

Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



Θεμελιώσεις

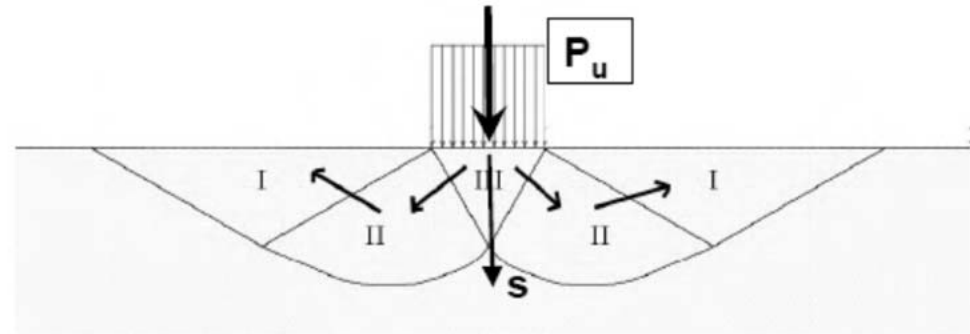
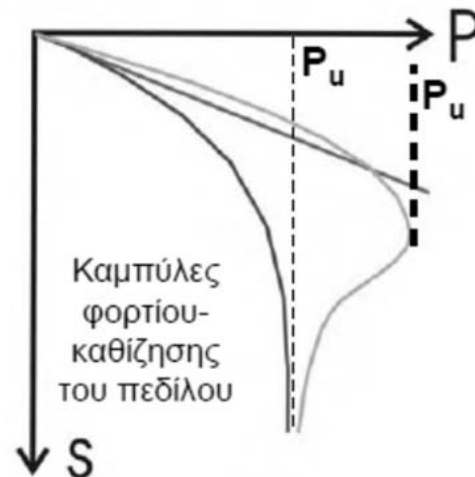
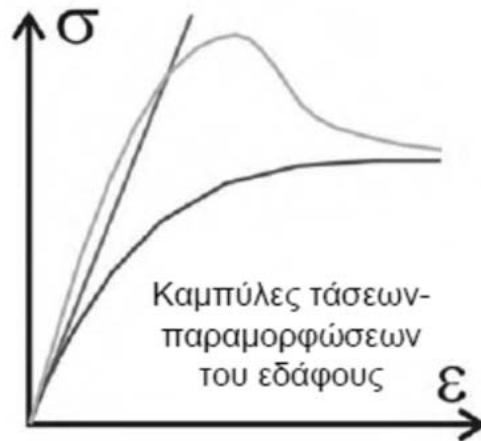
Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων

Γενικά...

Βασικές εξισώσεις...

Τμήμα των διαφανειών έχει συνταχθεί σύμφωνα με τις σχετικές διαφάνειες του καθηγητή του Ε.Μ.Π. Μιχάλη Καββαδά.

Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων (Πεδίλων)



	Γραμμική συμπεριφορά σ-ε του εδάφους (ιδεατή)
	Κρατυνόμενη συμπεριφορά σ-ε (χαλαρές άμμοι, μαλακές NC άργιλοι)
	Χαλαρούμενη συμπεριφορά σ-ε (πυκνές άμμοι, σκληρές OC άργιλοι)

Η μέγιστη τιμή P_u του φορτίου του πεδίου, ή η αντίστοιχη μέγιστη τιμή της πίεσης :

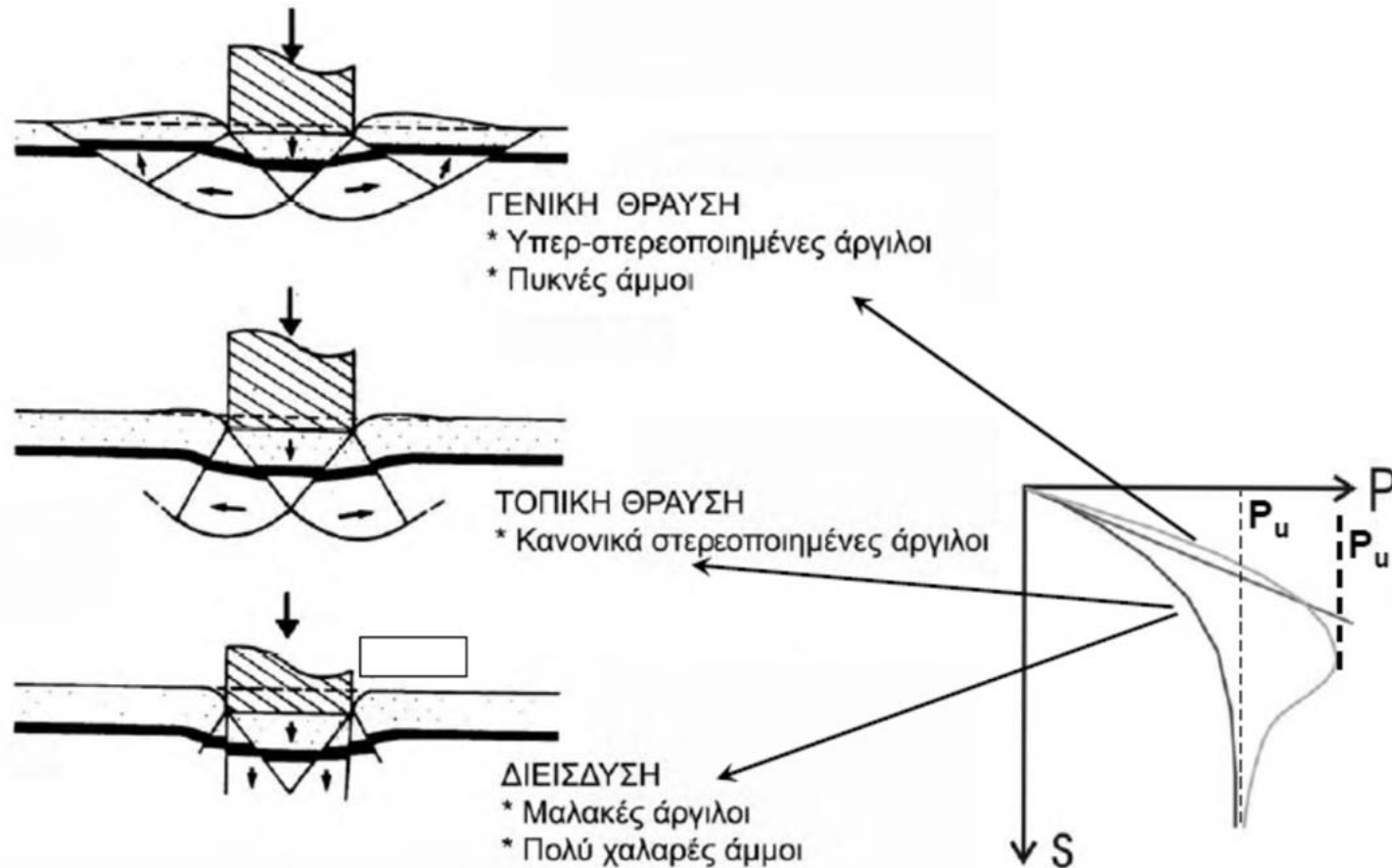
$$p_u = P_u / A$$

ονομάζεται «φέρουσα ικανότητα»

Φέρουσα Ικανότητα

Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

Μορφές αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων

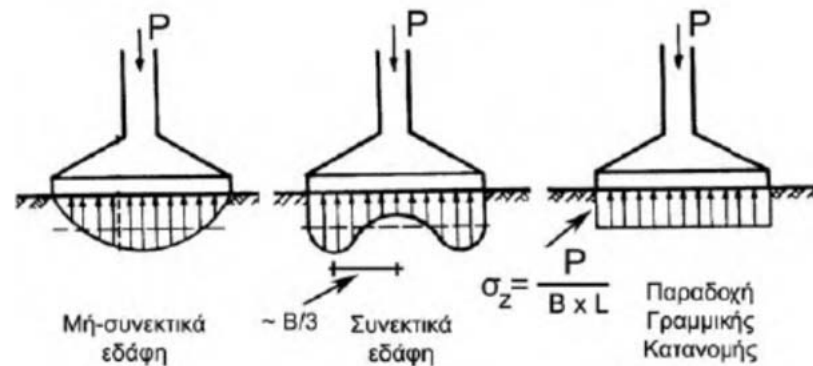
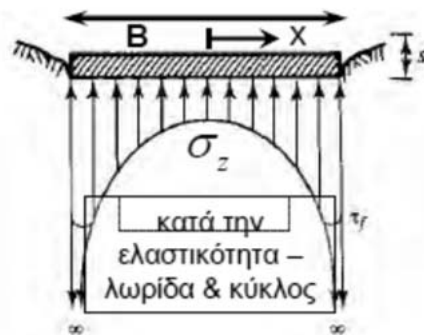


Τάσεις κάτω από το θεμέλιο

1. Ακαμπτα πέδιλα

Πρόβλεψη της θεωρίας ελαστικότητας για την κατανομή των τάσεων στη βάση ακάμπτου λωριδωτού πεδίου εύρους (B) με ομοιόμορφη επιφόρτιση (πίεση) $q = P / (B L)$:

$$\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{B}\right)^2}}$$



Πρόβλεψη της θεωρίας ελαστικότητας για την κατανομή των τάσεων στη βάση ακάμπτου κυκλικού πεδίου διαμέτρου (B) με ομοιόμορφη επιφόρτιση (πίεση) $q = P / (\pi B^2/4)$:

$$\sigma_z = \frac{q}{2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{B}\right)^2}}$$

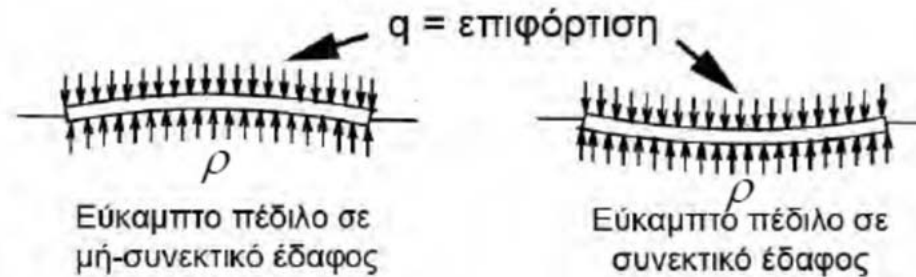
Συμπέρασμα : Οι προβλέψεις της θεωρίας ελαστικότητας έχουν περιορισμένη ακρίβεια :

- Στα μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη, επειδή το E δεν είναι σταθερό (εγκλιβωτισμός)
- Στα συνεκτικά (αργίλικα) εδάφη, λόγω αστοχίας του εδάφους στα άκρα του πεδίου

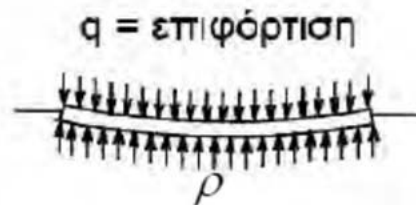
Τάσεις κάτω από το θεμέλιο

Κατανομές τάσεων στη βάση θεμελίων

2. Απολύτως εύκαμπτες θεμελιώσεις (π.χ. δεξαμενές)



Κατανομή καθιζήσεων (ρ) στη βάση απολύτως εύκαμπτης θεμελίωσης που φορτίζεται με ομοιόμορφη πίεση (q). Οι τάσεις είναι προφανώς ομοιόμορφες (εύκαμπτο πέδιλο)



← Πρόβλεψη της θεωρίας ελαστικότητας για την κατανομή των καθιζήσεων (ρ) στη βάση απολύτως εύκαμπτου πεδίου

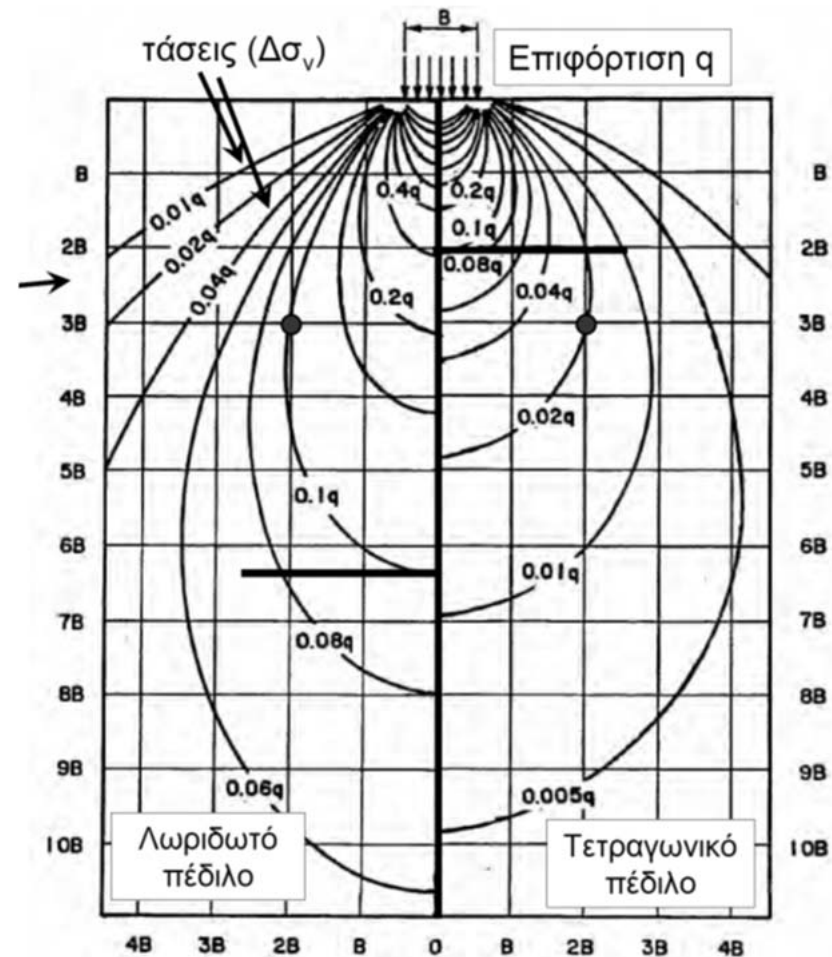
Συμπέρασμα : Οι προβλέψεις της θεωρίας ελαστικότητας έχουν περιορισμένη ακρίβεια, κυρίως στα μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη επειδή το μέτρο ελαστικότητας (E) είναι μεταβλητό (εξαρτάται από τον εγκιβωτισμό)

