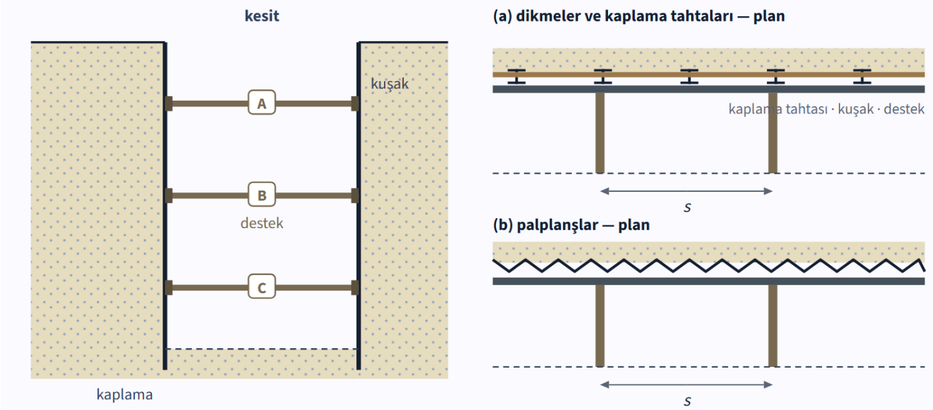
Geoteknik ders sunumu · Palplanş ve destekli kazılar

# Kumda destekli (payandalı) kazı

Ders anlatımı: kumda destekli (payandalı) kazı; Peck basınç zarfı, destek yükleri, palplanş ve kuşak boyutlandırma, çelik doğrulaması ve taban borulanması; her konuda çözümlü örnek.

Kazı destekleme · Peck zarfı (kum) · Destek · kuşak · palplanş · EN 1993 · AISC 360 · Dipte borulanma



Giriş

# Bu derste neler öğreneceğiz?

- Destekli kazıda basıncın **neden Rankine olmadığını** ve **zarfların** ölçülen destek yüklerinden nasıl yapıldığını
- Kum için **Peck zarfı $\sigma_a = 0{,}65\,\gamma\,H\,K_a$** ve birden çok kum tabakasında $K_a$ için üç kural
- **Su** ve **sürşarjın** zarfın yanında ayrı diyagramlar olarak eklenmesini
- Zarftan **destek yüklerine** (mafsallı parçalar, A, $B_1$, $B_2$, C reaksiyonları, P = R·s)
- **Palplanş** ($M_{max}$, S) ve **kuşak** ($M = R\,s^2/8$) boyutlandırmasını; çeliği **EN 1993-1-1 ve AISC 360-22** ile doğrulamayı
- Kum tabanında **borulanma** (çıkış gradyanı, $FS = i_{cr}/i_{çıkış}$) 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: kum ($\gamma$ = 17,6 kN/m³, $\varphi'$ = 32°), derinlik H = 8,00 m, genişlik B = 6,00 m; destekler 1,80 · 4,60 · 7,30 m derinlikte, yatay aralık s = 3,00 m. Kuvvetler duvarın metresi içindir (destek yükleri s ile çarpılmış).

# Destekleme sistemi ve elemanları

KURAM

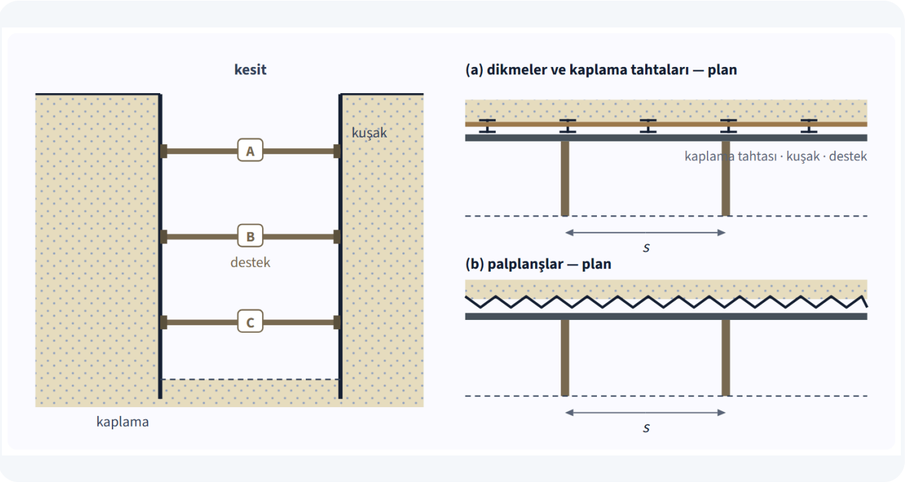
Düşey cepheli derin kazılar (şehir içi bodrum, aç-kapa tünel) geçici bir **destekleme sistemiyle** açık tutulur. İki düzen yaygındır: önceden çakılan **düşey kazıklar** (çelik ya da ahşap) arasına kazı ilerledikçe yatay ahşap kaplama konur; ya da birbirine kenetlenen **palplanşlar** sürekli bir duvar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

