Geoteknik ders sunumu · Palplanş ve destekli kazılar

Kum üzerinde kil: destekli kazı

Ders anlatımı: aynı kazıda kum ve kil (Peck eşdeğer kohezyonu); zarf, destek yükleri, palplanş ve kuşak boyutlandırma, çelik doğrulaması ve taban kabarması; her konuda çözümlü örnek.

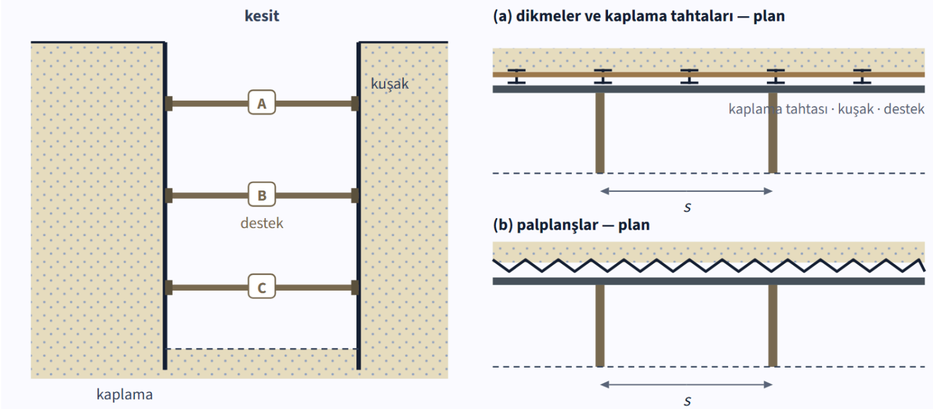
Kazı destekleme

Eşdeğer kil (kum + kil)

Destek · kuşak · palplanş

EN 1993 · AISC 360

Taban kabarması



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Destekli kazıda basıncın **neden Rankine olmadığını** ve zarfların nasıl yapıldığını; kil zarflarını (γH/c ile)
- Kazı kum ve kilden geçince Peck'in **eşdeğer kohezyonunu** c_{av} ve γ_a'yı; zarfın $\gamma_a H/c_{av}$ ile seçilmesini
- National Plaza (Chicago) kazısının **birden çok kili** önce kalınlıkla ortalayıp sonra kumla birleştirmesini
- Sürşarjın zarfın yanına eklenmesini; zarftan **destek yüklerini**, **palplanş** ve **kuşak** boyutlandırmasını
- Çeliği **EN 1993-1-1 ve AISC 360-22** ile doğrulamayı; tabakalı profilde **taban kabarması** kontrolünü

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: üstte 3 m kum (γ = 17 kN/m³, φ′ = 30°) üzerinde kil (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa); H = 7,00 m, 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

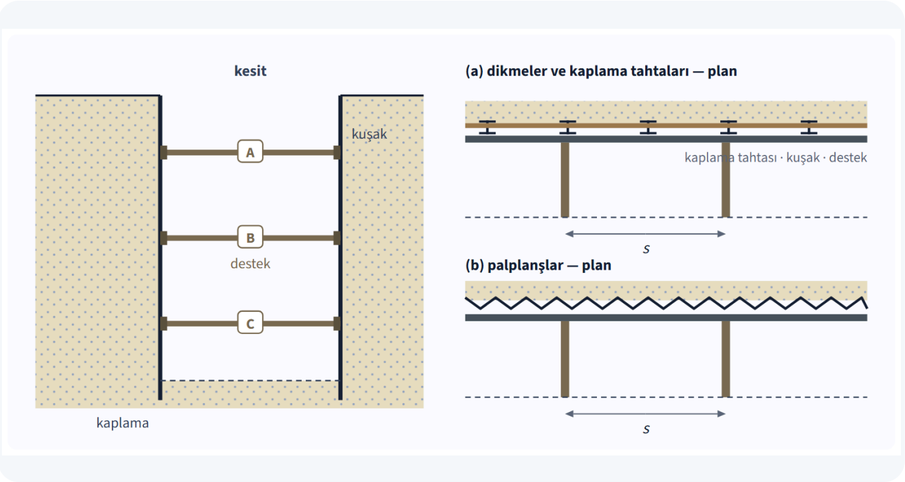
Düşey cepheli derin kazılar (şehir içi bodrum, aç-kapa tünel) geçici bir **destekleme sistemiyle** açık tutulur. İki düzen yaygındır: önceden çakılan **düşey kazıklar** (çelik ya da ahşap) arasına kazı ilerledikçe yatay ahşap kaplama konur; ya da birbirine kenetlenen **palplanşlar** sürekli bir duvar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

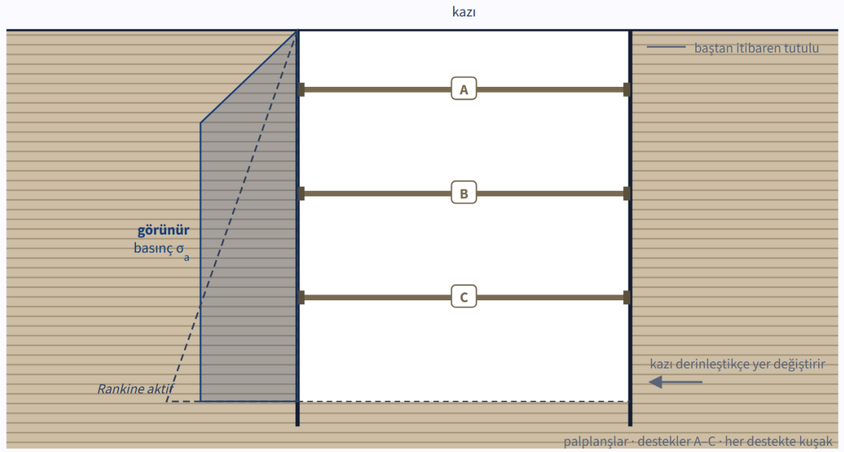
Konsol istinat duvarı tabanından döner ve Rankine aktif basıncı (üstte sıfır, altta en büyük) onu iyi anlatır. **Destekli duvar tersine hareket eder**: ilk destek kazı sığken konur, üst kısım neredeyse hiç kıpırdamaz; sonraki her kademe destek takılmadan önce kazılır ve aradaki süre derinlikle uzar,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