Απομείωση πρόσθετων τάσεων με το βάθος (ανά είδος θεμελίωσης)

Βάθος επιρροής Φόρτισης

Λωρίδα:
 $z_{\max} \approx 6B$

Τετραγωνικό:
 $z_{\max} \approx 2B$





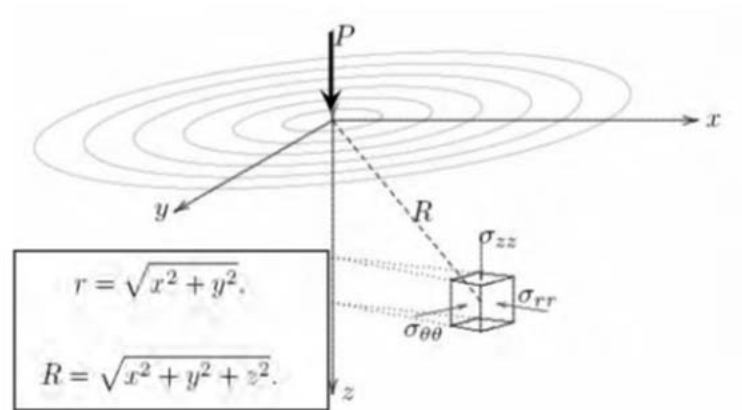
Πως το λύνω;

- ▶ Αναλυτικές μέθοδοι (Analytical methods)
- ▶ Αριθμητικές μέθοδοι (Numerical methods)
- ▶ Μέθοδοι «οριακής ανάλυσης» ή «οριακής ισορροπίας» (Limit analysis methods)

Πως το λύνω; Αναλυτικές μέθοδοι...

1. Αναλυτικές λύσεις :

- ικανοποιούν επακριβώς όλες τις συνθήκες
- μπορούν να εφαρμοσθούν μόνον σε λίγες περιπτώσεις (π.χ. πρόβλημα Boussinesq)



$$\sigma_{zz} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{R^5},$$

$$\sigma_{rr} = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{3r^2 z}{R^5} - (1 - 2\nu) \frac{1}{R(R+z)} \right],$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P}{2\pi} \frac{1 - 2\nu}{R^2} \left(\frac{R}{R+z} - \frac{z}{R} \right),$$

$$\sigma_{rz} = \frac{3P}{2\pi} \frac{r z^2}{R^5},$$

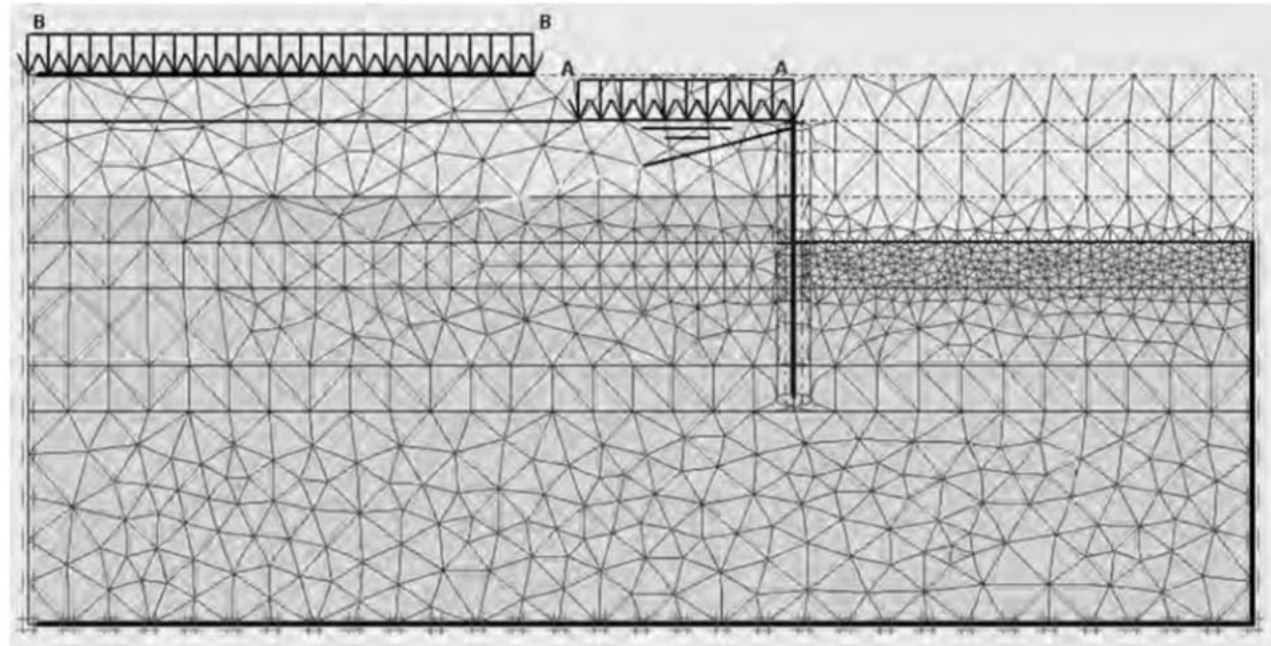
$$u_r = \frac{P(1 + \nu)}{2\pi E R} \left[\frac{r^2 z}{R^3} - (1 - 2\nu) \left(1 - \frac{z}{R} \right) \right],$$

$$u_\theta = 0,$$

$$u_z = \frac{P(1 + \nu)}{2\pi E R} \left[2(1 - \nu) + \frac{z^2}{R^2} \right].$$

Πως το λύνω; Αριθμητικές μέθοδοι...

2. Αριθμητικές λύσεις (π.χ. Πεπερασμένα Στοιχεία, Πεπερασμένες Διαφορές, Συνοριακά Στοιχεία) :
 - ικανοποιούν «κατά προσέγγιση» όλες τις συνθήκες
 - μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλα τα προβλήματα
 - απαιτούν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή





Πως το λύνω; «Οριακή ανάλυση»...

3. Λύσεις «Οριακής Ανάλυσης» (Limit Analysis) :

- ικανοποιούν ορισμένες μόνον συνθήκες
- μπορούν να εφαρμοσθούν σε αρκετά προβλήματα (θεωρία Πλαστικότητας)
- παρέχουν μόνον το (οριακό) φορτίο που προκαλεί την αστοχία (P_u)

Μέθοδοι «οριακής ανάλυσης» :

1. Μέθοδοι «κατώτερου ορίου» (lower bound) ή «στατικώς αποδεκτές» (statically admissible) :

- Ικανοποιούν τις εξής συνθήκες :
 - Εξισώσεις ισορροπίας
 - Κριτήρια αστοχίας (π.χ. Coulomb)
 - Συνοριακές συνθήκες τάσεων
- Η επίλυση δίνει οριακό φορτίο μικρότερο από το πραγματικό (κατώτερο όριο)

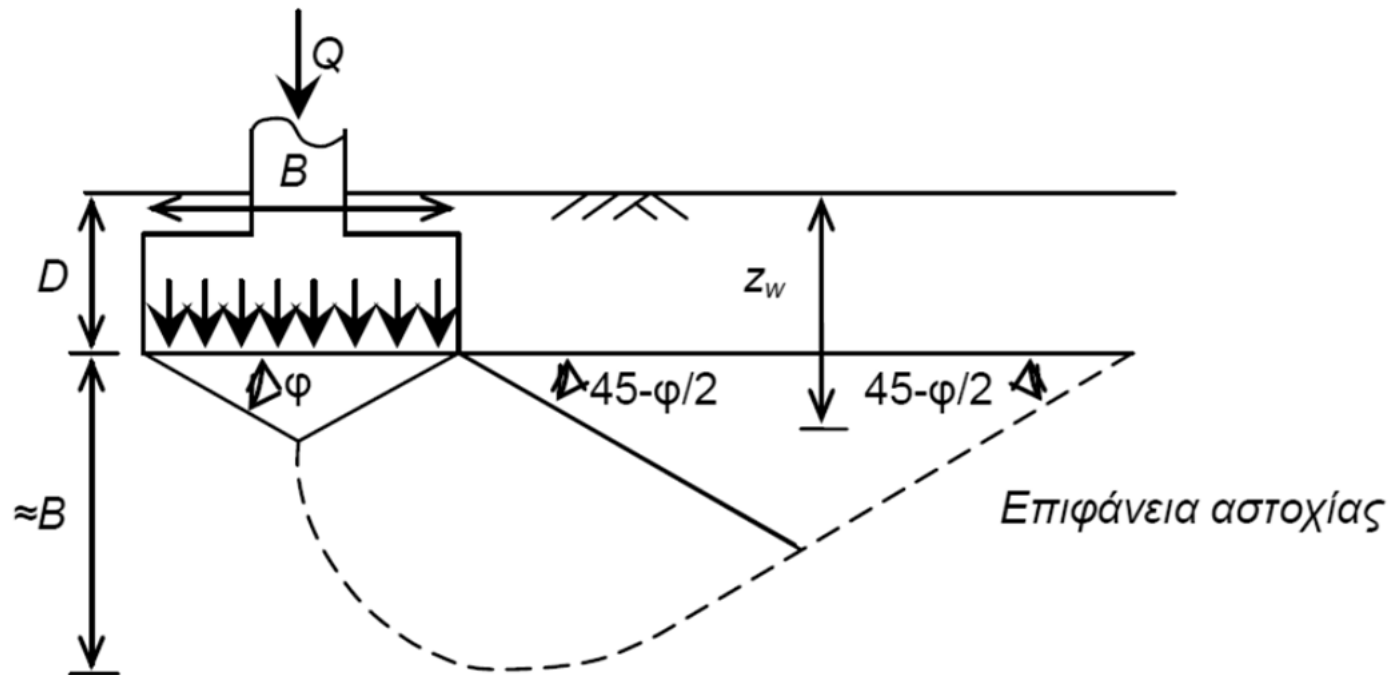
2. Μέθοδοι «ανωτέρου ορίου» (upper bound) ή «κινηματικώς αποδεκτές» (kinematically admissible) :

- Ικανοποιούν τις εξής συνθήκες :
 - Εξισώσεις συμβιβαστού παραμορφώσεων (οι μετακινήσεις είναι συνεχείς)
 - Κριτήρια αστοχίας (π.χ. Coulomb)
 - Συνοριακές συνθήκες μετακινήσεων
- Η επίλυση δίνει οριακό φορτίο μεγαλύτερο από το πραγματικό (ανώτερο όριο)

Λύσεις που αποτελούν ταυτόχρονα «ανώτερο» και «κατώτερο» όριο είναι ακριβείς

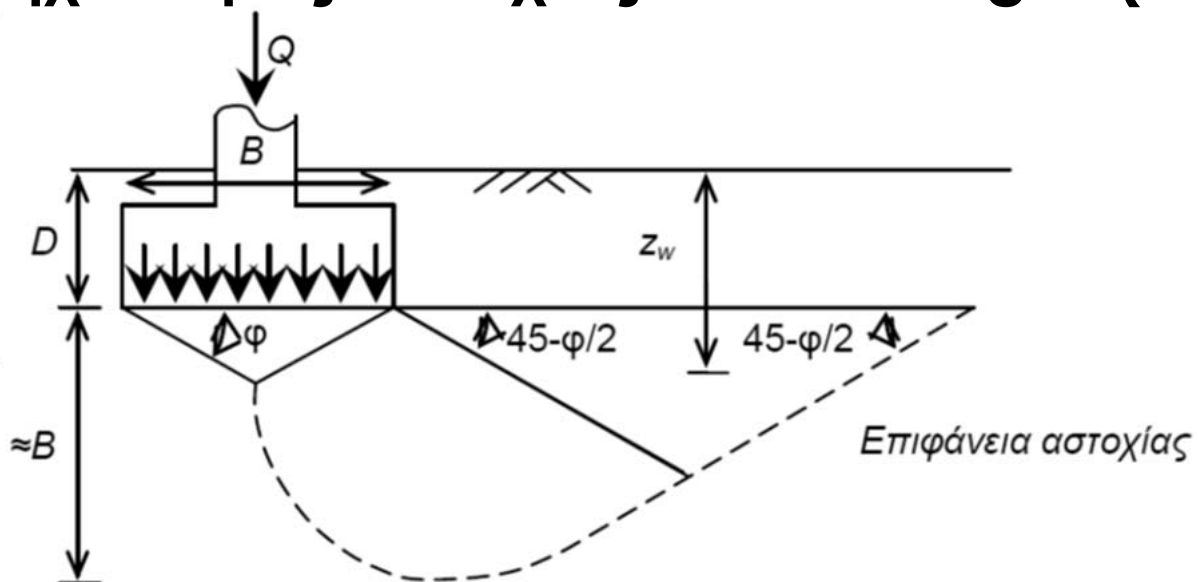
Φέρουσα Ικανότητα... Μορφή αστοχίας...