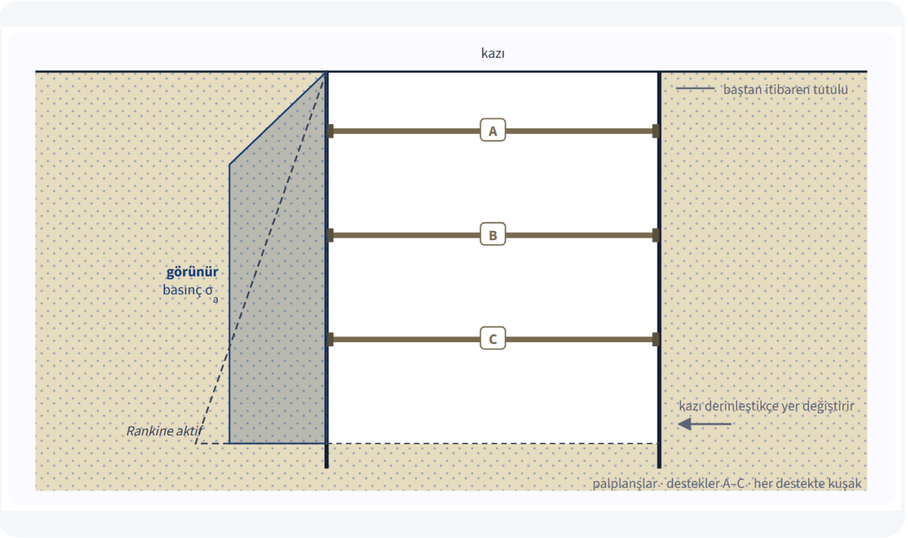
Konsol istinat duvarı tabanından döner ve Rankine aktif basıncı (üstte sıfır, altta en büyük) onu iyi anlatır. **Destekli duvar tersine hareket eder**: ilk destek kazı sığken konur, üst kısım neredeyse hiç kıpırdamaz; sonraki her kademe destek takılmadan önce kazılır ve aradaki süre derinlikle uzar,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

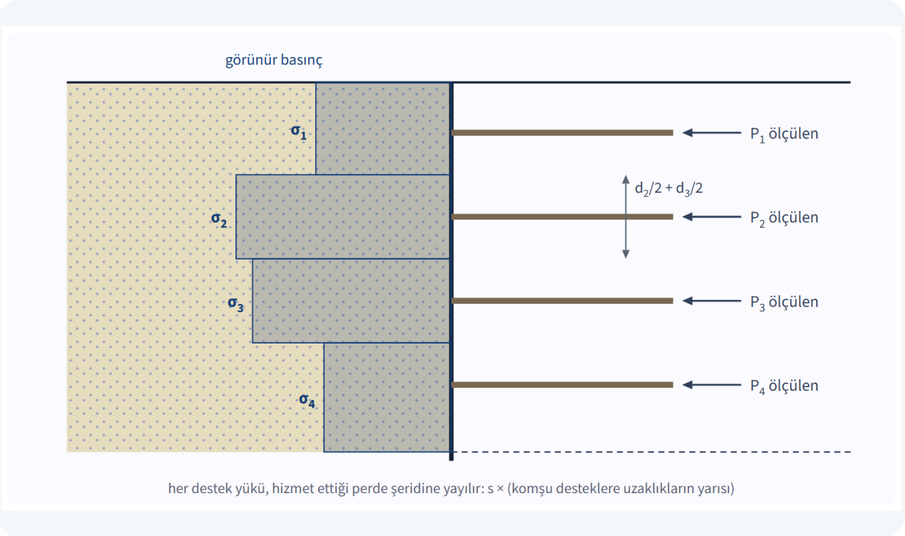
Basınç yerden yere değişir ve her destek karşılaşabileceği **en büyük yüke** göre boyutlanmalıdır. Zarflar bunun için kurulur: araçlı bir kazıda her desteğin yükü ölçülür, desteğin tuttuğu perde şeridine bölünür (yatay aralık s × üstteki ve alttaki desteğe uzaklıkların yarısı) ve bu bant üzerinde **görünür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



# $\sigma_a = 0{,}65\,\gamma\,H\,K_a$, tüm yükseklikte

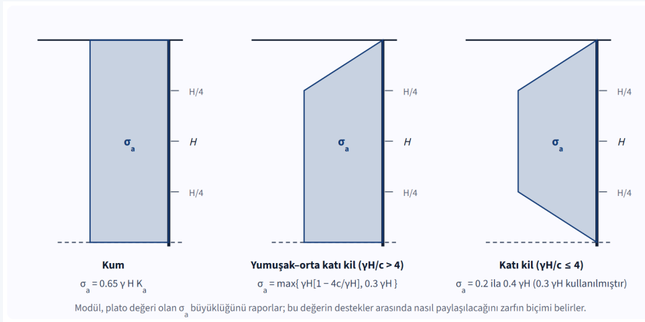
KURAM

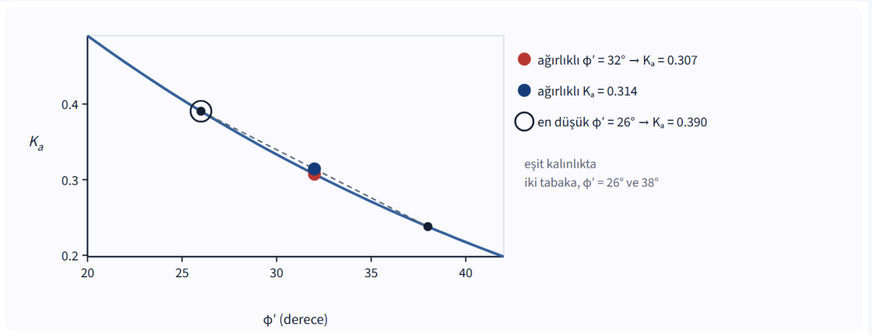
Kumda Peck zarfı bir **dikdörtgendir**: tüm kazı yüksekliğinde tek basınç, Rankine aktif üçgeninin en büyük ordinatının %65'i:

$$\sigma_a = 0{,}65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Zarflar şu koşullarla gelir: kazı derinliği yaklaşık 6 m'den fazla; **yeraltı suyu kazı tabanının altında**; kum drenajlı (boşluk suyu basıncı sıfır).

