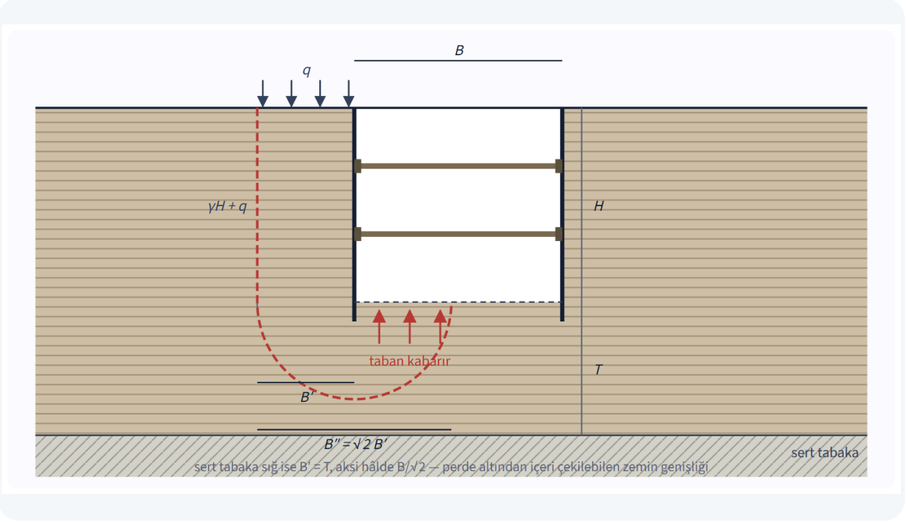
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

Denklem **üç yönden düzeltilmiştir**: yan kayma yükü azaltmaz, **direnç ekler**; B″ genişliğindeki taban şeridi yukarı yüklü bir temel gibi çalışır; kazı tabanı sınırsız olduğundan N_c = 5,14 (pürüzsüz temel):

$$FS = \frac{5{,}14\,c\left(1 + 0{,}2\dfrac{B''}{L}\right) + \dfrac{cH}{B'}}{\gamma H + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

B kazı genişliği, L plan boyu, T tabanın altındaki kil kalınlığı; q kazının yanındaki sürşarj. Tamamen göçen kazılarda FS ≈ 1, kısmen/az kalan kazılarda biraz üstünde çıkar; istenen FS ≈ **1,5**.

Homojen kilde FS < 1,5 ise palplanşlar daha derine (genelde taban altında B/2'den fazla değil) çakılır; gömülü boy, yayımlı tasarım abaklarından alınan bir kuvvet taşır.



Soru

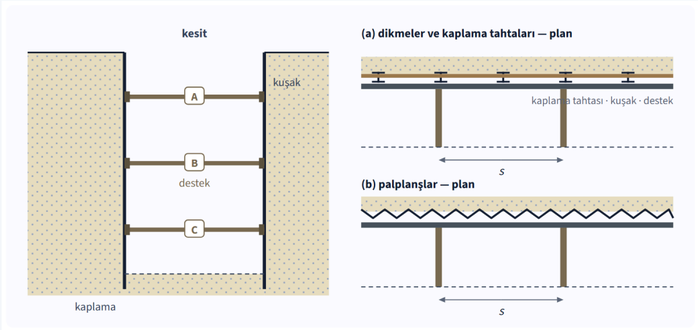
SORU

Verilenler

Açılış kazısı	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m; kil $\gamma = 18$, $c = 35$ kPa, tabanın altında kil kalınlığı $T = 4$ m; sürşarj yok
Kitap kazısı	4 m geniş, 15 m uzun, 6 m derin; $\gamma = 17$, $c = 40$ kPa; sert tabaka tabanın 2 m altında

İSTENEN

Her iki kazı için **B′**, **B″** ve **FS** (≥ 1,5?); açılış kazısında sert tabaka yoksa ve 10 m genişlikte?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Açılış kazısı: B/√2 = 4,24 m > T = 4 m, bu yüzden B′ = T

$$B' = T = 4{,}00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5{,}66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5{,}14(35)\left(1 + 0{,}2\frac{5{,}66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4{,}00}}{18(7)} = \frac{190{,}1 + 61{,}2}{126} = \mathbf{1{,}99} \ \geq 1{,}5\ \checkmark$$

2 Kitap kazısı (T = 2 m ≤ B/√2 = 2,83 m: B′ = T = 2,00 m, B″ = 2,83 m)

$$FS = \frac{5{,}14(40)\left(1 + 0{,}2\frac{2{,}83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2{,}00}}{17(6)} = \mathbf{3{,}27}$$