Μηχανισμός αστοχίας κατά Terzaghi (1943)



Φέρουσα Ικανότητα Βασικοί όροι...

Μηχανισμός αστοχίας κατά Terzaghi (1943)



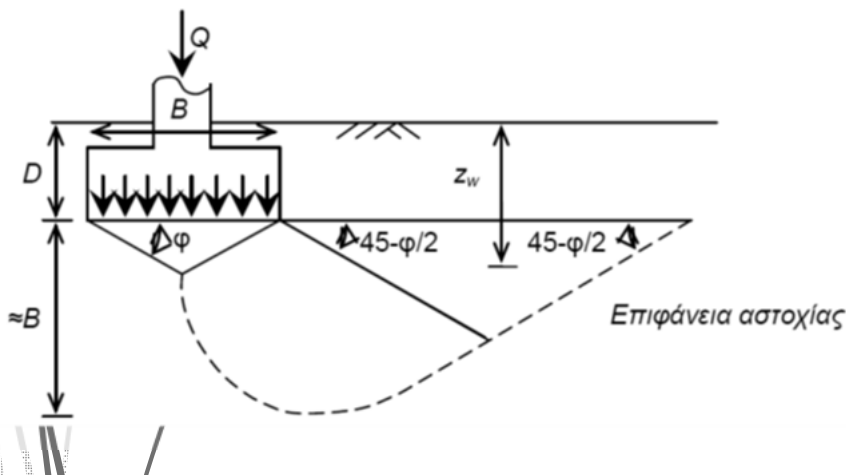
Βασικοί όροι εξίσωσης Φέρουσας Ικανότητας (Λωρίδα)

$$p_u = c \cdot N_c + (q + \gamma \cdot D) \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 Όρος Όρος Όρος
 συνοχής αντιστηρικτικής πλάτους
 πίεσης

Εξισώσεις κατά Terzaghi (1943)

$$q_{ult} = cN_c s_c + p'_o N_q + 0.5 \gamma'_2 B N_\gamma s_\gamma$$



Τύπος πεδίου:	Απειρόμηκες	Κυκλικό	Τετράγωνο	Ορθογώνιο
$s_c =$	1.0	1.3	1.3	$1 + 0.3B/L$
$s_\gamma =$	1.0	0.6	0.8	$1 - 0.2B/L$

ϕ ($^\circ$)	0	5	10	15	20	25	30	34	35	40	45	48	50
N_c	5.7*	7.3	9.6	12.9	17.7	25.1	37.2	52.6	57.8	95.7	172.3	258.3	347.5
N_q	1.0	1.6	2.7	4.4	7.4	12.7	22.5	36.5	41.4	81.3	173.3	287.9	415.1
N_γ	0.0	0.5	1.2	2.5	5.0	9.7	19.7	36.0	81.3	100.4	297.5	780.1	1153.2

* $N_c = 1.5\pi + 1$ (Terzaghi, 1943)

Επιρροή στάθμης υδροφόρου ορίζοντα...

ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

$$z_w < D: p_o' = \gamma_{1,dry} z_w + (\gamma_{1,sat} - \gamma_w)(D - z_w) = \gamma_{1,dry} z_w + \gamma_{1,sat}'(D - z_w)$$

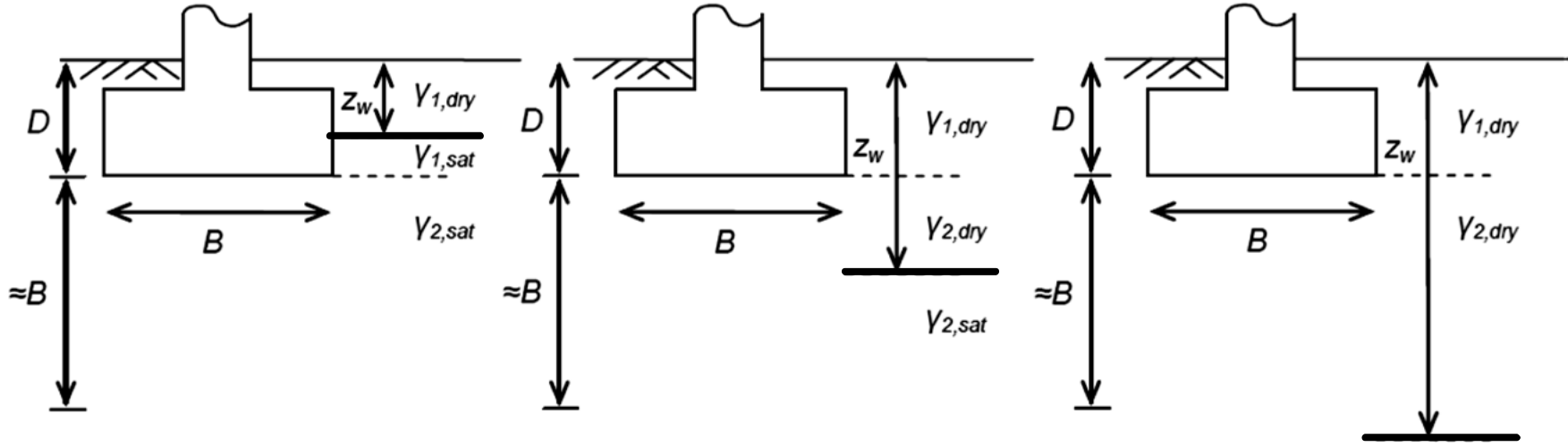
$$z_w \geq D: p_o' = \gamma_{1,dry} D$$

$$z_w < D: \gamma_2 = \gamma_{2,sat} - \gamma_w$$

$$z_w \geq D + B: \gamma_2 = \gamma_{2,dry}$$

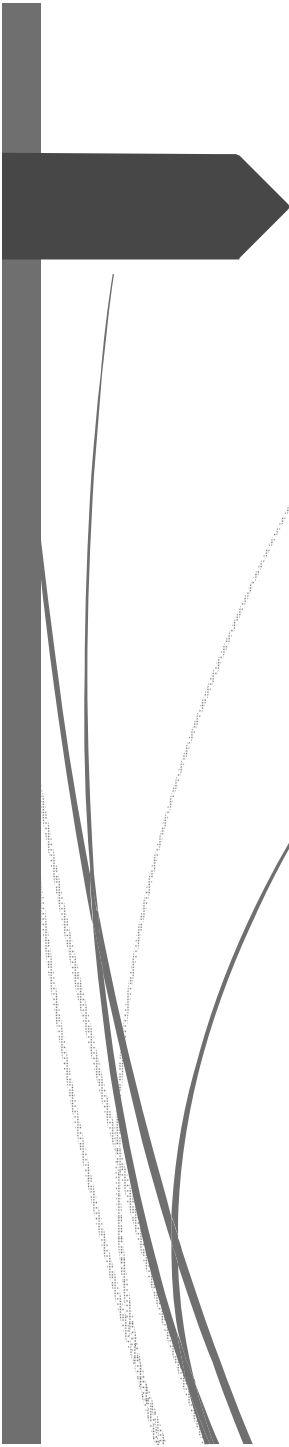
$$D + B > z_w \geq D: \gamma_2 = \gamma_{2,dry}(z_w/B) + \gamma_2'(B - z_w)/B = \gamma_{2,dry}(z_w/B) + (\gamma_{2,sat} - \gamma_w)(B - z_w)/B$$

όπου $Z_w = z_w - D$ το βάθος του νερού κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης



ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι υπολογισμοί γίνονται πάντα με τα πλήρη (κορεσμένα) γ_1, γ_2



Φέρουσα Ικανότητα

Ένα απλό παράδειγμα (Terzaghi 1943)

Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα p_u ενός θεμελίου πλάτους $B=2\text{m}$ και μήκους $L=10\text{m}$, υπό αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες, το οποίο εδράζεται σε βάθος $D=2\text{m}$ σε ένα κορεσμένο αργιλικό έδαφος (υδροφόρος ορίζοντας στην επιφάνεια) με τα ακόλουθα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά:

$$c = 10\text{kPa}$$

$$\phi = 26^\circ$$

$$c_u = 50\text{kPa}$$

$$\gamma_{\text{κορ}} = 20\text{kN/m}^3$$

Τι θα άλλαζε στο παράδειγμα για $z_w=3\text{m}$?

Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



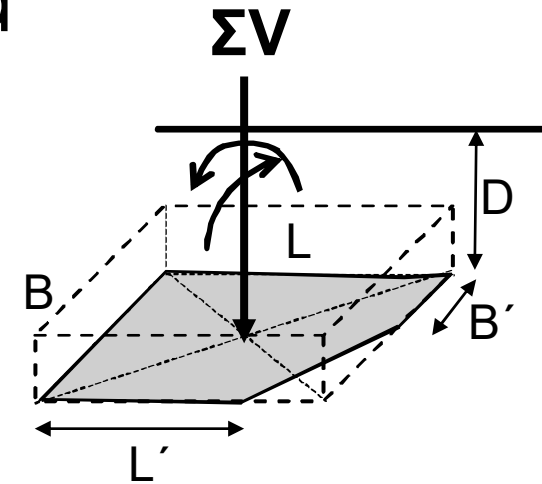
Θεμελιώσεις

Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων
Συντελεστές Ασφαλείας...

Φέρουσα Ικανότητα

Συντελεστής ασφαλείας

$$SF = \frac{\text{ΑΝΤΟΧΗ}}{\text{ΔΡΑΣΗ}} = \frac{P_u}{\Sigma V} = \frac{p_u \cdot (B' \cdot L')}{\Sigma V}$$

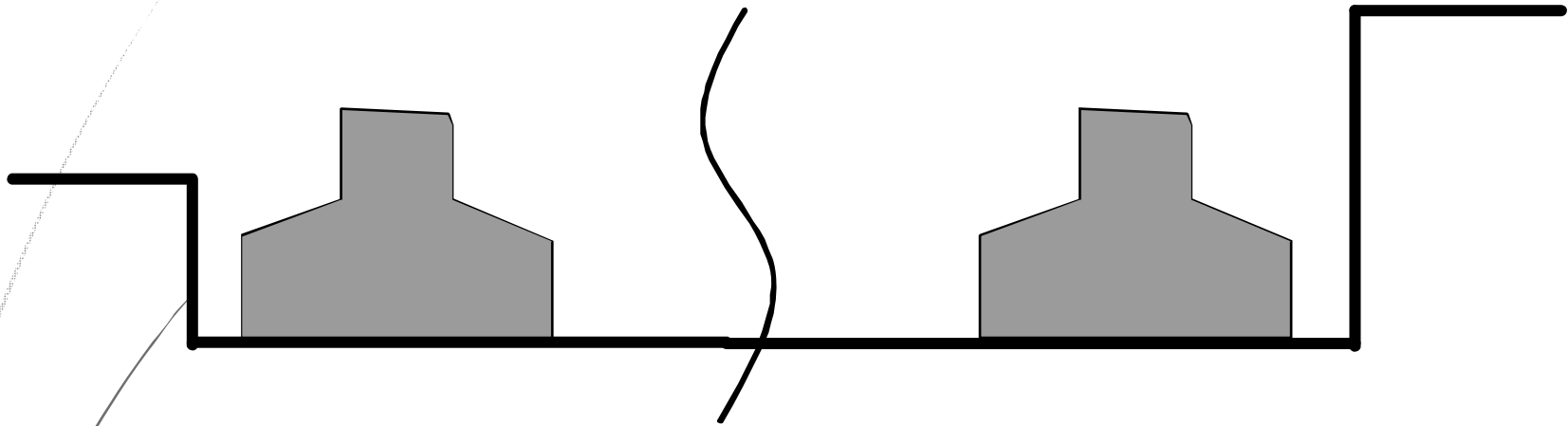


Πιθανές τιμές για το συντελεστή ασφαλείας με την κλασική μέθοδο (ενιαίος συντελεστής ασφαλείας)

Είδος έργου	Γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών	
	Καλή	Περιορισμένη
Δομικά έργα	2	3 *
Οδικές γέφυρες	2.5 *	3.5 *
Σιδηροδρομικές γέφυρες	3 *	4 *
Τοίχοι αντιστηρίξεως	1.3	1.5
Επιχώματα	1.5	2

* Για προσωρινά έργα, οι τιμές μπορούν να απομειωθούν κατά 25%, αλλά πάντοτε FS > 2

Χωρίς επανεπίχωση...



Όταν δεν γίνεται επανεπίχωση, ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να εφαρμόζεται στην **καθαρή οριακή τάση θραύσης** (*net ultimate bearing capacity*), q_{net}
Δηλαδή το βάρος p_o των αφαιρούμενων γαιών δε λαμβάνεται υπόψη στην αντοχή αλλά και στη δράση...