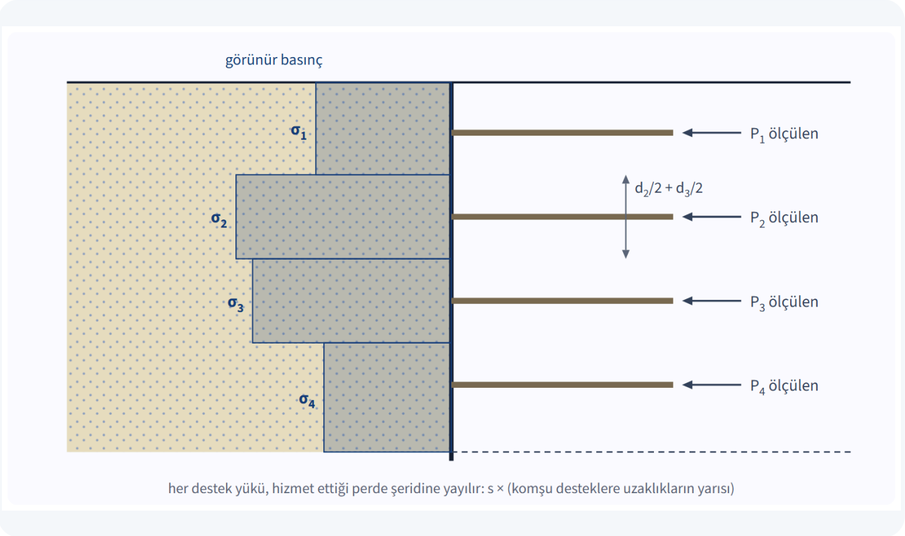
Basınç yerden yere değişir ve her destek karşılaşabileceği **en büyük yüke** göre boyutlanmalıdır. Zarflar bunun için kurulur: araçlı bir kazıda her desteğin yükü ölçülür, desteğin tuttuğu perde şeridine bölünür (yatay aralık s × üstteki ve alttaki desteğe uzaklıkların yarısı) ve bu bant üzerinde **görünür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

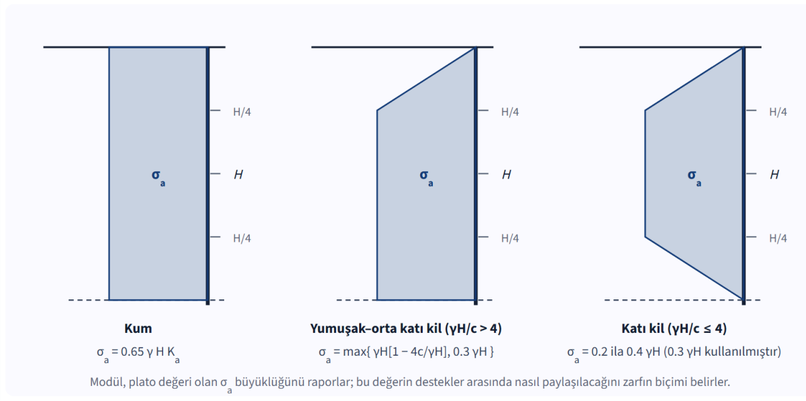
KURAM

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; **sert kil** elastik aralığına daha yakındır:

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

Yumuşak–orta kil zarfı yüzeyde sıfırdır, üst çeyrekte artar, tabana kadar sabit plato; sert kil zarfı üst çeyrekte artar, orta yarıda sabit, alt çeyrekte sıfıra döner. İki ifadenin büyüğü belirler.

Koşullar: kazı derinliği ≳ 6 m; su taban altında; kil drenajsız (boşluk suyu basıncı hesaba katılmaz).



Peck'in eşdeğer kohezyonu

KURAM

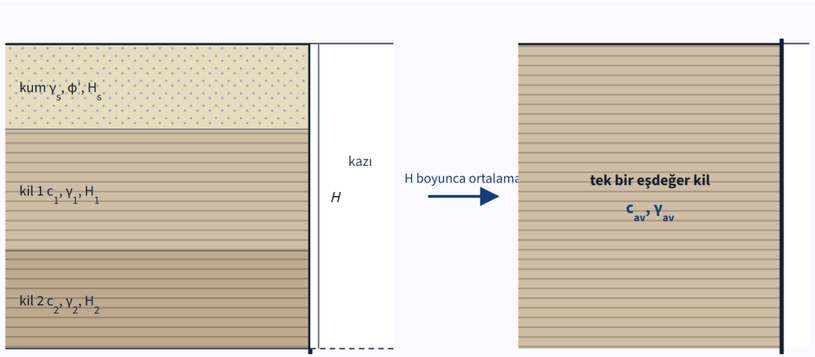
Kazıda hem kum hem kil varsa Peck profili **tek bir kil** ile değiştirdi: yükseklik boyunca zeminin harekete geçirebildiği dayanımı ortalar. Kum kendi ağırlığının sürtünmesini, kil sınırsız basınç dayanımını (ilerleyen göçme için azaltılmış) katar:

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s, γ_s, φ'_s: kumun yüksekliği, birim ağırlığı ve etkin sürtünme açısı; K_s kumun yanal basınç katsayısı (≈ 1); $q_u = 2c$ kilin serbest basınç dayanımı, γ_c doygun birim ağırlığı; n' ilerleyen göçme katsayısı, 0,5–1,0 (ortalama 0,75).

c_{av} ve γ_a ile kil zarfları tüm yüksekliğe uygulanır; zarf $\gamma_a H/c_{av}$ ile seçilir.