Zarf tek bir $K_a$ ister; **birden çok kum** için kaynak kural vermez. Üç kural kullanılır ve uyuşmaz, çünkü $K_a$ φ′′nün dışbükey fonksiyonudur (eğri içinde alınan ortalama eğrinin altında kalır): $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, ortalama $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$ ve $K_a(\varphi'_{min})$.



# Soru

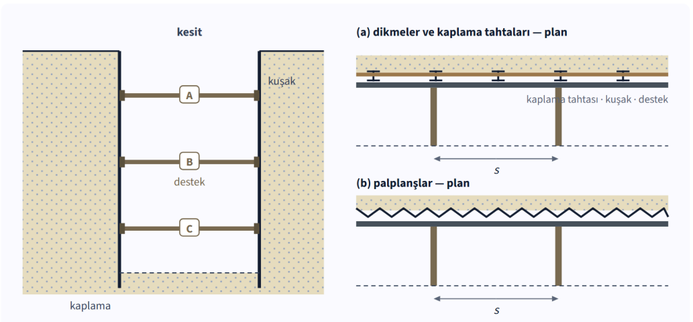
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı | $H = 8{,}00$ **m, tek kum** $\gamma = 17{,}6$ **kN/m³,** $\varphi' = 32^\circ$ |
| Üç tabakalı profil | **0–3 m:** $\gamma = 17$, $\varphi' = 28^\circ$**; 3–6 m:** $18$, $38^\circ$**; 6 m altı:** $18{,}5$, $33^\circ$ **(aynı kazı)** |

## İSTENEN

(a) **$K_a$** ve **$\sigma_a$**; (b) üç tabakalı profilde üç kuralın $K_a$, $\sigma_a$ değerleri.



# Çözüm

ÇÖZÜM

**1** (a) Tek kum

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0{,}3073}$$

$$\sigma_a = 0{,}65\,\gamma H K_a = 0{,}65(17{,}6)(8{,}00)(0{,}3073) = \mathbf{28{,}12}\ \mathrm{kPa}$$

**2** (b) Üç tabaka: kazı yüksekliğine göre ağırlıklı $\bar{\gamma}$ = 17,75 kN/m³ (tabaka kalınlıkları 3 + 3 + 2 m)

| Kural | $K_a$ | $\sigma_a = 0{,}65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa) | $P_{max}$ (kN) |
|---|---|---|---|
| $K_a(\bar{\varphi} = 33{,}0°)$ | 0,2948 | 27,21 | 308,5 |
| ortalama $K_a = \Sigma K_{a,i} H_i / H$ | 0,2983 | 27,53 | 312,1 |
| $K_a(\varphi'_{min} = 28°)$ | 0,3610 | 33,32 | 377,7 |

Tek kumda zarf **28,12 kPa**. Üç kuralın $K_a$ değerleri 0,295 – 0,361 arasında değişir: en düşük φ′ ile hesap ($\sigma_a$ = 33,3 kPa) ortalamalardan %22 büyük değer verir; ortalama alan kurallar eğrinin içinde kalır, **tutucu olan $\varphi'_{min}$**'dir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

# Zarfın yanına eklenir, içine değil

KURAM

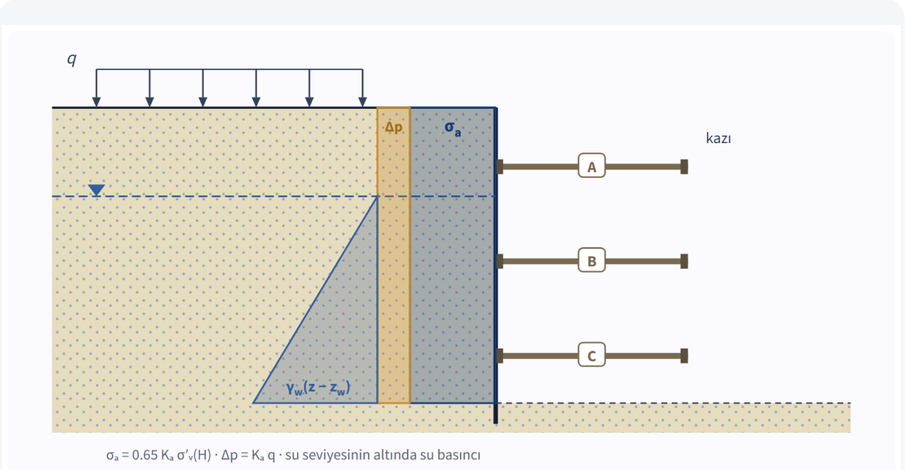
Zarflar suyun taban altında ve kazının yanında yük bulunmadığı kazılardan yapılmıştır. Modül ikisini de zarfın yanında **ayrı diyagramlar** olarak ekler; zarf ölçüldüğü aralığın ötesine ölçeklenmez.

**Su**: Peck kum zarfı efektif gerilme diyagramıdır. Su kazı içinde ise taban seviyesindeki örtü gerilmesi efektif alınır (su üstünde doğal, altında batık birim ağırlık); su perdeye tam yükseklikle ayrıca basar ve destekler ikisini birlikte taşır.