Καθαρή οριακή τάση θραύσης:

$$q_{net} = q_{ult} - p_o$$

Ολική επιτρεπόμενη τάση:

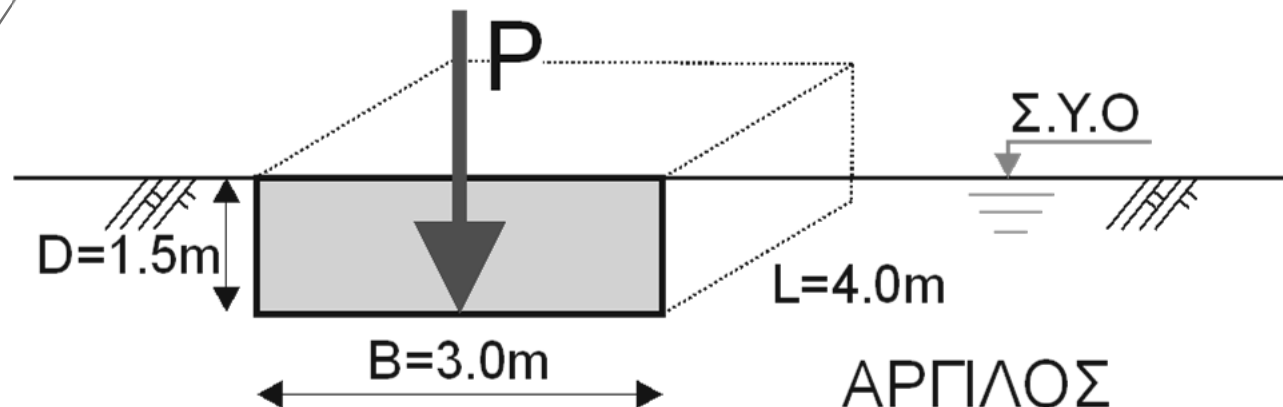
$$\sigma_{επ} = (q_{net}/FOS) + p_o$$

Συντελεστής ασφαλείας:

$$FOS = q_{net} / (q_{ανωδ} - p_o)$$

Άσκηση 1

Για το ορθογωνικό θεμέλιο $B \times L$ (3m x 4m) του Σχήματος 1, που εδράζεται σε αργιλικό σχηματισμό, να υπολογιστεί το συνολικό κατακόρυφο φορτίο P - συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους του πεδίου ($G_{\theta\epsilon\mu}$) - ώστε ο συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης θεμελίωσης να είναι $SF=2.0$. Να ληφθεί υπόψη φόρτιση τόσο υπό αστράγγιστες (α) όσο και υπό στραγγισμένες συνθήκες (β).



ΑΡΓΙΛΟΣ
 $\gamma=20\text{kN/m}^3$
 $C_u=35\text{kPa}$
 $c=10\text{kPa}$, $\varphi=25^\circ$



Άσκηση 2

Να υπολογιστεί το απαιτούμενο βάθος θεμελίωσης τετραγωνικού θεμελίου διαστάσεων $2\text{m} \times 2\text{m}$, ώστε ο συντελεστής ασφάλειας έναντι φέρουσας ικανότητας να ισούται με 2. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στη στάθμη θεμελίωσης.

- ▶ Κατακόρυφο φορτίο $= 1000\text{kN}$
- ▶ Συνοχή, $c = 30\text{kPa}$
- ▶ Γωνία εσωτερικής τριβής, $\varphi = 10^\circ$
- ▶ Ειδικό βάρος εδάφους, $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$
- ▶ Ειδικό βάρος νερού, $\gamma_w = 10\text{ kN/m}^3$

Για το βάθος που υπολογίσατε, να βρείτε τον συντελεστή ασφάλειας εάν στο κέντρο του θεμελίου δρά ροπή (σε μία διεύθυνση) $M = 250\text{kNm}$.

Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



Θεμελιώσεις

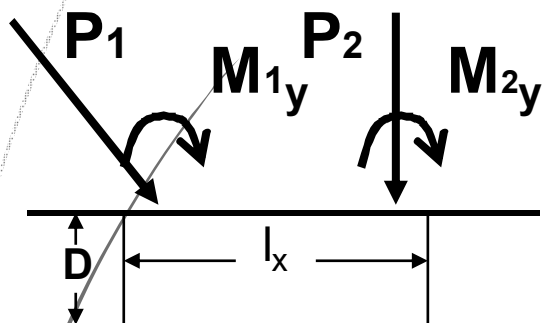
Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων III

Μη κεντρικά φορτία – Ροπές – Συντελεστής Ασφαλείας II

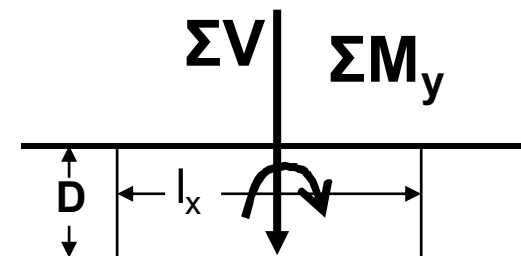
Φέρουσα Ικανότητα

Ροπές στη βάση/ μη κεντρικό φορτίο

Μεταφορά των δυνάμεων στο επίπεδο θεμελίωσης και υπολογισμός εκκενρότητας



$$\frac{\Sigma V = \Sigma P + G_{\theta\epsilon\mu}}{\Sigma M_x}$$



$$e_x = \frac{\Sigma M_y}{\Sigma V}$$

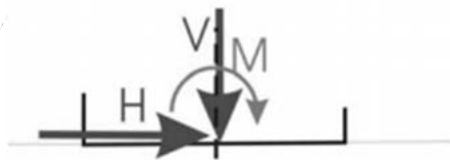
και αντίστοιχα

$$e_y = \frac{\Sigma M_x}{\Sigma V}$$

Τι σημαίνει εκκενρότητα για τις τάσεις κάτω από το θεμέλιο;

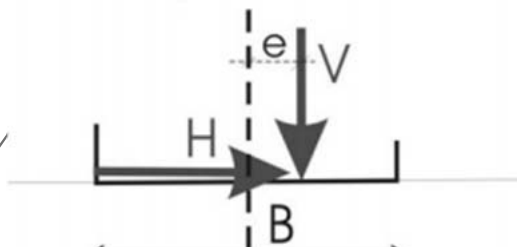
Φέρουσα Ικανότητα

Εκκεντρότητα (Παραδοχή Γραμμικής Κατανομής)



Κατανομές τάσεων στη βάση ορθογωνικού πεδίου
(Παραδοχή Γραμμικής Κατανομής)

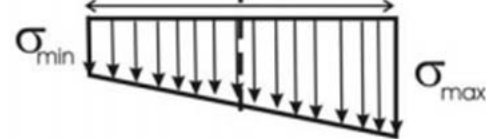
$$\text{Εκκεντρότητα : } e = \frac{M}{V} \quad \text{Μέση τάση : } \sigma = \frac{V}{BL}$$



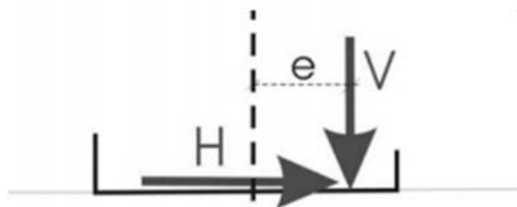
1. Μικρή εκκεντρότητα : $0 \leq e \leq B/6$

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 6 \frac{e}{B} \right) \quad \sigma_{\min} = \sigma \left(1 - 6 \frac{e}{B} \right) \geq 0$$

$$e = \frac{B}{6} \Rightarrow \sigma_{\min} = 0, \quad \sigma_{\max} = 2\sigma$$



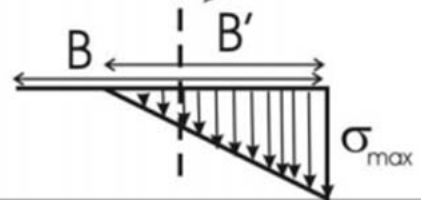
Σημείωση : Σε στοιχεία που μπορούν να αναλάβουν εφελκυσμό, ισχύουν για κάθε εκκεντρότητα



2. Μεγάλη εκκεντρότητα : $B/6 \leq e \leq B/2$

$$B' = 3 \left(\frac{B}{2} - e \right) \quad \sigma_{\max} = 2\sigma \frac{B}{B'}$$

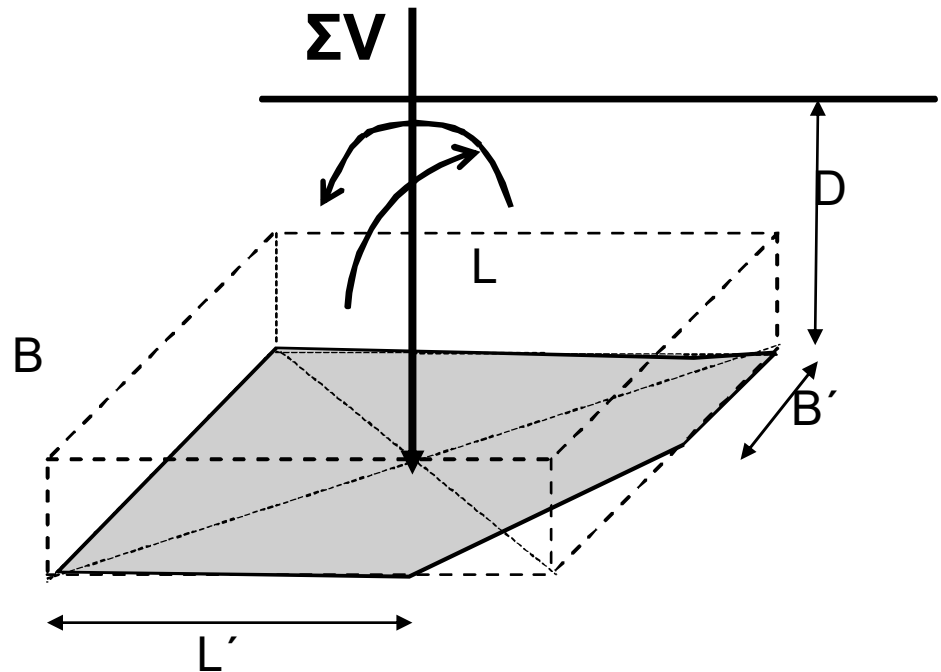
$$\text{Σημείωση : } e = \frac{B}{3} \Rightarrow B' = \frac{B}{2}, \quad \sigma_{\max} = 4\sigma$$



Φέρουσα Ικανότητα

Συντελεστής ασφαλείας

$$SF = \frac{\text{ΑΝΤΟΧΗ}}{\text{ΔΡΑΣΗ}} = \frac{P_u}{\Sigma V} = \frac{p_u \cdot (B' \cdot L')}{\Sigma V}$$



Έλεγχος επάρκειας έναντι ολίσθησης στη βάση

Μέθοδος του συνολικού συντελεστή ασφαλείας (FS) :

$$(FS) H \leq H_u \Rightarrow H \leq \frac{H_u}{(FS)}$$

$$H_u = \min\{V_u \tan \theta, V \tan \delta\}$$

H_u = οριζόντια συνιστώσα της οριακής φέρουσας ικανότητας

H = οριζόντιο φορτίο λειτουργίας εκ της ανωδομής (χωρίς συντελεστές δράσεων)

θ = απόκλιση του φορτίου του πεδίου από την κατακόρυφο

V_u = κατακόρυφη συνιστώσα της οριακής φέρουσας ικανότητας

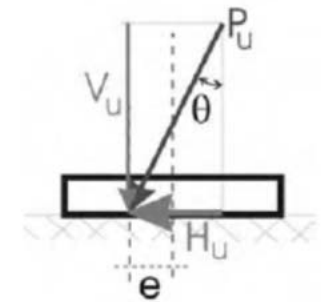
V = κατακόρυφο φορτίο λειτουργίας εκ της ανωδομής (χωρίς συντελεστές δράσεων)

δ = γωνία τριβής βάσης πεδίου και εδάφους :

Για τραχύ πέδιλο : $\delta = (2/3) \varphi$

Για σχετικώς λείο πέδιλο : $\delta = (1/2) \varphi$

Συνήθης τιμή του απαιτούμενου συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης : $FS = 1.5 \div 2.0$



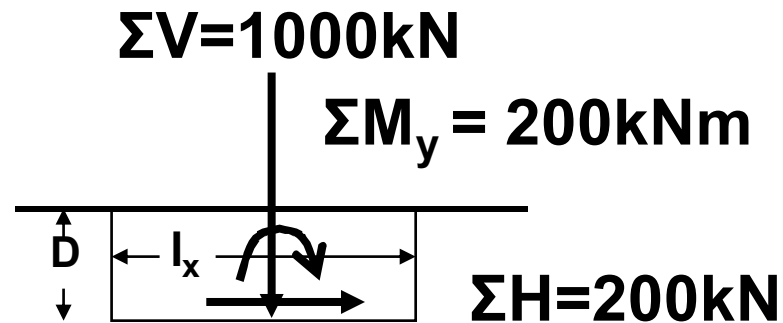
Σ.Α. έναντι θραύσης-ολίσθησης

Ένα απλό παράδειγμα

1. Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα p_u ενός τετραγωνικού θεμελίου πλάτους $I_x=I_y=2m$ και βάθους $D=1m$, το οποίο εδράζεται σε ένα αμμώδες έδαφος με τα ακόλουθα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά:

$$c = 0kPa, \varphi = 36^\circ, \gamma = 20kN/m^3$$

2. Να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης και ολίσθησης, για την ακόλουθη φόρτιση:



Για $\Sigma M_y = 500kNm$ τι θ άλλαζε;