Kumun altında birkaç kil varsa kaynak önce onları kalınlıkla ortalar ($c_{av} = \Sigma c_i H_i / \Sigma H_i$, γ_{av}), sonra bu eşdeğer kili kumla birleştirir (National Plaza vakasında olduğu gibi).



kum: öz ağırlık sürtünmesi $\gamma K_s H_s^2 \tan\phi'$ · kil: $n' q_u H$ · her ikisi yükseklik boyunca toplanır, ardından kil kuralı uygulanır

Soru

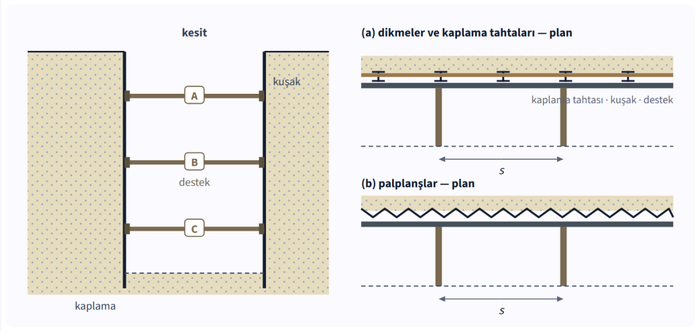
SORU

Verilenler

Profil	**üstte $H_s = 3$ m kum ($\gamma_s = 17$ kN/m³, $\varphi'_s = 30°$, $K_s = 1$), altında kil ($\gamma_c = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa)**
Kazı ve katsayı	$H = 7{,}0$ **m;** $n' = 0{,}75$ **(ortalama); ayrıca** $n' = 0{,}5$ **ve** $1{,}0$

İSTENEN

c_{av}, γ_a, $\gamma_a H/c_{av}$, zarfın türü ve σ_a; n′ değişimiyle sonuç.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Eşdeğer kohezyon ve birim ağırlık (n′ = 0,75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0{,}75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88{,}33 + 210{,}0}{14} = \mathbf{21{,}31}\ \mathrm{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3) + (7-3)18}{7} = \mathbf{17{,}57}\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17{,}57(7)}{21{,}31} = \mathbf{5{,}77} > 4$$

Eşdeğer kil: c_{av} = **21,31 kPa**, γ_a = 17,57 kN/m³; $\gamma_a H/c_{av}$ = **5,77** > 4 → yumuşak–orta kil zarfı.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Yumuşak–orta kil zarfı ve n′ duyarlığı

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17{,}57(7) - 4(21{,}31) = \mathbf{37{,}75}\ \text{kPa}$$

n′	c_{av} (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	P_{max} (kN)
0,50	16,31	7,54	57,75	424,5
0,75	21,31	5,77	37,75	277,5
1,00	26,31	4,67	36,90	271,2

Eşdeğer kil: c_{av} = **21,31 kPa**, $\gamma_a H/c_{av}$ = 5,77 > 4: yumuşak–orta kil zarfı, **σ_a = 37,75 kPa**. n′ = 0,5 alınırsa c_{av} 16,31'e iner ve σ_a 57,8 kPa'ya çıkar: ilerleyen göçme katsayısı sonucu çok etkiler.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

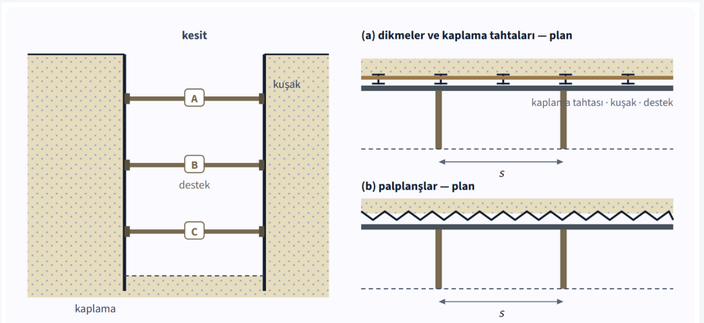
SORU

Verilenler

Kazı	$H = 70$ ft $= 21{,}34$ m derin, altı destek; 13 ft kum dolgunun altında dört kil (aşağıdaki tablo, SI)
Katsayılar	$K_s = 1$, $\varphi'_s = 30°$, $n' = 0{,}75$

İSTENEN

Kilin kalınlıkla ortalaması $c_{av,kil}$; c_{av}, γ_{av}, $\gamma H/c$ ve σ_a.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Profil (SI) ve kilin kalınlıkla ortalaması

Tabaka	Kalınlık (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	Katkı terimi (kN/m)
Kum dolgu	3,96	17,28	—	156,6
Kil 1	10,06	19,95	19,2	289,0
Kil 2	3,35	20,42	33,5	168,6
Kil 3	1,83	21,21	95,8	262,7
Kil 4	2,13	21,21	191,5	612,9

$$c_{av,kil} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51{,}16\ \mathrm{kPa}}$$