**Sürşarj q** zarfa katılmaz (ampirik 0,65 ona da uygulanırdı); tüm yükseklikte kendi üniform basıncı olarak taşınır.

$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0{,}65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$



# Soru

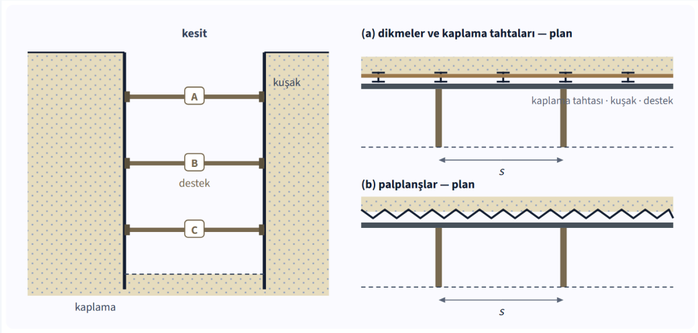
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı | **Örnek 1(a)'daki kazı ($H = 8$ m, $\gamma = 17{,}6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)** |
| Durumlar | **(a) su yok, sürşarj yok; (b) yeraltı suyu $z_w = 3$ m; (c) üniform sürşarj $q = 10$ kPa** |

## İSTENEN

Her durumda **$\sigma_a$**, ek yük ve su basıncı; **toplam yük R** ve en büyük destek yükü.



# Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

**1** (b) Su: efektif örtü gerilmesi ve zarf; su ayrıca tam yükseklikle basar

$$\sigma'_v(H) = 17{,}6(3) + (20 - 9{,}81)(5) = 103{,}75\ \text{kPa}$$

$$\sigma_a = 0{,}65(0{,}3073)(103{,}75) = 20{,}72\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20{,}72(8) + \tfrac{1}{2}(9{,}81)(5)^2 = \mathbf{288{,}41}\ \text{kN/m}$$

Su altında efektif örtü küçülür ($\sigma_a$ 28,12 → 20,72 kPa) ama su perdeye tam yükseklikle basar: R = **288,4 kN/m**.

# Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

**2** (c) Sürşarj: ayrı üniform basınç; (a), (b), (c) özeti

$$\Delta p_q = K_a q = 0{,}3073(10) = 3{,}073\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28{,}12(8) + 3{,}073(8) = 249{,}52\ \text{kN/m}$$

| Durum | $\sigma_a$ (kPa) | Ek (kPa) | R (kN/m) | $P_{max}$ (kN) | $M_{max}$ palplanş (kN·m/m) |
|---|---|---|---|---|---|
| (a) Su yok, q = 0 | 28,12 | — | 224,96 | 318,8 | 45,55 |
| (b) Su $z_w$ = 3 m | 20,72 | u(H) = 49,05 | 288,38 | 376,7 | 37,09 |
| (c) q = 10 kPa | 28,12 | $\Delta p_q$ = 3,07 | 249,52 | 353,5 | 50,53 |

Su zarfı **küçültür** ama su basıncını ekler: R 225,0 → **288,4 kN/m**. Sürşarj zarfa dokunmaz; $\Delta p_q$ = 3,07 kPa ekler (R = 249,5 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:

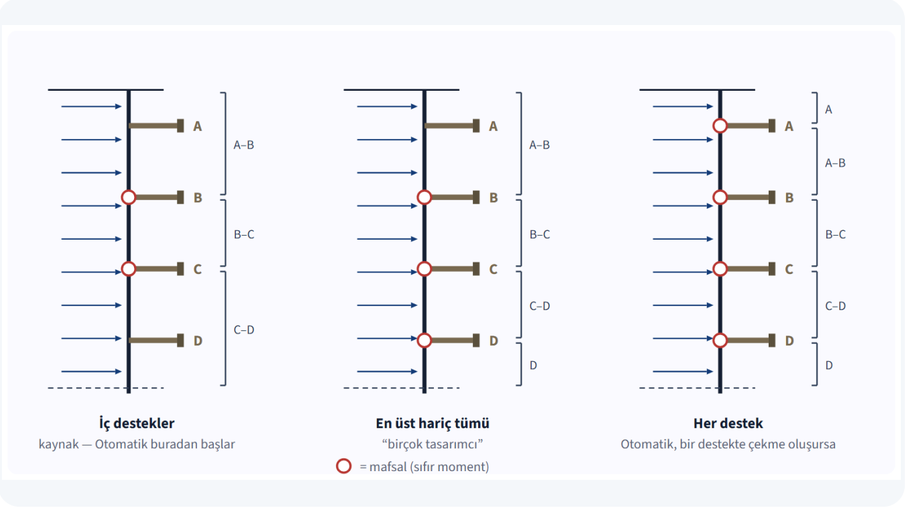
Basınç zarfını ve destek seviyelerini çiz. Palplanşı en üst ve en alt hariç **her destek seviyesinde mafsallı** al (birçok tasarımcı en üst hariç hepsinde).

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

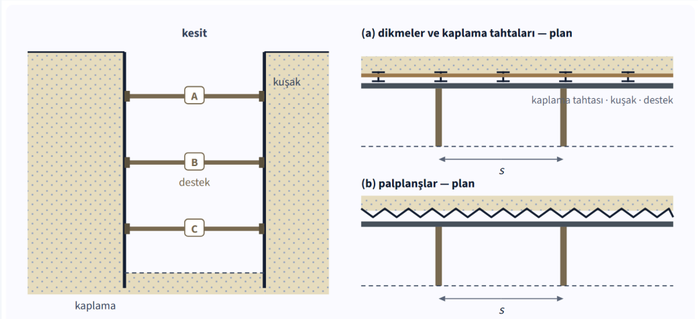
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı | $H = 8,00$ m; $B = 6$ m; destekler $z = 1,80, 4,60, 7,30$ m (A, B, C); yatay aralık $s = 3,00$ m |
| Basınç | Örnek 1(a): sürekli dikdörtgen zarf $\sigma_a = 28{,}12$ kPa; 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 – 4,60 | 129,35 | 2,300 | A (z = 1,80), B (z = 4,60) |
| 2 | 4,60 – 8,00 | 95,61 | 6,300 | B (z = 4,60), C (z = 7,30) |

**2** Birinci parça: ilk mesnede göre moment dengesi

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129{,}35(2{,}300 - 1{,}80)}{4{,}60 - 1{,}80} = \mathbf{23{,}10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106{,}25}\ \mathrm{kN/m}$$

Birinci parça iki mesnedi 106,25 ve 23,10 kN/m ile taşır; en üst desteğin (A) reaksiyonu konsol kısmının yükünü de içerdiğinden büyüktür.

# Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

**3** İkinci parça

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95{,}61(6{,}300 - 4{,}60)}{7{,}30 - 4{,}60} = \mathbf{60{,}20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35{,}41}\ \mathrm{kN/m}$$

**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 | 1,80 | 106,25 | 106,25 | **318,75** |
| B | 4,60 | 23,10 + 35,41 | 58,51 | **175,53** |
| C | 7,30 | 60,20 | 60,20 | **180,60** |

En büyük destek yükü **$P_A$ = 318,75 kN** (seviye A): 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

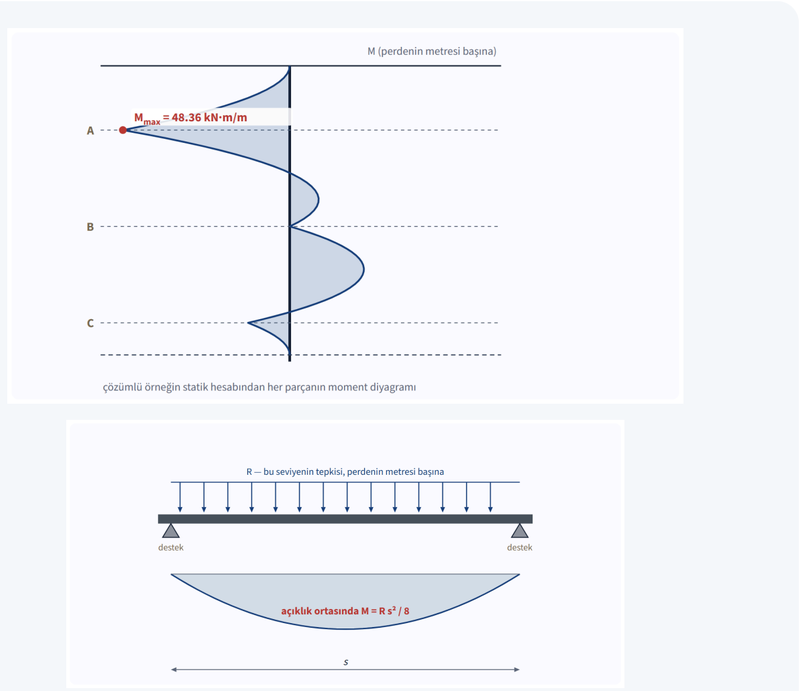
**Palplanş** aynı parçalardan tasarlanır: her parçada en büyük eğilme momenti (kesmenin işaret değiştirdiği yer: açıklık içinde ya da konsolun mesnetle buluştuğu destekte) bulunur; en büyüğü duvarın birim uzunluğu için tasarım momentidir. Gereken mukavemet momenti izinli eğilme gerilmesinden gelir ve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



# Soru

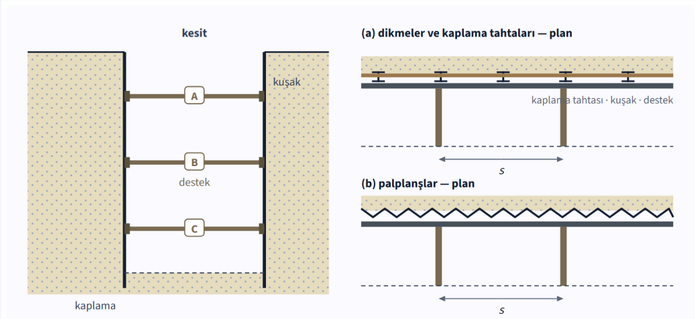
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı | **derinlik $H = 27$ ft (8,23 m), kum $\gamma = 17{,}59$ kN/m³, $\varphi' = 32^\circ$; destekler 6, 15, 24 ft (1,83; 4,57; 7,32 m); yatay aralık 12 ft (3,66 m); B'de mafsal** |
| Çelik | **izinli eğilme gerilmesi $\sigma_{izin} = 165\,474$ 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 – 4,57 | 48,36 | 1,83 |
| 2 | 4,57 – 8,23 | 21,49 | 5,79 |

**2** Gereken mukavemet momenti

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{izin}} = \frac{48{,}36}{165\,474} = 0{,}0002923\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{292{,}3\ cm^3/m}$$

Palplanşta **$M_{max}$ = 48,36 kN·m/m** (parça 1, z = 1,83 m): **S ≥ 292,3 cm³/m**.

# Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

**3** Kuşak: her seviyede basit kiriş (s = 3,658 m)

| Seviye | R (kN/m) | M = R s²/8 (kN·m) | S = M/$\sigma_{izin}$ (cm³) |
|---|---|---|---|
| A | 110,18 | 184,25 | 1 113 |
| B | 57,30 | 95,82 | 579 |
| C | 70,52 | 117,93 | 713 |

En büyük reaksiyon **A seviyesinde** (R = 110,18 kN/m): kuşak **$M_{max}$ = 184,25 kN·m**, **S ≥ 1 113 cm³** ile boyutlanır; diğer seviyelerin kuşakları daha küçük olabilir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

# Tasarım etkileri, sınıf, eğilme ve burkulma

KURAM

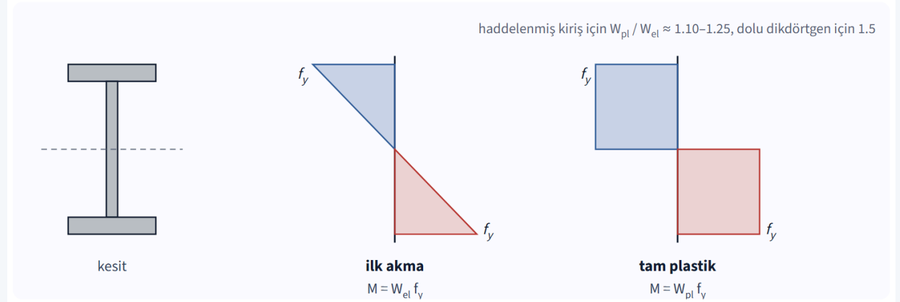
Zarftan çıkan yükler **çalışma değerleridir** (Peck zarfı ölçülen yüklerin üst sınırıdır); bir kez tasarım değerine çıkarılır: $E_d = \gamma_F E_k$. Her eleman kendi çelik sınıfının akma dayanımıyla ($f_y$) doğrulanır; kesit, elemanın **mukavemet momentiyle** (palplanş: metre başına $W_{el}$; kuşak: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

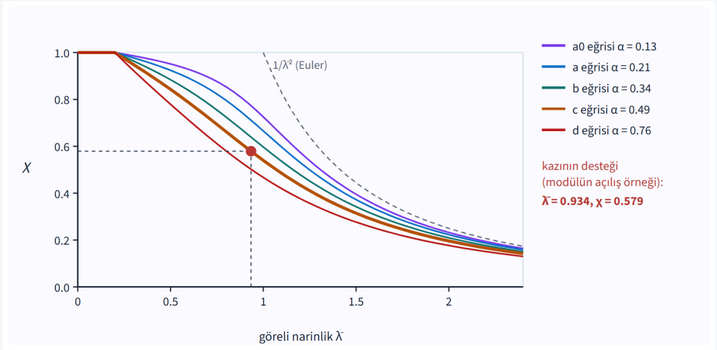
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{sınıf } 1\text{–}2),\ W_{el}\ (\text{sınıf } 3)$$

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

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 $\beta_B$, Z-profilde 1,0). Kuşağın basınç başlığı perdeye yaslandığı için yanal burulmalı burkulma belirleyici değildir.



# Soru

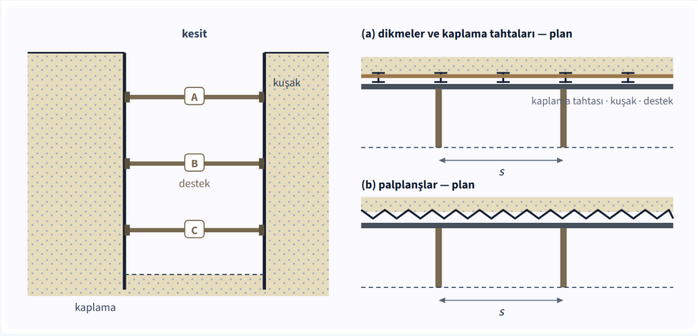
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı ve yükler | **Örnek 1(a)'daki kazı ve Örnek 3'teki yükler: $P_{max} = 318{,}75$ kN (A 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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1{,}35(45{,}55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61{,}50}{165{,}0} = \mathbf{0{,}373}$$

$$\eta_{kuşak} = \frac{1{,}35(119{,}53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161{,}37}{275{,}0} = \mathbf{0{,}587}$$

Palplanş $\eta$ = **0,373**, kuşak $\eta$ = **0,587**: ikisi de yeterlidir ($\eta \le 1$).

# Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

**2** Destek (burkulma): $N_{Ed} = 1{,}35\ P_{max} = 1{,}35(318{,}75) = 430{,}31$ kN

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

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

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

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

$\eta_{destek} = 430{,}3 / 1\,046{,}4 =$ **0,411**. 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

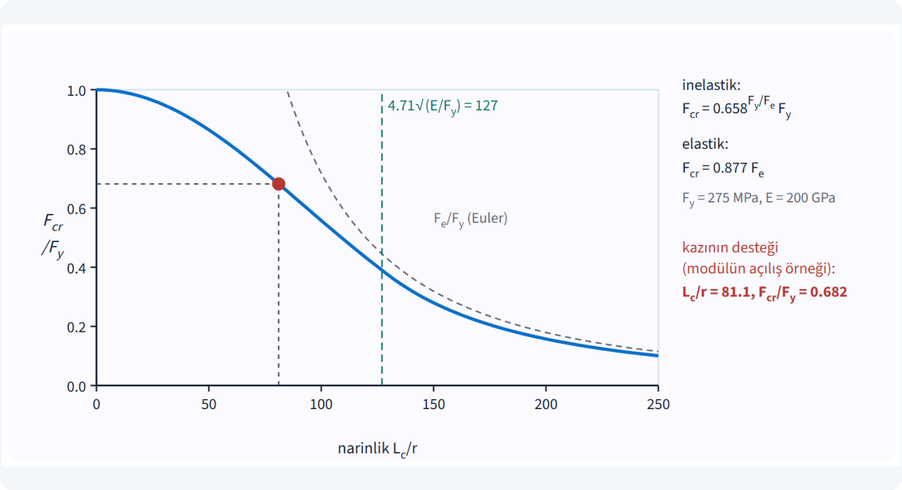
Her eleman, basınç, eğilme ve kesme hükümlerinden bulunan **nominal dayanım $R_n$** ile doğrulanır. LRFD'de yük çarpılır ve dayanım φ ile azaltılır; ASD'de çalışma yükü, dayanımın güvenlik katsayısı Ω'ya bölünmüşüyle karşılaştırılır:

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

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

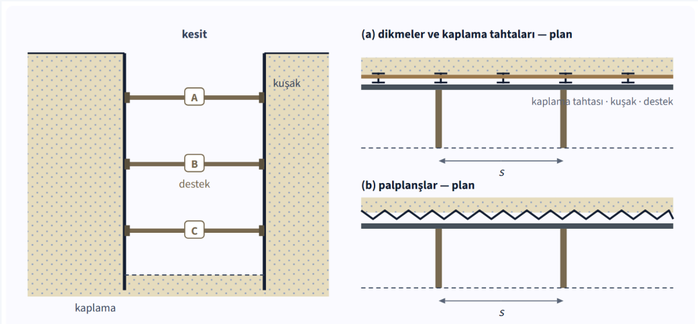
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Kazı ve yükler | **Örnek 1(a)'daki kazı ve Örnek 3'teki yükler: $P_{max} = 318{,}75$ kN (A 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 = 318,75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1{,}6(318{,}75) = 510{,}0\ \text{kN} \le \phi_c P_n = 0{,}90(1\,231{,}5) = 1\,108{,}3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318{,}75\ \text{kN} \le \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1\,231{,}5}{1{,}67} = 737{,}4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0{,}432}$$

Destek: LRFD η = **0,460**, ASD η = **0,432**. Palplanş (LRFD) 0,491, kuşak 0,773; EN 1993-1-1'de 0,373, 0,587 ve 0,411 idi.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

# Çıkış gradyanı ve kritik gradyan

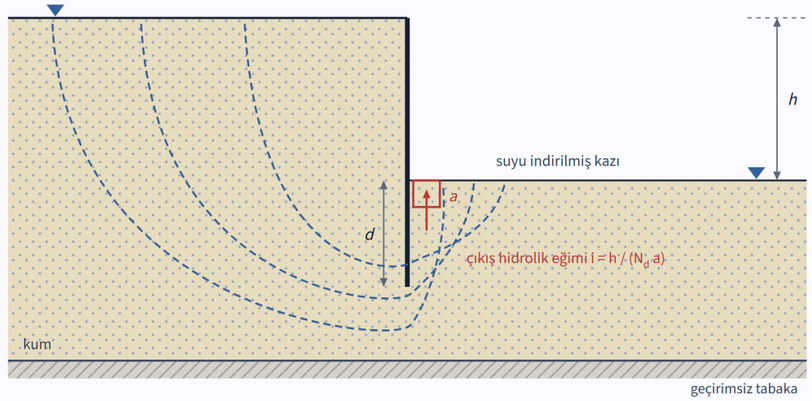
KURAM

Kum tabanı genellikle kararlıdır ve kazı içindeki su dışarıdaki yeraltı suyundan aşağıda durmadığı sürece öyle kalır. Kazı kurutulunca su perdenin altından geçip tabandan yukarı çıkar; çıkış yerindeki yüksek yukarı gradyan taneleri kaldırabilir: **taban kaynar (borulanma)**. Akım ağından perde yanındaki en büyük çıkış gradyanı okunur:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h akım ağındaki yük kaybı, $N_d$ düşüş sayısı, a suyun perde yanında zeminden çıktığı akım elemanının uzunluğudur. $i_{cr}$ çoğu zeminde 0,9–1,1 (ortalama 1); istenen FS **≈ 1,5**.

Derin kumda kazıklı kazı için çıkış gradyanı kuramsal çözülmüştür: iki abaktan m modülü ($2L_2/B$ ve $2L_1/B$ ile) ve $L_2\, i_{çıkış}/h$ bulunur; $i = (L_2 i/h)_{abak} \cdot h/L_2$. $L_1$ dış kumun taban seviyesine derinliği, $L_2$ perdenin taban altındaki gömmesidir.



# Soru

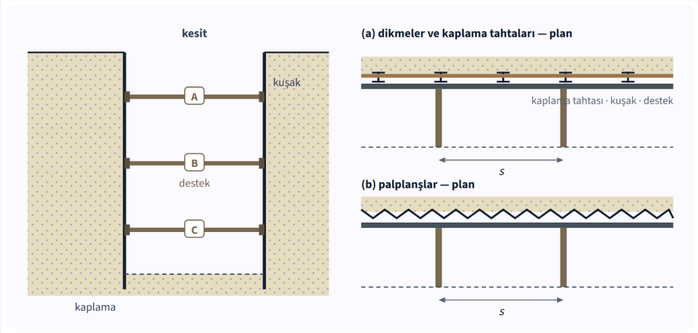
SORU

## Verilenler

| | |
|---|---|
| Akım ağı (açılış kazısı) | **yük kaybı** $h = 3{,}0$ **m, düşüş sayısı** $N_d = 8$**, çıkış elemanı** $a = 1{,}0$ **m;** $i_{cr} = 1{,}0$**;** $FS_{gerekli} = 1{,}5$ |
| Abak örneği (kitap) | $h = 4{,}5$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $B = 5$ m: $2L_1/B = 2$, $B/2L_2 = 0{,}625$, $m \approx 0{,}033$, $L_2 i_{exit}/h = 0{,}54$ |

## İSTENEN

Her iki yolla $\mathbf{i_{çıkış}}$ ve **FS**; gerekli 1,5'e karşı karar.