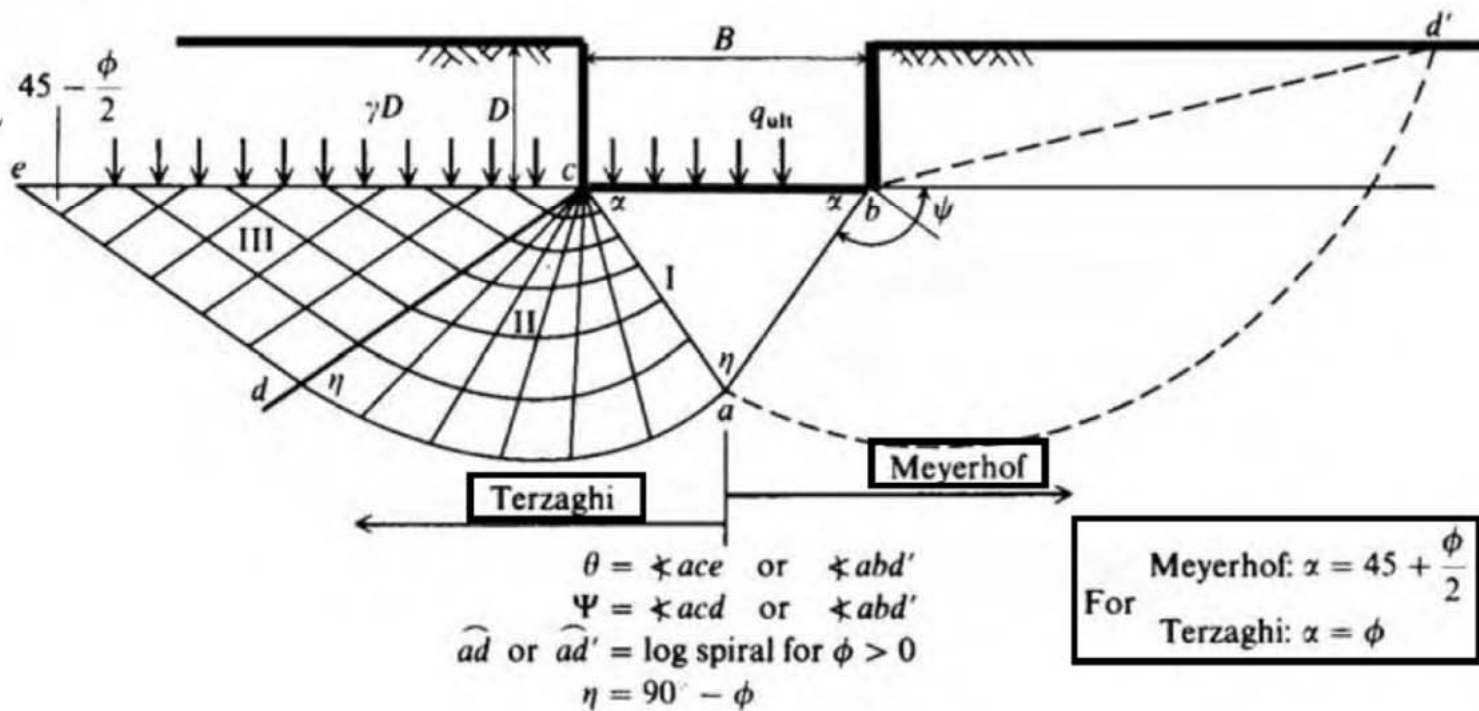
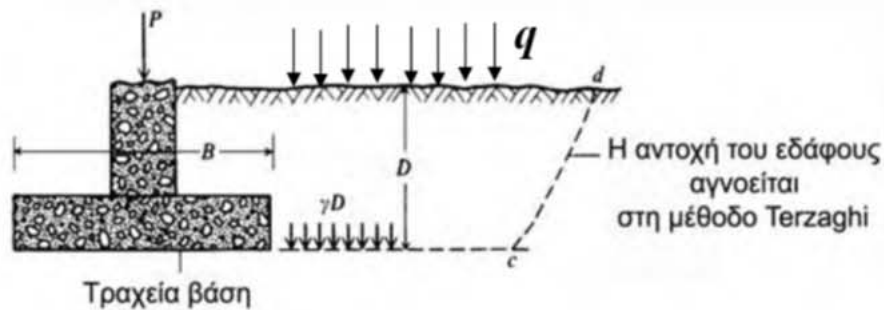
Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



Θεμελιώσεις

Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων
Meyerhof (1955), DIN, κλπ.

Φέρουσα Ικανότητα Χρονική εξέλιξη της θεωρίας...



Φέρουσα Ικανότητα

Γενική μορφή εξίσωσης (DIN)

$$p_u = s_c \cdot b_c \cdot i_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot b_q \cdot i_q \cdot (q + \gamma \cdot D) \cdot N_q + s_\gamma \cdot b_\gamma \cdot i_\gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

όπου:

p_u : οριακή πίεση θραύσεως – Φ.Ι.

q : επιφόρτιση στην επιφάνεια

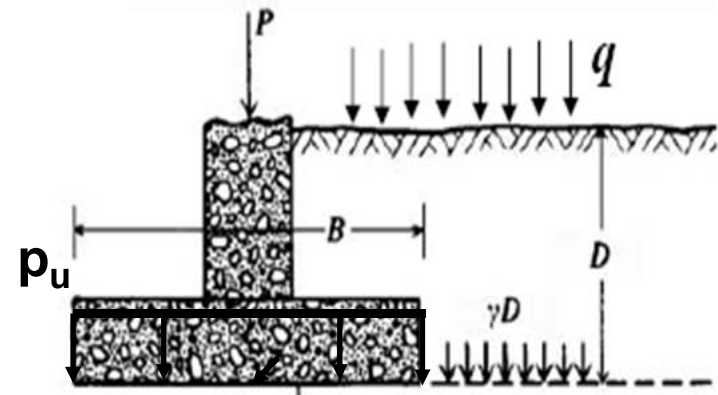
D : βάθος θεμελίωσης

N_c, N_q, N_γ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας

s_c, s_q, s_γ : συντελεστές σχήματος θεμελίου

b_c, b_q, b_γ : συντελεστές λοξότητας βάσης θεμελίου

i_c, i_q, i_γ : συντελεστές απόκλισης φορτίου από την κατακόρυφο



Φέρουσα Ικανότητα κατά DIN 4017 Συντελεστές Φ.Ι. και σχήματος

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \exp(\pi \tan \phi)$$

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi$$

$$N_c = (N_q - 1) \frac{1}{\tan \phi}$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$$

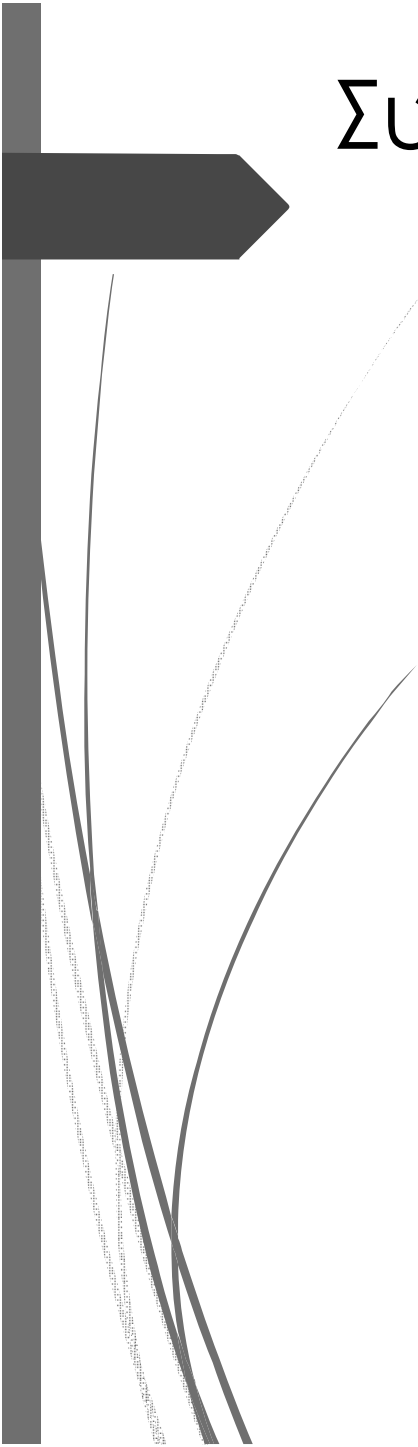
Για $\phi=0 \rightarrow N_c = 5.142$

Για $\phi=0 : s_c = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'}$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \frac{B'}{L'}$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ Φ.Ι. (DIN)...



ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.142	1.000	0.000
1	5.379	1.094	0.003
2	5.632	1.197	0.014
3	5.900	1.309	0.032
4	6.185	1.433	0.060
5	6.489	1.568	0.099
6	6.813	1.716	0.151
7	7.158	1.879	0.216
8	7.527	2.058	0.297
9	7.922	2.255	0.397
10	8.345	2.471	0.519
11	8.798	2.710	0.665
12	9.285	2.974	0.839
13	9.807	3.264	1.045
14	10.370	3.586	1.289
15	10.977	3.941	1.576
16	11.631	4.335	1.913
17	12.338	4.772	2.307
18	13.104	5.258	2.767
19	13.934	5.798	3.304
20	14.835	6.399	3.930

ϕ	N_c	N_q	N_γ
20	14.835	6.399	3.930
21	15.815	7.071	4.661
22	16.833	7.821	5.512
23	18.049	8.661	6.504
24	19.324	9.603	7.661
25	20.721	10.662	9.011
26	22.254	11.854	10.558
27	23.942	13.199	12.432
28	25.803	14.720	14.590
29	27.860	16.443	17.121
30	30.140	18.401	20.093
31	32.671	20.631	23.591
32	35.490	23.177	27.715
33	38.638	26.092	32.590
34	42.164	29.440	38.366
35	46.124	33.296	45.228
36	50.586	37.753	53.404
37	55.630	42.920	63.178
38	61.352	48.933	74.899
39	67.867	55.957	89.007
40	75.313	64.195	106.054

Φέρουσα Ικανότητα Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα (DIN 4017)

$$(q + \gamma_1 \cdot D) \quad \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$

Για στραγγιζόμενες συνθήκες:

- Υ.Ο. επιφανειακός
(καλύπτει εν μέρει το θεμέλιο)
 γ_1 και γ_2 υπό άνωση ($\gamma' = \gamma - \gamma_w$)
- Υ.Ο. κάτω από το θεμέλιο
(έως και σε βάθος ίσο με το πλάτος του θεμελίου)
 γ_1 πλήρες, γ_2 υπό άνωση ($\gamma' = \gamma - \gamma_w$)
- Απουσία Υ.Ο.
(σε μεγαλύτερο βάθος από το πλάτος του θεμελίου)
 γ_1 και γ_2 πλήρη

ΠΡΟΣΟΧΗ: Υπό αστραγγιστες συνθήκες οι υπολογισμοί
γίνονται πάντα με τα πλήρη (κορεσμένα) γ_1, γ_2

Φέρουσα Ικανότητα

Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα κατά NAVFAC DM-7.2

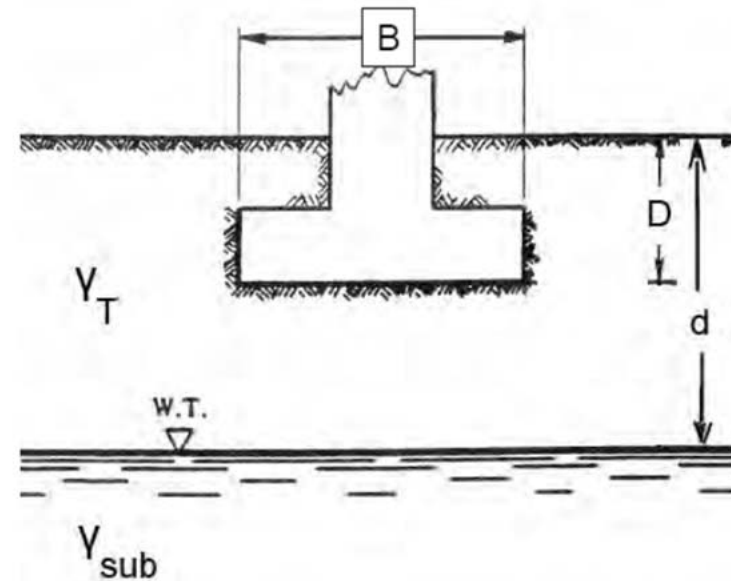
$$p_u = c N_c + (q + \gamma_1 D) N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_\gamma$$

$$\gamma_1 = \gamma_T \quad \text{εάν } d > D$$

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_T d + \gamma_{sub} (D - d)}{D} \quad \text{εάν } d < D$$

$$\gamma_2 = \gamma_{sub} + F(\gamma_T - \gamma_{sub})$$

Οι τιμές του συντελεστή F δίνονται
στο επόμενο νομογράφημα



γ_{sub} = υπό άνωση ειδικό βάρος

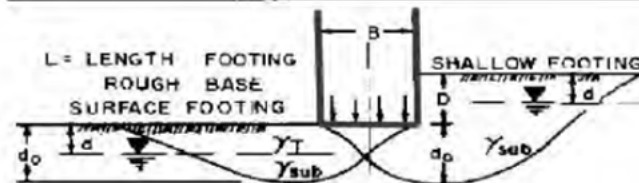
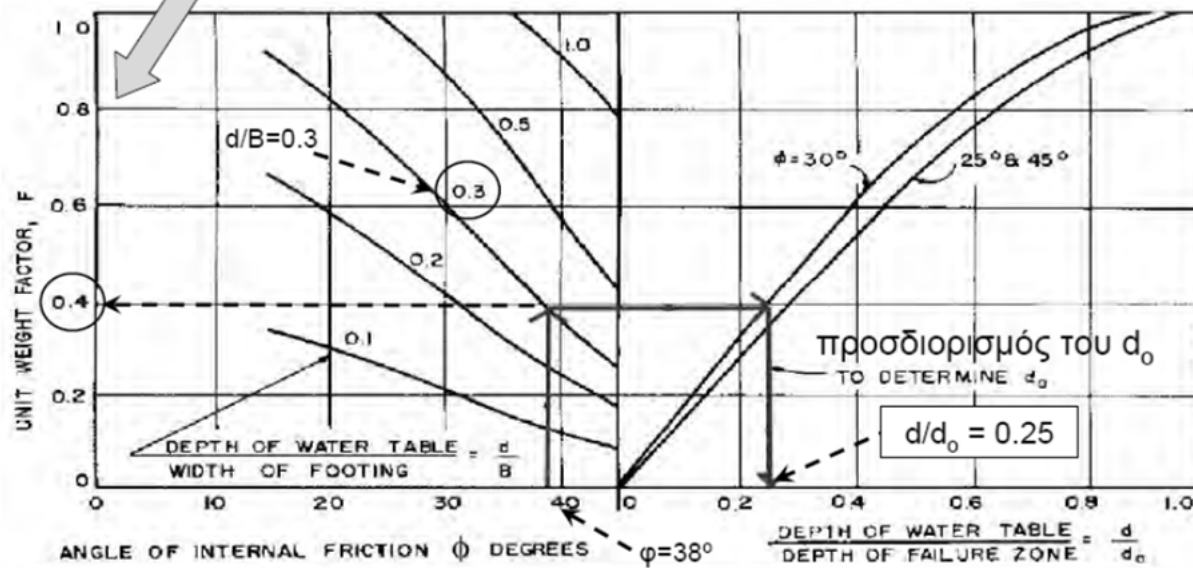
γ_T = υγρό ειδικό βάρος