Dört kilin kalınlıkla ortalaması **51,16 kPa**; kum terimi $\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s$ = 156,6, kil terimi $n' q_u \Sigma H_i$ = 1 333,2 kN/m.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Eşdeğer kohezyon, birim ağırlık ve zarf

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156{,}6 + 1\,333{,}2}{2(21{,}34)} = \mathbf{34{,}91}\ \mathrm{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19{,}76}\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19{,}76(21{,}34)}{34{,}91} = \mathbf{12{,}08}\ > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282{,}0}\ \mathrm{kPa}$$

Yumuşak–orta kil zarfı uygulanır: **σ_a = 282,0 kPa** (c_{av} = 34,91 kPa, γ_{av} = 19,76 kN/m³, $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12,08). Bu zarfın gözlenen kuşak yükleriyle karşılaştırması 'Zarflar gerçek kazılarda' bölümündedir (Peck zarfı ≈ 1,8 kat).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Zarfın yanına eklenir

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 ağırlıkta ve drenajsız dayanımdadır. Taban üstündeki su çizilir ve not edilir, ayrı yük olarak eklenmez; yalnız zemin ağırlığını değiştirir: su altında doygun birim ağırlık, suyun kestiği tabakada iki değerin kalınlık ortalaması.

Kum tabakasının kalınlığı eşdeğer kili belirlediğinden profilin **katman sırası** sonucu doğrudan etkiler: kum kalınlaştıkça c_{av} değişir (aşağıdaki örnek).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

Soru

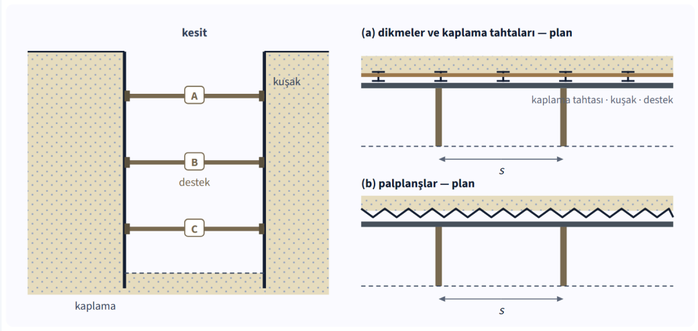
SORU

Verilenler

Kazı	**Örnek 1'deki kazı ($H = 7$ m, $n' = 0{,}75$): kum 3 m (açılış)**
Değişiklikler	**(a) kum 5 m kalın (kil 2 m); (b) sürşarj $q = 10$ kPa**

İSTENEN

Her durumda c_{av}, $\gamma_a H/c_{av}$, σ_a, toplam yük R ve en büyük destek yükü.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 (a) Kum 5 m: eşdeğer kil yeniden

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0{,}75)(70)\right] = 25{,}03 \text{ kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17{,}29 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\ 0{,}3\gamma_a H\right) = \max(20{,}91, 36{,}31) = \mathbf{36{,}31} \text{ kPa}$$

Kum 5 m olunca eşdeğer kohezyon 21,3 → **25,0 kPa** olur ve zarfı **0,3γ$_a$H = 36,3 kPa** belirler.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 (b) Sürşarj: ayrı $\Delta p_q = q = 10$ kPa; üç durumun özeti

Durum	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
Açılış (kum 3 m)	21,31	17,57	5,77	37,75	231,2	277,5
(a) kum 5 m	25,03	17,29	4,84	36,31	222,4	266,9
(b) q = 10 kPa	21,31	17,57	5,77	37,75	301,2	351,0

Kum kalınlaşınca c_{av} 21,3 → 25,0 kPa olur ve zarf 37,8 → **36,3 kPa**'ya iner (sürtünmeli kum kilden daha çok dayanım katar; artık $0{,}3\gamma_a H$ ifadesi belirler). Sürşarj zarfa dokunmaz: yalnız $\Delta p_q = 10$ kPa ekler (R 231,2 → 301,2 kN/m).

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:

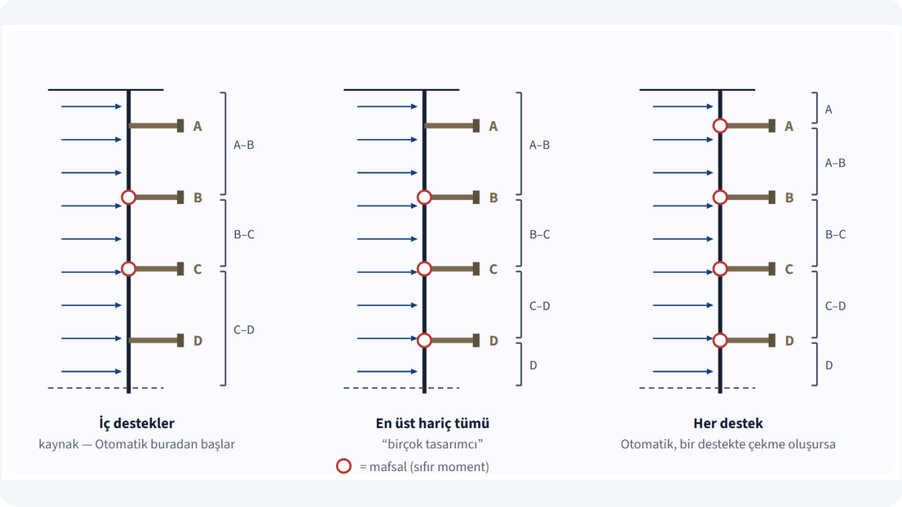
Basınç zarfını ve destek seviyelerini çiz. Palplanşı en üst ve en alt hariç **her destek seviyesinde mafsallı** al (birçok tasarımcı en üst hariç hepsinde).