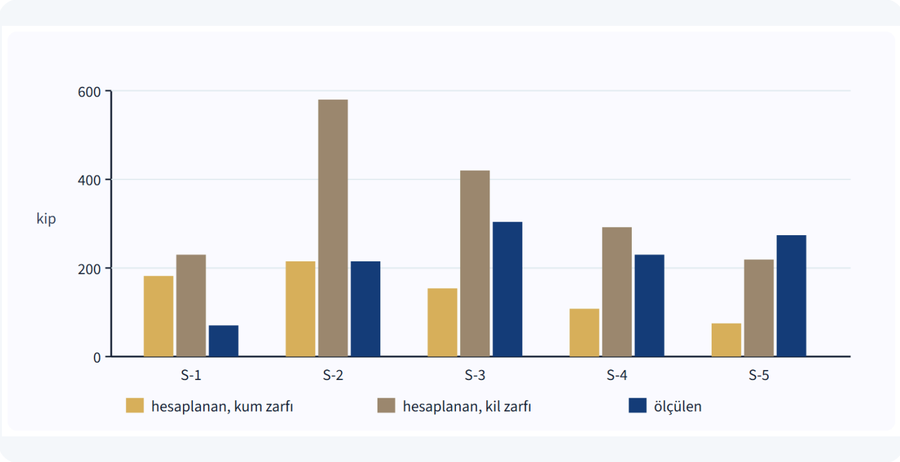
Açılış kazısı **FS = 1,99**, kitap kazısı **3,27**: ikisi de ≥ 1,5. Sert tabaka girilmezse (B′ = B/√2) kitap kazısında FS 2,96'e iner; açılış kazısı 10 m genişlik ve sert tabaka olmadan 1,80'e düşer (tutucu yönde azalır): taban kabarması genişlikle ve sert tabakanın yokluğuyla kötüleşir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Boston ve Chicago vaka incelemeleri

KURAM

Boston (test kesiti B): 17,7 m derin, beş destek; profil kum ve kil için iki zarfla sınırlandı (kum zarfı 53,5 kPa, yumuşak–orta kil zarfı 146,1 kPa); ölçülen yükler iki tahminden de çok farklı çıktı (zemin parametreleri belirsiz), destekler ölçülenin çok üstündeki yüke göre tasarlanmıştı. **Chicago, National Plaza**: 21,3 m derin, altı destek; profil eşdeğer bir kile çevrildi (c_{av} = 34,91 kPa, γ_{av} = 19,76 kN/m³, γH/c = 12,08 > 4, σ_a = 282,0 kPa). Peck zarfı gözlenenin yaklaşık **1,8 katı** basınç verdi: birçok kazının çevresine çizilen zarf tek bir kazı için tutucudur; aynı zeminde saha deneyimi aşırı tasarımı önemli ölçüde azaltabilir.



Yöntemin neyi kabul ettiği

KURAM

Zarflar yaklaşık 6 m'den derin kazılardan toplanmıştır; **zarf duvara herhangi bir andaki gerçek basınç değildir**: güvenli destek yükü verir, duvar sehimi vermez. Kil **drenajsız**dır; boşluk suyu basıncı ayrıca hesaba katılmaz.

Birden çok kil, kalınlıkla ortalanır (c_{av}, γ_{av}); γH/c bu ortalamalarla seçilir. Sürşarj zarfın yanına eklenir (Δp = q), su yalnız birim ağırlığı değiştirir.

Palplanş belirli mafsallar zinciri sayılır; kendi rijitliği ve taban altındaki gömme kullanılmaz. **Kuşaklar** desteklerarası basit açıklıktır (tutucu). Çelik EN 1993-1-1 ile (sınıf 4 tasarlanmaz) ya da AISC 360-22 ile doğrulanır.

Taban kabarması Chang'ın düzeltilmiş denklemiyle kontrol edilir; palplanşın taban altındaki gömmesi sayılmaz (güvenli taraf). Çok tabakada formül GeoTerva'nın tabakalı uzantısıyla kullanılır.

Yapı sırasında yanal hareket ve çevrede zemin kaybı beklenir; sert tabaka varsa palplanşlar ona gömülür. Yumuşak kilde γH/c ≈ 8'de büyük yer değiştirme ve desteklerin göçmesi görülebilir.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Zarf: $\gamma H/c > 4$ yumuşak–orta ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0{,}3\gamma H)$); ≤ 4 sert (≈ $0{,}3\gamma H$). Örnek: $\gamma H/c = 3{,}6$, $\sigma_a = 37{,}8$ kPa

Sürşarj ve su: $\Delta p = q$ ayrı eklenir; su yalnız γ''yü değiştirir. **Çekme çatlağı** $z_c = 2c/\gamma = 3{,}89$ m; ilk destek (1,0 m) onun üstünde

Destek yükü: zarf mafsallarda parçalara ayrılır, reaksiyonlar statikle bulunur; örnekte $P_B = 271{,}26$ kN (iki reaksiyon toplar)

Boyutlandırma: palplanş $M_{max} = 27{,}03$ kN·m/m ($S = 159$ cm³/m), kuşak $M = R\,s^2/8 = 101{,}72$ kN·m ($S = 598$ cm³; $\sigma_{izin} = 170$ MPa)

Çelik: EN 1993-1-1 $\eta = 0{,}221$ / $0{,}499$ / $0{,}350$ (palplanş / kuşak / destek); AISC LRFD destek 0,392, ASD 0,368

Taban kabarması: $FS = (5{,}14c(1 + 0{,}2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1{,}5$; açılış kazısında 2,00, kitap kazısında 3,27

Kaynaklar

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — Bölüm 15, “Braced Cuts”; bu sayfa söz konusu bölümü esas almaktadır.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47.

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), 276–279.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül sayfasındaki çözümlü örnek de bu kazıdır (H = 7 m, γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, destekler 1 · 3,5 · 6 m).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi kazınızın kil profilini, destek seviyelerini, sürşarjını, suyunu ve elemanlarınızı GeoTerva'da girin; modül zarfı, çekme çatlağını, destek yüklerini, palplanş ve kuşak momentlerini, çelik doğrulamasını ve taban kabarmasını birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com