Φέρουσα Ικανότητα πεδίων Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα κατά NAVFAC DM-7.2

Επιρροή του βάθους (d) του υδροφόρου ορίζοντα (κατά NAVFAC DM-7.2) :

$$p_u = c N_c + (q + \gamma_1 D) N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_\gamma \quad \gamma_1 = \gamma_T \quad \text{εάν } d > D$$

$$\gamma_2 = \gamma_{sub} + F(\gamma_T - \gamma_{sub}) \quad \gamma_1 = \frac{\gamma_T d + \gamma_{sub}(D-d)}{D} \quad \text{εάν } d < D$$



γ_{sub} = υπό άνωση ειδικό βάρος

γ_T = υγρό ειδικό βάρος



Φέρουσα Ικανότητα

Ένα απλό παράδειγμα (DIN 4017)

Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα p_u ενός θεμελίου πλάτους $B=2\text{m}$ και μήκους $L=10\text{m}$, υπό αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες, το οποίο εδράζεται σε βάθος $D=2\text{m}$ σε ένα κορεσμένο αργιλικό έδαφος (υδροφόρος ορίζοντας στην επιφάνεια) με τα ακόλουθα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά:

$$c = 10\text{kPa}$$

$$\varphi = 26^\circ$$

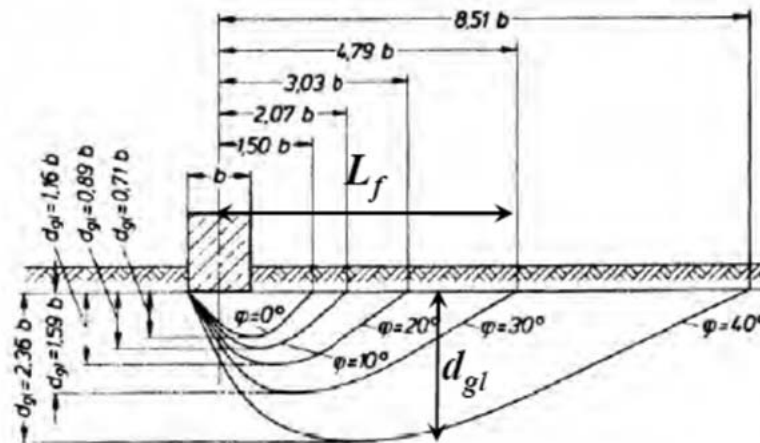
$$c_u = 50\text{kPa}$$

$$\gamma_{\text{κορ}} = 20\text{kN/m}^3$$

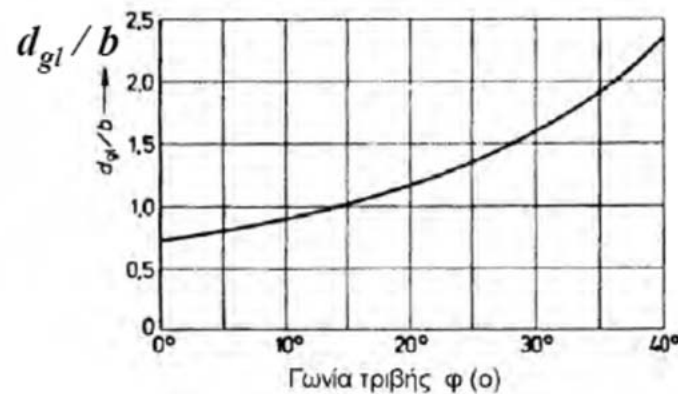
Τι θα άλλαζε στο παράδειγμα για $z_w=3\text{m}$?

Φέρουσα Ικανότητα Βάθος/πλάτος επιρροής ΦΙ (DIN 4017)

Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)
Εκτίμηση του βάθους επιρροής (d_{gl}) πεδίων (κατά το DIN 4017) :



Στην περίπτωση έδρασης πεδίων κοντά σε πρηνές, υπάρχει επιρροή του πρηνούς στη φέρουσα ικανότητα του πεδίου (μείωση) εάν η απόσταση του πεδίου από το πρηνές είναι μικρότερη από το εύρος της ζώνης αστοχίας (L_f)

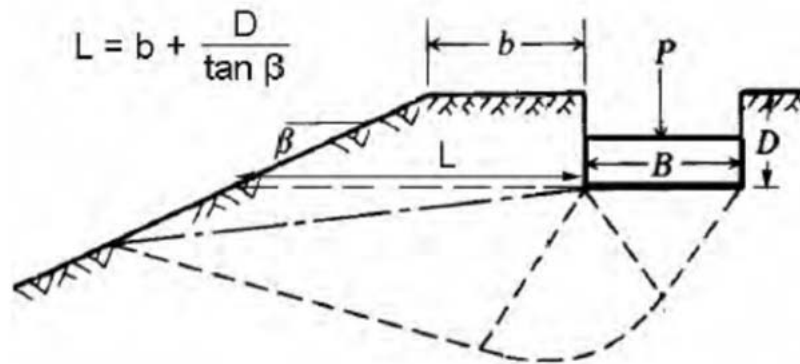


Στην περίπτωση έδρασης πεδίων επί ανομοιογενούς εδάφους, οι παράμετροι αντοχής (c , φ) και το ειδικό βάρος (γ) λαμβάνονται ως ζυγισμένες τιμές στην εδαφική ζώνη πάχους (d_{gl})

Φέρουσα Ικανότητα Γεινίαση με πρανές (DIN 4017)

Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδύλων)

Επιρροή της γεινίασης με πρανές στην φέρουσα ικανότητα



L_f = εύρος της ζώνης αστοχίας

L = απόσταση του πεδύλου από το πρανές

$$p_u = c N_c b_c s_c i_c g_c + (q + \gamma D) N_q b_q s_q i_q g_q + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma g_\gamma$$

Συντελεστές κλίσης πρανούς (g_c, g_q, g_γ) κατά Hansen :

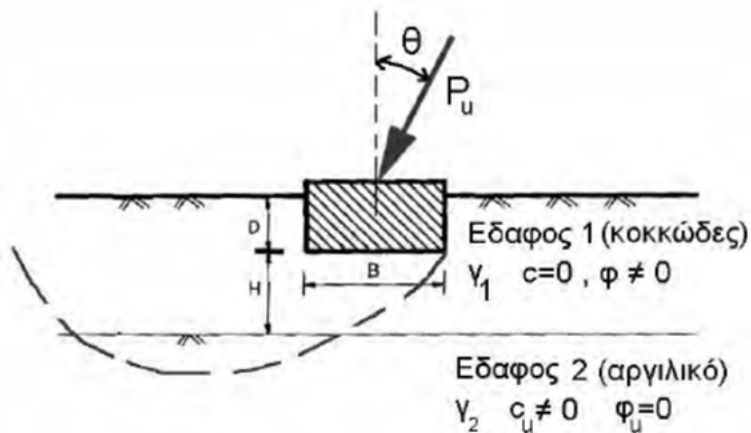
$$\text{Εάν } L \geq L_f: \quad g_c = g_q = g_\gamma = 1$$

$$\text{Εάν } L < L_f: \quad g_c = 1 - \left(1 - \frac{L}{L_f}\right) \left(\frac{2\beta}{\pi + 2}\right) \quad g_q = g_\gamma = \left(1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{L}{L_f}\right) \tan \beta\right)^5$$

Φέρουσα Ικανότητα Δίστρωτος σχηματισμός

Φέρουσα ικανότητα λωριδωτού πεδίου υπό λοξή φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό, με μη-συνεκτική ανώτερη στρώση (π.χ. αμμοχάλικο) και συνεκτική κατώτερη στρώση (άργιλος υπό αστράγγιστες συνθήκες) – Επίλυση κατά Meyerhof & Hanna (1978)

Η περίπτωση αυτή είναι πολύ συνηθής σε πέδιλα εδραζόμενα σε μαλακές αργίλους (έδαφος 2) μέσω εξυγιαντικής στρώσης από κοκκώδες υλικό (έδαφος 1)



p_{u2} = οριακή φέρουσα ικανότητα του πεδίου θεωρούμενου ως εδραζόμενου στο έδαφος 2 (άργιλος με c_u) – χωρίς την παρουσία του εδάφους 1

$$p_{u2} = (\pi + 2) i_c c_u + (q + \gamma_1 D)$$

p_{u1} = οριακή φέρουσα ικανότητα του πεδίου θεωρούμενου ως εδραζόμενου σε μεγάλο πάχος έδαφος 1 (κοκκώδες με γωνία τριβής ϕ)

$$p_{u1} = (q + \gamma_1 D) N_q i_q + 0.5 \gamma_1 B N_\gamma i_\gamma$$

p_u = οριακή φέρουσα ικανότητα του πεδίου στο δίστρωτο έδαφος :

$$p_u = \min \left\{ p_{u1} , p_{u2} + \gamma_1 H \left[\left(1 + 2 \frac{D}{H} \cos \theta \right) \frac{H}{B} K_s i_s \tan \phi - 1 \right] \right\}$$

Οριακό κατακόρυφο φορτίο : $V_u = p_u B L$

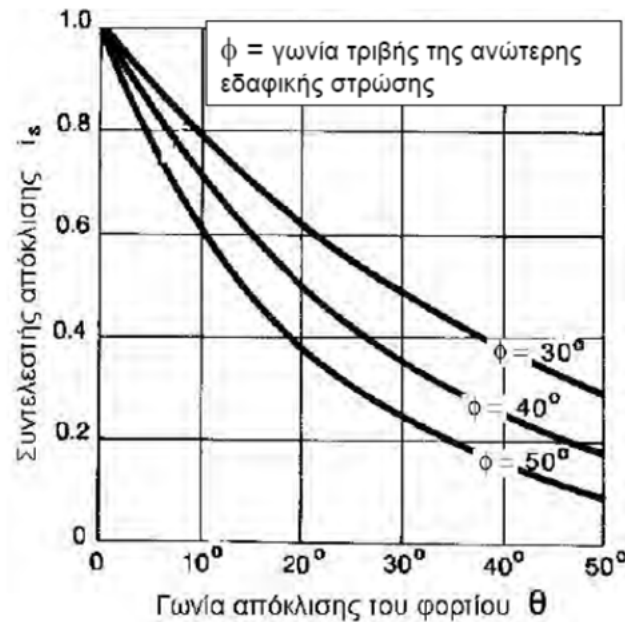
Οριακό φορτίο : $P_u = V_u / \cos \theta$

Φέρουσα Ικανότητα Δίστρωτος σχηματισμός

Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

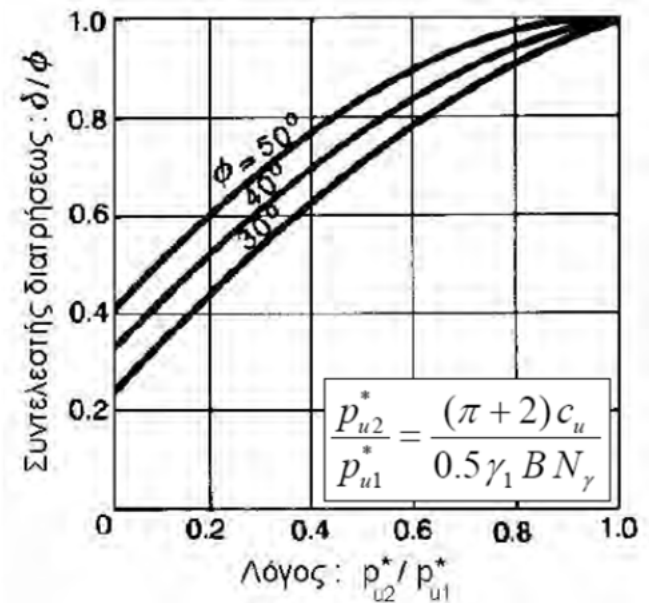
Φέρουσα ικανότητα λωριδωτού πεδίου υπό λοξή φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό, με μη-συνεκτική ανώτερη στρώση (π.χ. αμμοχάλικο) και συνεκτική κατώτερη στρώση (άργιλος υπό αστράγγιστες συνθήκες) – Επίλυση κατά Meyerhof & Hanna (1978)

i_s = συντελεστής απόκλισης του φορτίου από την κατακόρυφο (γωνία θ)