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

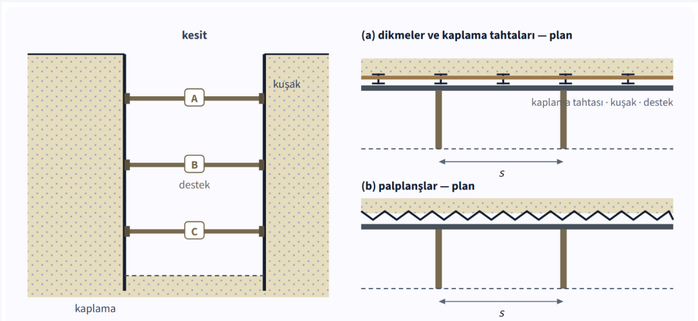
SORU

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: eşdeğer kil, yumuşak–orta zarf $\sigma_a = 37{,}75$ kPa (üst çeyrekte artar, tabana kadar sabit); 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	99,09	2,139	A (z = 1,00), B (z = 3,50)
2	3,50 – 7,00	132,12	5,250	B (z = 3,50), C (z = 6,00)

2 Birinci parça: ilk mesnede göre moment dengesi

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99{,}09(2{,}139 - 1{,}00)}{3{,}50 - 1{,}00} = \mathbf{45{,}14} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53{,}95}\ \mathrm{kN/m}$$

Birinci parça iki mesnedi 53,95 ve 45,14 kN/m ile taşır; en üst desteğin (A) reaksiyonu konsol kısmının yükünü de içerdiğinden büyüktür.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 İkinci parça

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132{,}12(5{,}250 - 3{,}50)}{6{,}00 - 3{,}50} = \mathbf{92{,}49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39{,}64}\ \mathrm{kN/m}$$

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	53,95	53,95	**161,85**
B	3,50	45,14 + 39,64	84,78	**254,34**
C	6,00	92,49	92,49	**277,47**

En büyük destek yükü **P_C = 277,47 kN** (seviye C): 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

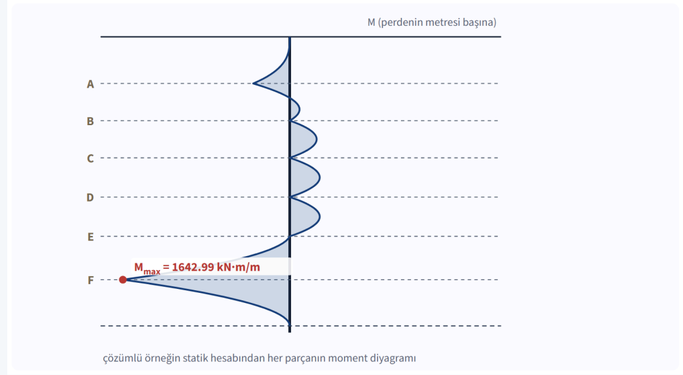
Palplanş aynı parçalardan tasarlanır: her parçada en büyük eğilme momenti (kesmenin işaret değiştirdiği yer: açıklık içinde ya da konsolun mesnetle buluştuğu destekte) bulunur; en büyüğü duvarın birim uzunluğu için tasarım momentidir. Gereken mukavemet momenti izinli eğilme gerilmesinden gelir ve tablodan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

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

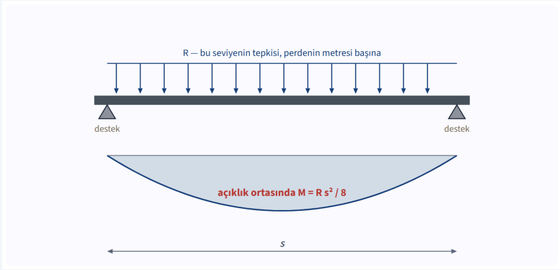
Kuşaklar uygun eklenirse sürekli sayılabilir; tutucu olarak desteklerde **mafsallı** alınır: s açıklıklı basit kiriş, seviyenin reaksiyonu R (duvarın birim uzunluğu başına) yayılı yük:

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

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



çözümlü örneğin statik hesabından her parçanın moment diyagramı



Soru

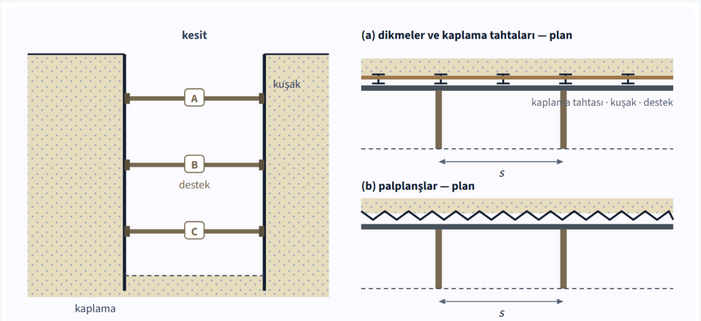
SORU

Verilenler

Kazı	**Örnek 1'deki kazı ($H = 7$ m, eşdeğer kil, $\sigma_a = 37{,}75$ kPa); destekler 1,0 · 3,5 · 6,0 m; $s = 3{,}0$ 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	26,99	2,30
2	3,50 – 7,00	20,81	4,55

2 Gereken mukavemet momenti

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{izin}} = \frac{26{,}99}{170\,000} = 0{,}0001588\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{158{,}8\ cm^3/m}$$