# Çözüm

ÇÖZÜM

**1** Akım ağı: $i_{çıkış} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3{,}0}{8(1{,}0)} = \mathbf{0{,}375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1{,}0}{0{,}375} = \mathbf{2{,}67} \;\geq 1{,}5 \;\checkmark$$

**2** Abak yolu (derin kum)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{abak} \frac{h}{L_2} = 0{,}54 \cdot \frac{4{,}5}{4} = 0{,}6075$$

$$FS = \frac{1{,}0}{0{,}6075} = \mathbf{1{,}646} \;\geq 1{,}5 \;\checkmark$$

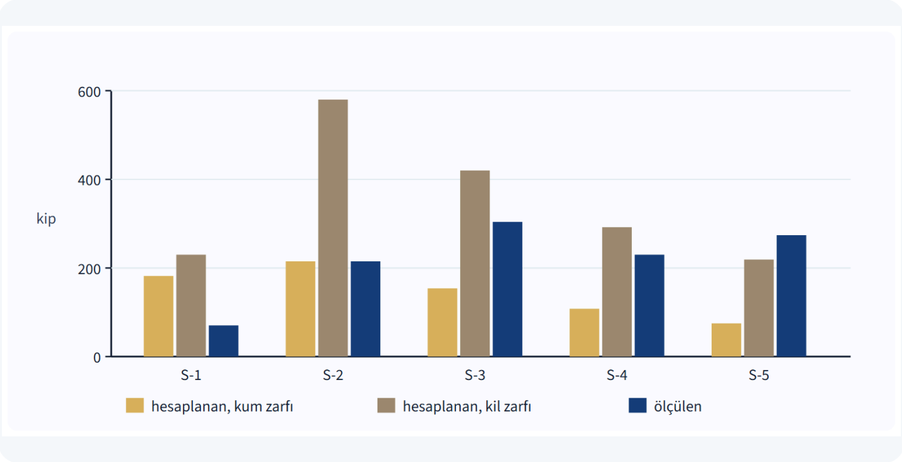
Akım ağında borulanma güvenliği **2,67**, abakta **1,65**: ikisi de gerekli 1,5'in üstünde.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

# Boston ve Chicago vaka incelemeleri

KURAM

**Boston** (test kesiti B): 17,7 m derin, beş destek (3,66 m aralıklı); 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 üstünde yüke göre tasarlanmıştı. **Chicago, National Plaza**: 21,3 m derin, altı destek, 13 ft kum dolgu altında killer; profil eşdeğer bir kile çevrildi: $c_{av}$ = 34,91 kPa, $\gamma_{av}$ = 19,76 kN/m³, $\gamma H/c$ = 12,08 > 4 → $\sigma_a$ = 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; daha sığ kazı verinin dışındadır, modül bunu not eder. **Zarf duvara herhangi bir anda etkiyen gerçek basınç değildir**: güvenli destek yükü verir, duvar sehimi vermez.

**Yeraltı suyu** taban altında varsayılır; modül kum zarfını efektif örtüde tutar, su yukarıdaysa hidrostatik basıncı yanına ekler; kazıya sızma tabanda kontrol edilir.

**Palplanş** belirli destek seviyelerinde mafsallı belirli kirişler zinciri sayılır; kendi rijitliği ve taban altındaki gömme kullanılmaz. **Kuşaklar** desteklerarası basit açıklıktır (birkaç desteği geçen sürekli kuşak için tutucu).

Çelik EN 1993-1-1 ile doğrulanır; sınıf 4 kesitler tasarlanmaz, kuşakların yanal burulmalı burkulması kontrol edilmez. AISC 360-22 LRFD/ASD seçeneği vardır.

Perdenin bir miktar yanal hareketi beklenir: miktar, kademe kazılıp kuşak ve desteklerin takılması arasındaki süreye bağlıdır. Hareket çevre zeminde **zemin kaybına** yol açar; 150 vakadan, en büyük oturma yumuşak kilde kazı derinliğinin ≈ %1,1'i, sert kilde %0,2, kohezyonsuz zeminde %0,3'tür.

Özet

# Akılda kalacak noktalar

**Zarf**: destekli duvar üstünden döner; basınç Rankine değil, ölçülen yüklerin çevresine çizilen ampirik diyagramdır. **Kumda dikdörtgen**: $\sigma_a = 0{,}65\ \gamma\ H\ K_a$ (örnek: 28,12 kPa)

**Birden çok kum**: $K_a(\bar{\varphi})$, ortalama $K_a$, $K_a(\varphi'_{min})$ uyuşmaz (dışbükey); $\varphi'_{min}$ tutucudur

**Su ve sürşarj ayrı**: su efektif örtüyü küçültür ama tam hidrostatik basınç ekler (R: 225 → 288 kN/m); q ek $\Delta p = K_a q$ getirir

**Destek yükü**: zarf mafsallarda parçalara ayrılır, reaksiyonlar statikle bulunur, P = (toplanan reaksiyonlar)·s; örnekte $P_A$ = 318,75 kN

**Boyutlandırma**: $S = M_{max}/\sigma_{izin}$ (palplanş), kuşak $M = R\ s^2/8$; kitap kazısında palplanş 292 cm³/m, kuşak 1 113 cm³

**Çelik**: EN 1993-1-1 η = 0,373 / 0,587 / 0,411 (palplanş / kuşak / destek burkulması); AISC LRFD destek 0,460, ASD 0,432

**Borulanma**: $FS = i_{cr}/i_{çıkış} \geq 1{,}5$; örnekte 2,67 (akım ağı) ve 1,65 (abak)

# 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.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

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 kazılardır (kitap kazısı: 27 ft, γ = 112 pcf, φ′ = 32°; modülün açılış kazısı: 8 m).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

# Teoriden uygulamaya

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

Modülü açın →

Teori sayfası →

**Telefonla açın**
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com