K_s = συντελεστής διατήρησης της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Προκύπτει ως συνάρτηση του ακόλουθου συντελεστή (δ/ϕ)

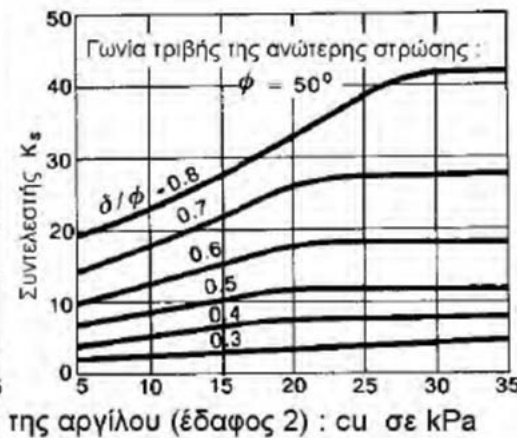
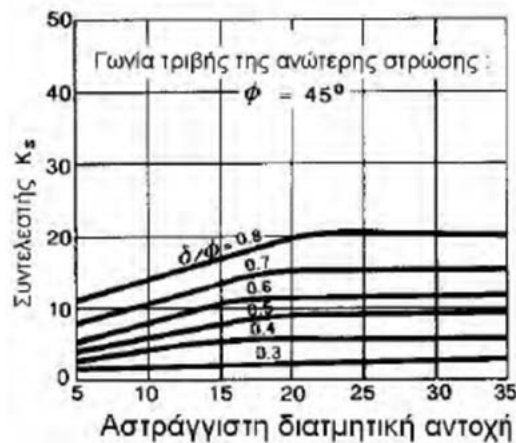
N_γ = συντ. φέρουσας ικανότητας του εδάφους 1



Φέρουσα Ικανότητα Δίστρωτος σχηματισμός

Φέρουσα ικανότητα λωριδωτού πεδίου υπό λοξή φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό, με μη-συνεκτική ανώτερη στρώση (π.χ. αμμοχάλικο) και συνεκτική κατώτερη στρώση (άργιλος υπό αστράγγιστες συνθήκες) – Επίλυση κατά Meyerhof & Hanna (1978)

K_s = συντελεστής διατρήσεως της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Προκύπτει ως συνάρτηση του συντελεστή (δ/ϕ)



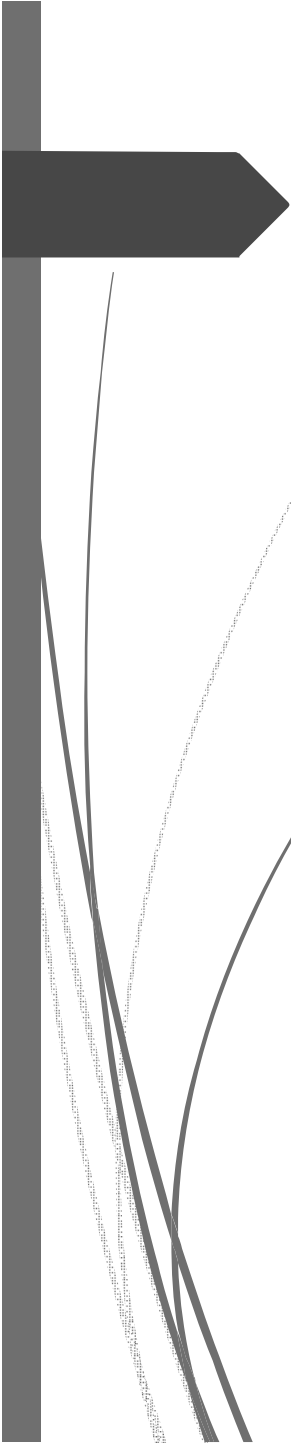
Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



Θεμελιώσεις

Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων IV

Ευρωκώδικας 7



Σχεδιασμός με EC7

Τι άλλαξε;

1. Απαιτούνται πλέον δύο έλεγχοι (χωριστά) :
 - Σε οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS)
«Δράσεις» μικρότερες από τις «αντοχές» ($F_d < R_d$)
 - Σε οριακή κατάσταση λειτουργίας (SLS)
Υπολογισμός των παραμορφώσεων υπό τα φορτία λειτουργίας
Παραμορφώσεις μικρότερες από τις αποδεκτές τιμές ($\delta < \delta_{max}$)
2. Στους ελέγχους υπεισέρχονται οι «χαρακτηριστικές τιμές» δράσεων (F_k) και εδαφικών παραμέτρων (X_k) που προσδιορίζονται με αντικειμενικότερο τρόπο
3. Ο έλεγχος έναντι αστοχίας (ULS) γίνεται μέσω των "επιμέρους συντελεστών" δράσεων, εδαφικών ιδιοτήτων και αντιστάσεων ($\gamma_F, \gamma_M, \gamma_R$) αντί του συνολικού "συντελεστή ασφαλείας" (FS)

Σχεδιασμός με EC7

Τρεις τρόποι ανάλυσης (DA)

Τιμές των επιμέρους συντελεστών $\gamma_F, \gamma_M, \gamma_R$:

Περίπτωση Ανάλυσης	Συνδυασμός	Τύποι υπολογισμού	Τιμές των επιμέρους συντελεστών (από τους πίνακες που ακολουθούν και περιλαμβάνουν τα A_i, M_i, R_i)
1	Συνδ. 1 Συνδ. 2	Τύποι II	(A1) + (M1) + (R1) (A2) + (M2) + (R1)
2		Τύποι I	(A1) + (M1) + (R2)
3		Τύποι II (ή I) +	[(A1)* ή (A2)**] + (M2) + (R3)

+ Για τον υπολογισμό των δράσεων μπορεί να εφαρμοσθούν και οι τύποι I

* Για δράσεις από την ανωδομή (δομοστατικές δράσεις)

** Για γεωτεχνικές δράσεις (από το έδαφος, π.χ. ωθήσεις γαιών)

Παρατηρήσεις :

1. Η επιλογή μίας εκ των τριών Περιπτώσεων Ανάλυσης γίνεται σε Εθνικό επίπεδο
2. Στην Περ. Ανάλυσης 1, εφαρμόζεται ο δυσμενέστερος εκ των Συνδυασμών 1 & 2

Σχεδιασμός με EC7

Επιμέρους συντελεστές

Μέθοδος των επιμέρους συντελεστών (partial factors) – κατά τον Ευρωκώδικα 7

Επιμέρους συντελεστές δράσεων (γ_F και γ_E)

Επιμέρους συντελεστές εδαφικού υλικού (γ_M)

Table A.3 - Partial factors on actions (γ_F) or the effects of actions (γ_E)

Action		Symbol	Set	
			A1	A2
Permanent	Unfavourable	γ_G	1,35	1,0
	Favourable		1,0	1,0
Variable	Unfavourable	γ_Q	1,5	1,3
	Favourable		0	0

γ_G on permanent unfavourable or favourable actions

γ_Q on variable unfavourable or favourable actions.

Table A.4 - Partial factors for soil parameters (γ_M)

Soil parameter	Symbol	Set	
		M1	M2
Angle of shearing resistance ^a	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Effective cohesion	γ_c	1,0	1,25
Undrained shear strength	γ_{cu}	1,0	1,4
Unconfined strength	γ_{au}	1,0	1,4
Weight density	γ_r	1,0	1,0
^a This factor is applied to $\tan \phi'$			

Σχεδιασμός με EC7

Επιμέρους συντελεστές

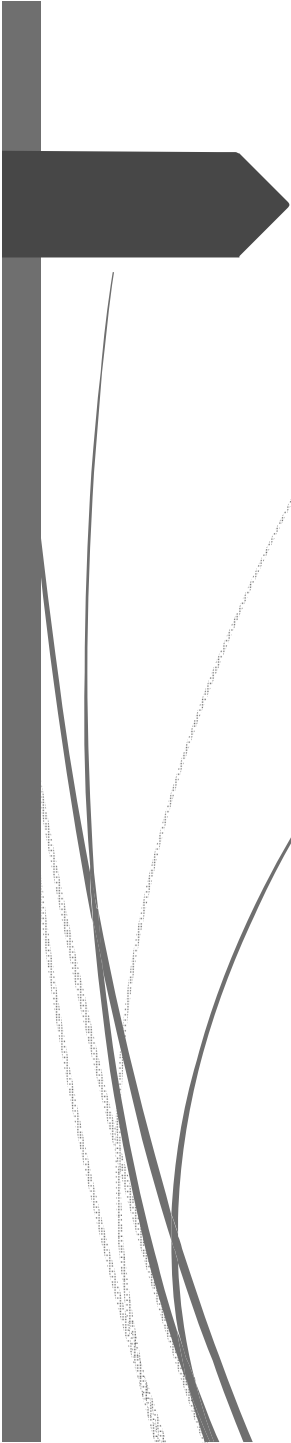
Επιμέρους συντελεστές αντιστάσεων (γ_R)

Table A.5 - Partial resistance factors (γ_R) for spread foundations

Resistance	Symbol	Set		
		<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>
Bearing	$\gamma_{R:v}$	1,0	1,4	1,0
Sliding	$\gamma_{R:h}$	1,0	1,1	1,0

$\gamma_{R:v}$ on bearing resistance

$\gamma_{R:h}$ on sliding resistance



Σχεδιασμός με EC7

Τρόπος ανάλυσης 3 – Πότε;

Στην ανάλυση οριακών καταστάσεων αστοχίας (ULS) γεωτεχνικού (GEO) και δομητικού (STR) τύπου θα εφαρμόζονται οι εξής Τρόποι Ανάλυσης και σχέσεις υπολογισμού :

(1) Ο Τρόπος Ανάλυσης 3 (DA-3), θα εφαρμόζεται κατά τον έλεγχο των εξής γεωτεχνικών (GEO) οριακών καταστάσεων αστοχίας :

- Ευστάθεια γεωτεχνικών έργων χωρίς δομικά στοιχεία αντιστήριξης, όπως επιχώματα, φυσικά ή τεχνητά πρανή, φράγματα, ορύγματα και βαθιές εκσκαφές με ελεύθερα πρανή.
- Ολική ευστάθεια γεωτεχνικών έργων με δομικά στοιχεία αντιστήριξης

Σχεδιασμός με EC7

Τρόπος ανάλυσης 2 – Πότε;

(2) Ο Τρόπος Ανάλυσης 2 (DA-2), θα εφαρμόζεται κατά τον έλεγχο των εξής οριακών καταστάσεων αστοχίας :

- ▶ Γεωτεχνικές (GEO) και δομητικές (STR) οριακές καταστάσεις αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων, βαθιών θεμελιώσεων, αγκυρώσεων και έργων αντιστηρίξεως.
- ▶ Δομητικές (STR) οριακές καταστάσεις αστοχίας πρανών ή εκσκαφών ενισχυμένων με δομικά στοιχεία. (οι αναλύσεις ολικής ευστάθειας των ανωτέρω έργων με DA-3).
- ▶ Γεωτεχνικές (GEO) και δομητικές (STR) οριακές καταστάσεις αστοχίας με χρήση αριθμητικών μεθόδων (πεπερασμένα στοιχεία ή πεπερασμένες διαφορές). Εξαιρέση αποτελεί η ανάλυση γεωτεχνικών (GEO) οριακών καταστάσεων ολικής ευστάθειας με DA-3.
- ▶ Τέλος, ο Τρόπος Ανάλυσης 2 (DA-2), θα εφαρμόζεται κατά τον έλεγχο των γεωτεχνικών (GEO) ή δομητικών (STR) οριακών καταστάσεων αστοχίας που δεν υπάγονται στα ανωτέρω, όπως αναλύσεις σηράγγων, λοιπών υπογείων έργων, φραγμάτων κλπ.