Palplanşta **M_{max} = 26,99 kN·m/m** (parça 1, z = 2,30 m): **S ≥ 158,8 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	53,95	60,69	357
B	84,78	95,38	561
C	92,49	104,05	612

En büyük reaksiyon **C seviyesinde** (R = 92,49 kN/m): kuşak **M_{max} = 104,05 kN·m**, **S ≥ 612 cm³** ile boyutlanır; diğer seviyelerin kuşakları daha küçük olabilir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Tasarım etkileri, sınıf, eğilme ve burkulma

KURAM

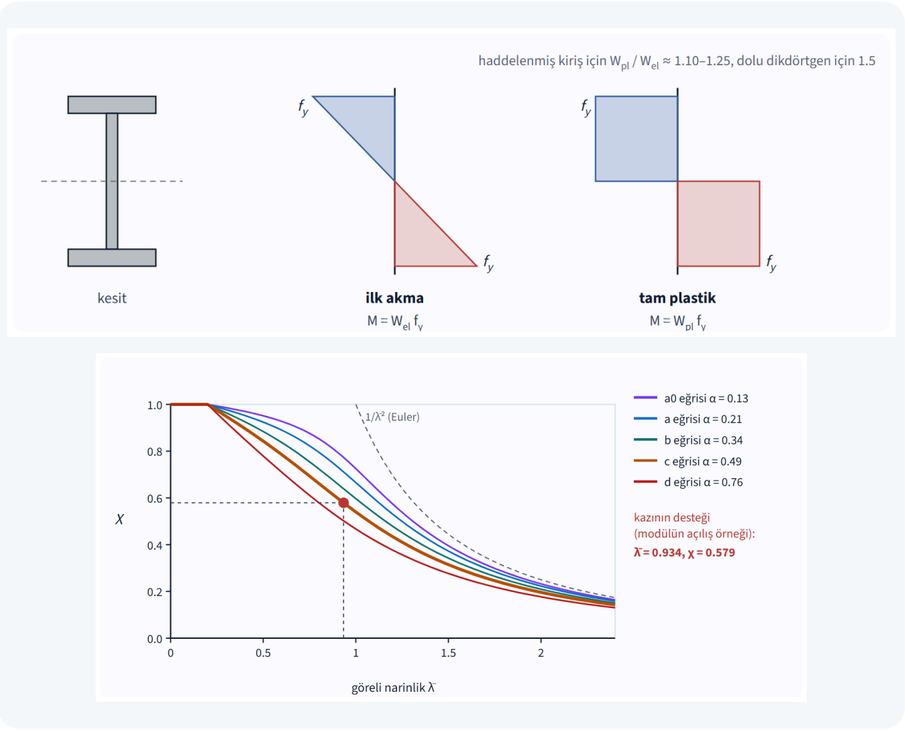
Zarftan çıkan yükler **çalışma değerleridir** (Peck zarfı ölçülen yüklerin üst sınırıdır); bir kez tasarım değerine çıkarılır: $E_d = \gamma_F E_k$. Her eleman kendi çelik sınıfının akma dayanımıyla (f_y) doğrulanır; kesit, elemanın **mukavemet momentiyle** (palplanş: metre başına W_{el}; kuşak: W; destek: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

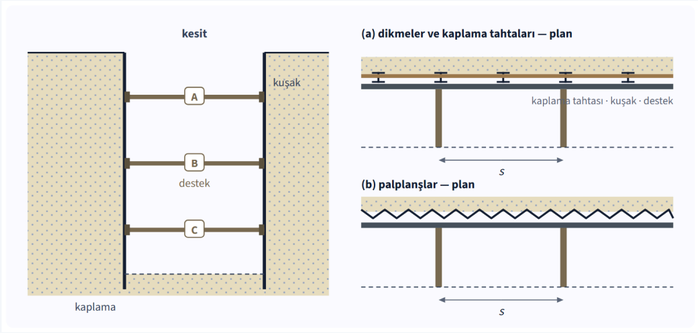
SORU

Verilenler

Kazı ve yükler	**Örnek 1'deki kazı ve Örnek 4'teki yükler:** $P_{max} = 277{,}47$ **kN**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1{,}35(26{,}99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36{,}44}{165{,}0} = \mathbf{0{,}221}$$

$$\eta_{kuşak} = \frac{1{,}35(104{,}05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140{,}47}{275{,}0} = \mathbf{0{,}511}$$

Palplanş η = **0,221**, kuşak η = **0,511**: ikisi de yeterlidir ($\eta \le 1$).

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Destek (burkulma): $N_{Ed} = 1{,}35\ P_{max} = 1{,}35(277{,}47) = 374{,}58$ kN

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

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

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

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

$\eta_{destek} = 374{,}6 / 1\,046{,}4 =$ **0,358**. 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