Σχεδιασμός με EC7

Επιμέρους συντελεστές

Ο Τρόπος Ανάλυσης 2 (DA-2), θα εφαρμόζεται με την παραλλαγή που αποκαλείται Τρόπος Ανάλυσης 2* (DA-2*) και περιλαμβάνει χρήση των ακόλουθων σχέσεων για τις δράσεις (με $\gamma_M = 1$) :

$$E_d = E (\gamma_F F_k, X_k)$$

$$E_d = \gamma_E E (F_k, X_k)$$

και της σχέσης για τις αντιστάσεις (με $\gamma_F = 1$) :

$$R_d = (1 / \gamma_R) \cdot R (F_k, X_k)$$

Συνεπώς, ο έλεγχος θα γίνεται με εφαρμογή τις σχέσης :

$$E (\gamma_F F_k, X_k) \leq (1 / \gamma_R) \cdot R (F_k, X_k)$$

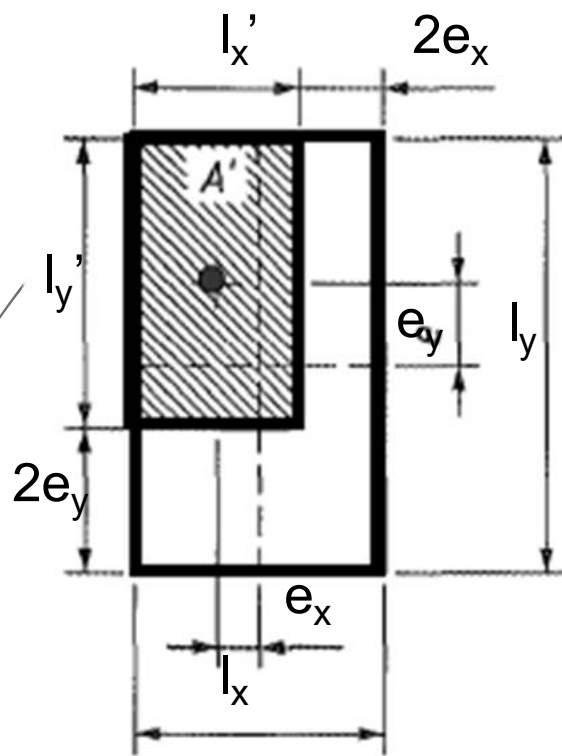
ή, εναλλακτικά της ισοδύναμης σχέσης :

$$\gamma_E E (F_k, X_k) \leq (1 / \gamma_R) \cdot R (F_k, X_k)$$

και τις εξής ομάδες επιμέρους συντελεστών του Παραρτήματος Α του EN1997-1 (δείτε και σχετικούς πίνακες παραπάνω):

- (A1) για τις δράσεις (συντελεστές γ_F), ή εναλλακτικά τα αποτελέσματα των δράσεων (συντελεστές γ_E),
- (R2) για τις αντιστάσεις.

Σχεδιασμός με EC7 (DA 2*)
Εκκεντρότητα (παράρτημα D)



$$l'_x = l_x - 2 \cdot |e_x|$$

$$l'_y = l_y - 2 \cdot |e_y|$$

$$B' = \min \{ l'_x, l'_y \}$$

$$L' = \max \{ l'_x, l'_y \}$$

Υπολογισμός Φ.Ι με βάση τις νέες ισοδύναμες διαστάσεις B' , L'



Σχεδιασμός με EC7 (DA 2*)
Μερικοί συντελεστές ασφαλείας

$$1/\gamma_R \cdot R(F_k, X_k) \geq \gamma_E \cdot E(F_k, X_k)$$

$$\gamma_R = 1.10 \text{ (ολίσθηση)} \text{ ή } 1.40 \text{ (}\Phi\text{.I.)}$$

$$\gamma_E = 1.35 \text{ (μόνιμα)} \text{ ή } 1.50 \text{ (κινητά)}$$

Άρα (έλεγχος φέρουσας ικανότητας):

$$FS = \gamma_E \gamma_R = 1.40 \times 1.40 = 1.96 \approx 2.0$$

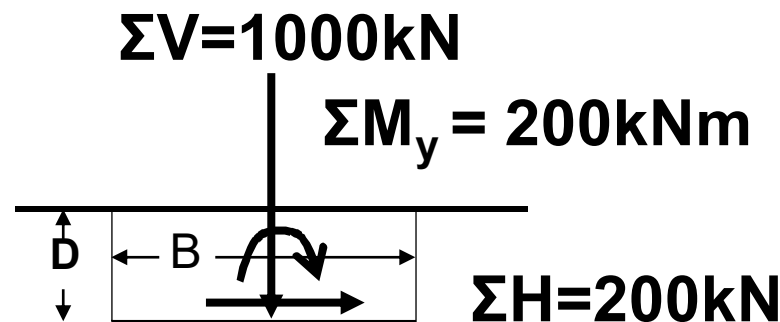
Σ.Α. έναντι θραύσης-Ολίσθησης

Ένα απλό παράδειγμα (EC-8)

1. Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα p_u ενός τετραγωνικού θεμελίου πλάτους $b=2m$ και βάρους $D=1m$, το οποίο εδράζεται σε ένα αμμώδες έδαφος με τα ακόλουθα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά:

$$c = 0kPa, \varphi = 36^\circ, \gamma = 20kN/m^3$$

2. Να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης και ολίσθησης, για την ακόλουθη φόρτιση:



Να επαναληφθούν οι υπολογισμοί με επιμέρους συντελεστές ασφαλείας κατά EC8...



Σχεδιασμός με EC7 Σεισμός;

Μερικές απλές παρατηρήσεις:

- ▶ Μοναδιαίοι εν γένει επιμέρους συντελεστές ασφαλείας και εφαρμογή της μεθοδολογίας όπως τη γνωρίζουμε.
- ▶ *Ειδικοί έλεγχοι* σε χαλαρά μη-συνεκτικά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (ρευστοποίηση)
- ▶ *Ιδιαίτερα ζητήματα*
(πόση είναι η αναμενομένη σεισμική επιτάχυνση στην περιοχή, εδαφική ενίσχυση κραδασμού, φαινόμενα τοπογραφικής ενίσχυσης, ταλάντωση υπερκατασκευής και αλλαγή τασικού πεδίου, κλπ...)

Εισηγητής: Αλέξανδρος Βαλσαμής



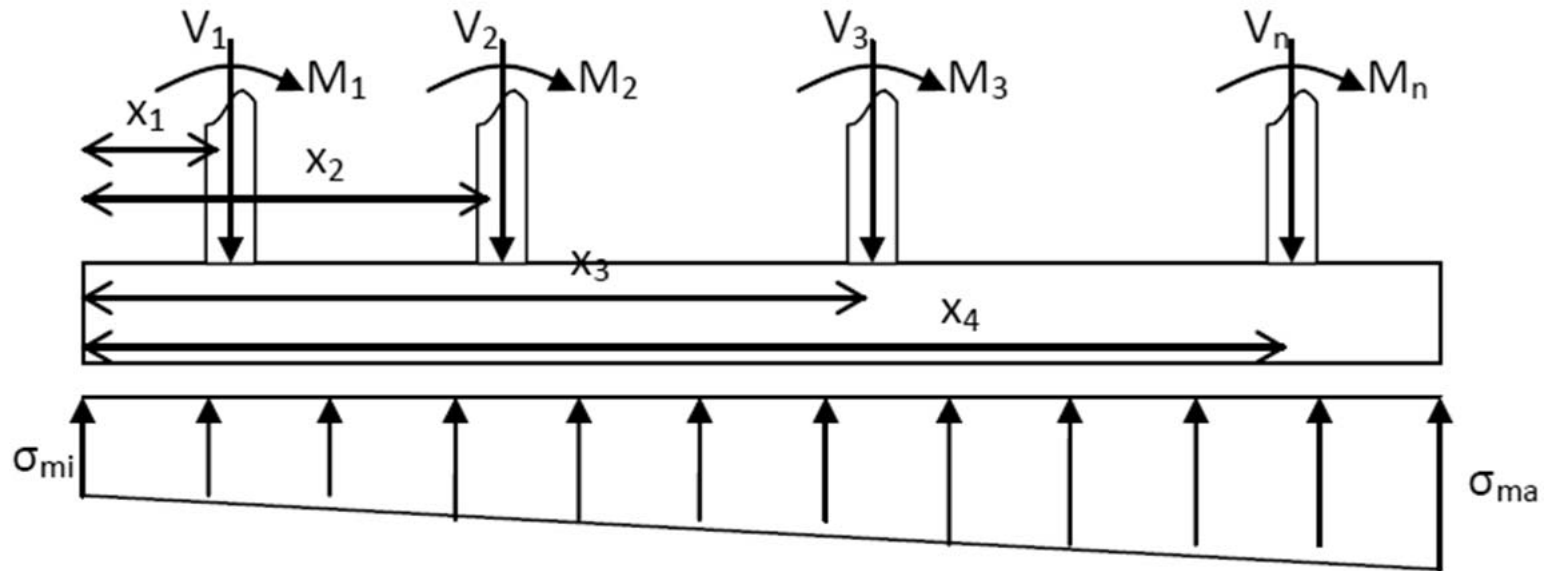
Θεμελιώσεις

Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων V

Εύκαμπτες πεδιλοδοκοί...

Ασκήσεις

Πεδιλοδοκοί...



ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

- Ισοστατική μέθοδος: Στερεό σώμα με τάσεις σύμφωνα με το διάγραμμα (άκαμπτες πεδιλοδοκοί)
- Μέθοδος winkler: Με αντικατάσταση του εδάφους με ελατήρια (εύκαμπτες πεδιλοδοκοί)

Κριτήρια δυσκαμψίας πεδιλοδοκών...

► **Meyerhof:** Άκαμπτες όταν: $k_{stiffness, factor} = \frac{E_c I}{EL^3 B} > 5.0$

► **Hetenyi:** Άκαμπτες (κοντές): $\lambda L < \pi/4$

Ενδιάμεσου μήκους: $\pi/4 < \lambda L < \pi$

Μακρές (εύκαμπτες): $\pi < \lambda L$

όπου
$$\lambda^4 = \frac{k_s B}{4E_c I}$$

► **Vesic:** Άκαμπτες (κοντές): $\lambda L < 0.80$

Ενδιάμεσου μήκους: $0.80 < \lambda L < 2.25$

Μάλλον μακρές: $2.25 < \lambda L < 5.00$

Μακρές: $5.00 < \lambda L$

όπου:
$$k_s = 0.65 \left(\frac{EB^4}{E_c I} \right)^{1/12} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{B}$$

Κριτήρια δυσκαμψίας πεδιλοδοκών...

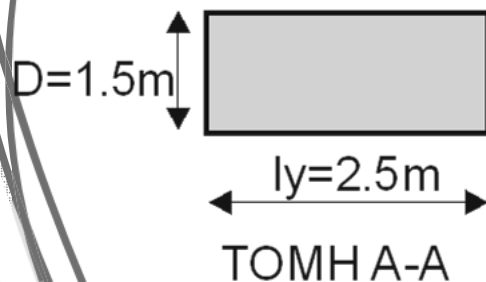
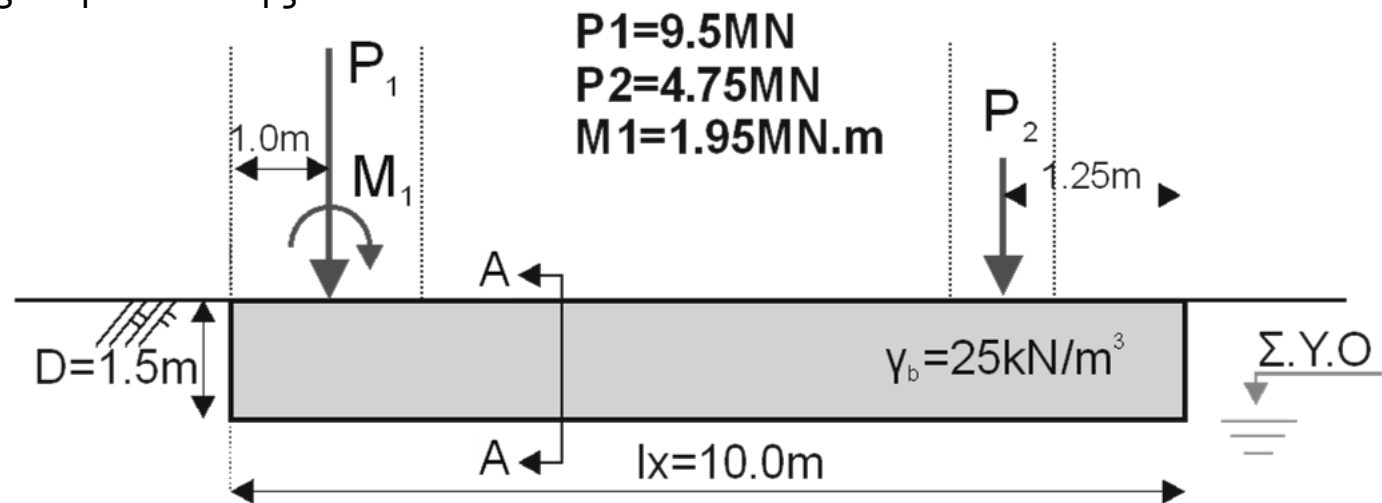
Όπου: E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, δηλ:

Ποιότητα σκυροδέματος	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Μέτρο Ελαστικότητας E_{cm} (GPa)	26	28	29	31	32	34	35	36	37

- I** η ροπή αδράνειας της πεδιλοδοκού:
$$I = \frac{B \cdot H^3}{12}$$
- L** το μήκος της πεδιλοδοκού
- B** το πλάτος της πεδιλοδοκού
- H** το ύψος της πεδιλοδοκού
- E** μέτρο ελαστικότητας του εδάφους
- k_s** ο δείκτης εδάφους της θεμελίωσης
(περισσότερα θα πούμε στις καθιζήσεις για αυτόν)

Άσκηση...

Για την πεδילוδοκό διαστάσεων $l_x \times l_y$ (10m x 2.5m), η οποία φέρει φορτία από την ανωδομή όπως δίνονται στο σχήμα και εδράζεται σε αργιλώδη άμμο με συνοχή $c=5\text{kPa}$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=35^\circ$, να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης SF της θεμελίωσης.



Αργιλώδης Άμμος
 $\gamma_t = 17\text{kN/m}^3$
 $\gamma_{\text{sat}} = 19\text{kN/m}^3$

$c = 5\text{kPa}$, $\varphi = 35^\circ$