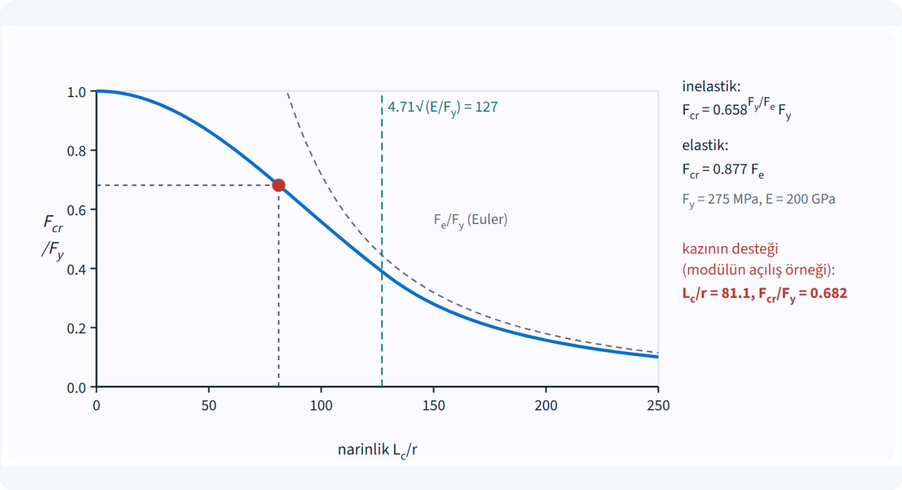
Her eleman, basınç, eğilme ve kesme hükümlerinden bulunan **nominal dayanım R_n** ile doğrulanır. LRFD'de yük çarpılır ve dayanım φ ile azaltılır; ASD'de çalışma yükü, dayanımın güvenlik katsayısı Ω'ya bölünmüşüyle karşılaştırılır:

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

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.

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

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

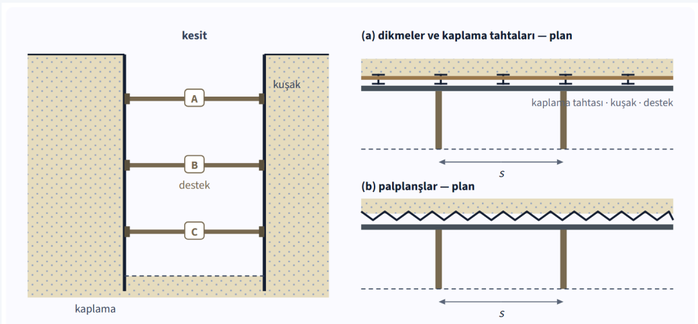
SORU

Verilenler

Kazı ve yükler	**Örnek 1'deki kazı ve Örnek 4'teki yükler:** $P_{max} = 277{,}47$ **kN**
Elemanlar	**Örnek 6'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 = 277,47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1{,}6(277{,}47) = 444{,}0\ \text{kN} \le \phi_c P_n = 0{,}90(1\,231{,}5) = 1\,108{,}3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277{,}47\ \text{kN} \le \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1\,231{,}5}{1{,}67} = 737{,}4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}376}$$

Destek: LRFD η = **0,401**, ASD η = **0,376**. Palplanş (LRFD) 0,291, kuşak 0,673; EN 1993-1-1'de 0,221, 0,511 ve 0,358 idi.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Altındaki kil taşır, yandaki tabakalar kayma ve yük verir

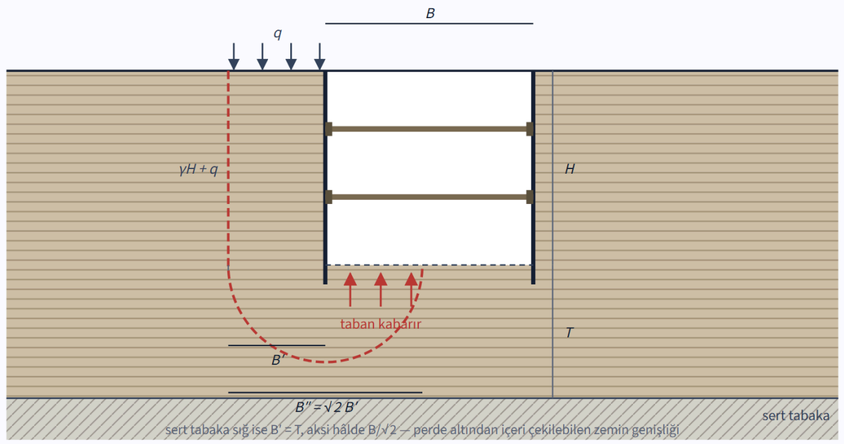
KURAM

Kazı tabanı kilde, yandaki zeminin ağırlığıyla yukarı kabarabilir (Terzaghi sütunu, Chang'ın düzeltmesi). Formül homojen kil için türetilmiştir; modül **tabakalı profilde GeoTerva uzantısıyla** kullanır:

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

c: tabanın altındaki kil (taşıma terimi); **c_{side}**: tutulan yükseklikte ortalama kohezyon (kum sıfır sayılır; yan kayma terimi); **$\sigma_v(H)$**: kazı kenarında taban seviyesindeki toplam örtü gerilmesi ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B kazı genişliği, L plan boyu, T taban altındaki sert tabaka; perdenin gömmesi sayılmaz (güvenli taraf). İstenen FS **≈ 1,5**.



Soru

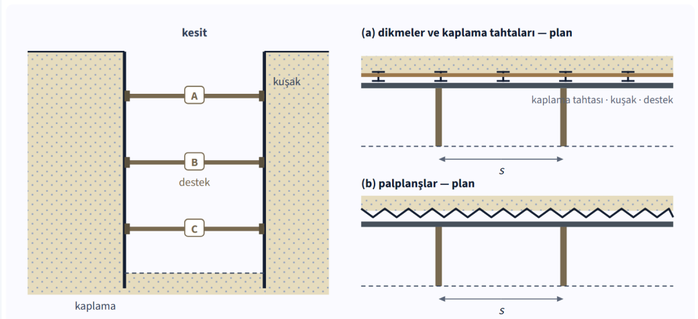
SORU

Verilenler

Açılış kazısı	$H = 7$ **m,** $B = 6$ **m,** $L = 20$ **m, tabanın altında kil** $T = 4$ **m; üstte 3 m kum (**$\gamma = 17$**), altında kil (**$\gamma = 18$**,** $c = 35$ **kPa)**
Karşılaştırma	**kum 5 m kalın olsaydı (kil 2 m)**

İSTENEN

c_{side}, $\sigma_v(H)$, **B′** ve **FS** (≥ 1,5?); kum kalınlığı artınca FS?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Yandaki tabakalardan: ortalama kohezyon ve örtü gerilmesi

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20{,}0}\ \text{kPa}\ \ (\text{kum sıfır}) \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4{,}24\ \text{m} > T = 4\ \text{m}\ \Rightarrow\ B' = 4{,}00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5{,}66\ \text{m}$$

2 Güvenlik sayısı (taşıma terimi: tabanın altındaki kil c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5{,}14(35)\left(1 + 0{,}2\frac{5{,}66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4{,}00}}{123} = \frac{190{,}1 + 35{,}0}{123} = \mathbf{1{,}83}\ \geq 1{,}5\ \checkmark$$

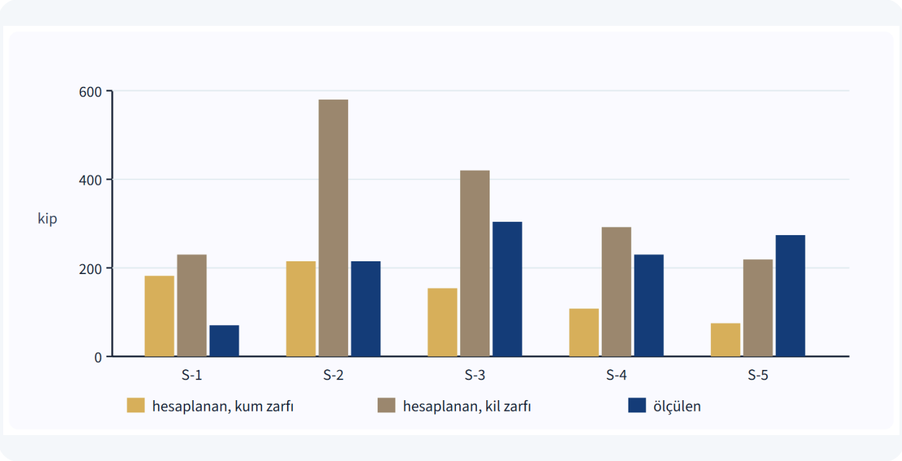
Taban kabarması güvenliği **1,83** (≥ 1,5). Kum 5 m olunca yan kohezyon 10 kPa'ya düşer, örtü gerilmesi 121 kPa'ya iner ve FS **1,72**'e düşer: kum tabakası kalınlaştıkça yan kayma payı azalır.

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, destekler ölçülenin çok üstünde yüke göre tasarlanmıştı. **Chicago, National Plaza**: 21,3 m derin, altı destek; profil eşdeğer kile çevrildi (c_{av} = 34,91 kPa, γ_{av} = 19,76 kN/m³, γH/c = 12,08, σ_a = 282,0 kPa). Peck zarfı gözlenen basıncın yaklaşık **1,8 katını** 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, kum drenajlıdır.

Kum + kil profili **tek eşdeğer kile** çevrilir (c_{av}, γ_a); zarf $\gamma_a H/c_{av}$ ile seçilir. Birkaç kil önce kalınlıkla ortalanır. $K_s \approx 1$ ve $n' = 0{,}75$ ortalama değerlerdir; $n' = 0{,}5$–$1{,}0$ arası değişim sonucu büyük etkiler.

Sürşarj ayrı eklenir ($\Delta p = q$); su yalnız birim ağırlığı değiştirir. **Palplanş** mafsallı belirli kirişler zinciridir; **kuşaklar** desteklerarası basit açıklıktır. Çelik EN 1993-1-1 (sınıf 4 tasarlanmaz) ya da AISC 360-22 ile doğrulanır.

Taban kabarması, homojen kil için türetilmiş formülün GeoTerva tabakalı uzantısıyla kontrol edilir; perdenin gömmesi sayılmaz.

Kazı sırasında yanal hareket ve çevrede zemin kaybı beklenir; sert tabaka varsa palplanşlar ona gömülür.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Eşdeğer kil: $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s) n' q_u]/(2H)$, $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$; örnekte 21,31 kPa ve 17,57 kN/m³

Zarf: $\gamma_a H/c_{av} = 5{,}77 > 4 \rightarrow$ yumuşak–orta kil zarfı $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37{,}75$ kPa; $n' = 0{,}5 \rightarrow 57{,}75$ kPa

National Plaza: $c_{av,kil} = 51{,}16$, $c_{av} = 34{,}91$ kPa, $\gamma_{av} = 19{,}76$ kN/m³, $\gamma H/c = 12{,}08 \rightarrow \sigma_a = 282{,}0$ kPa (gözlenenin ≈ 1,8 katı)

Destek yükü ve boyutlandırma: $P_{max} = 277{,}47$ kN; palplanş $M_{max} = 26{,}99$ kN·m/m; kuşak M = 104,05 kN·m

Çelik: EN 1993-1-1 η = 0,221 / 0,511 / 0,358; AISC LRFD destek 0,401, ASD 0,376

Taban kabarması (tabakalı): $c_{side} = 20$ kPa, $\sigma_v(H) = 123$ kPa, FS = 1,83 ≥ 1,5

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 örnekler National Plaza (Chicago) vakası ve modülün açılış kazısıdır (H = 7 m, kum 3 m + kil).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi kazınızın kum ve kil tabakalarını, destek seviyelerini, sürşarjını ve elemanlarınızı GeoTerva'da girin; modül eşdeğer kili, zarfı, 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