



ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Φέρουσα Ικανότητα

Επιφανειακών Θεμελιώσεων

Διδάσκων: Κίρτας Εμμανουήλ

Σέρρες, Σεπτέμβριος 2010

Μελέτη επιφανειακών θεμελιώσεων

- Κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό των θεμελιώσεων θα πρέπει σε σχέση με το έδαφος να εξασφαλίζεται:

(α) η επάρκεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους προκειμένου να μην υπάρχει αστοχία λόγω των φορτίων που μεταφέρονται

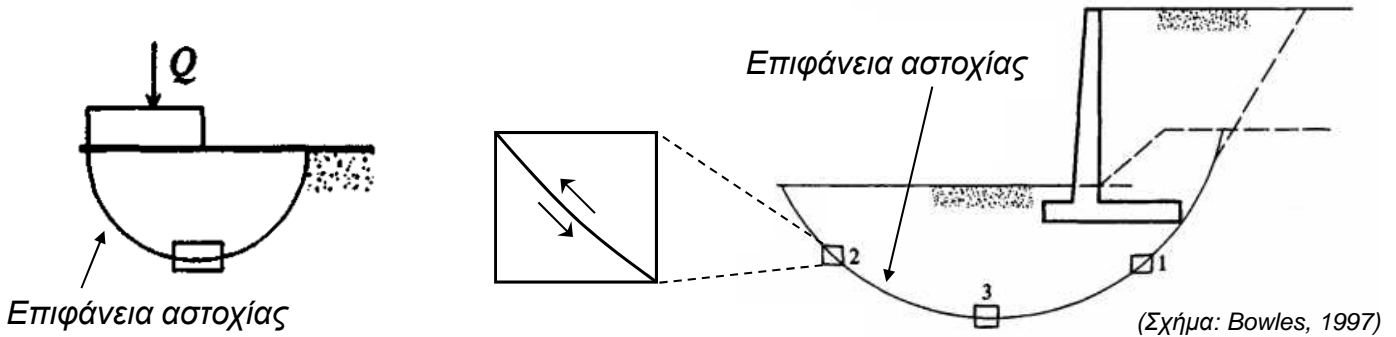
(β) η ανάπτυξη μικρών μόνο μετακινήσεων της θεμελίωσης (εδαφικές καθιζήσεις, στροφές) που δεν θέτουν σε κίνδυνο την στατικότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής

- Εφόσον εξασφαλιστεί η επάρκεια των εδαφικών χαρακτηριστικών θα πρέπει να ακολουθήσει η σωστή διαστασιολόγηση της θεμελίωσης που επιλέχθηκε

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια αναφορά στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και στο Κεφάλαιο 6 των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων στην περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων.

Αντοχή του εδάφους

- Στην Εδαφομηχανική δεν ενδιαφέρει η εφελκυστική και θλιπτική αντοχή όπως στα συνήθη υλικά, καθώς η συμπεριφορά και ο τρόπος αστοχίας του εδάφους διαφέρει
- Η έννοια αντοχής που χρησιμοποιείται για το έδαφος είναι η διατμητική αντοχή
- Η διατμητική αντοχή του εδάφους οφείλεται σε δυο μηχανισμούς:
 - τη συνοχή c ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους
 - την αντίσταση στην ολίσθηση μεταξύ των κόκκων καλούμενη και ως γωνία εσωτερικής τριβής φ



Αντοχή του εδάφους

- Το πιο κατάλληλο κριτήριο αντοχής για την περιγραφή της διατμητικής αστοχίας των εδαφών από τον Coulomb (1776) και μετά την τροποποίηση βάσει της διατύπωσης της αρχής της ενεργού τάσης από τον Terzaghi (1923) δίνεται ως:

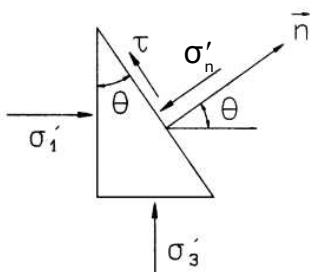
$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi'$$

όπου:

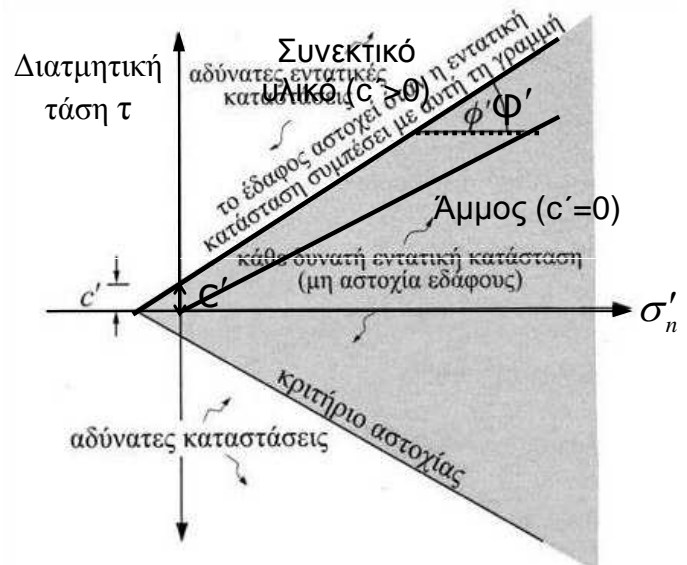
c' η ενεργός συνοχή

φ' η ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής

σ'_n η ορθή ενεργός τάση



(Σχήμα: Καββαδάς, 2000)



(Σχήμα: Barnes, 2005)

Αντοχή του εδάφους

- Οι ενεργές τιμές των παραμέτρων στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους αναφέρονται στις δυνάμεις που μεταφέρονται από τον στερεό εδαφικό σκελετό (εδαφικούς κόκκους) και όχι από το νερό των πόρων.
- Η τιμή της διατμητικής δύναμης δεν επηρεάζεται καθώς το νερό των πόρων δεν μπορεί να παραλάβει διάτμηση
- Αντίθετα η τιμή της ενεργού ορθής τάσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma'_n = \sigma_n - u_w$$

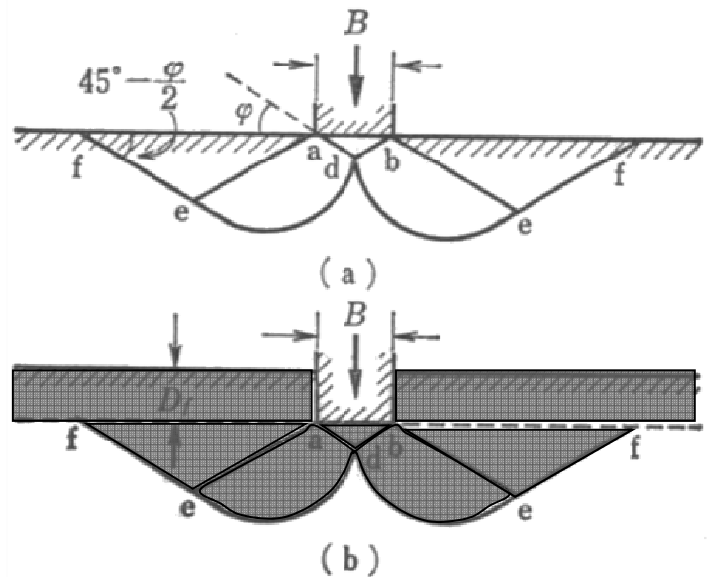
όπου u_w η πίεση του νερού των πόρων

- Σύμφωνα με την αρχή της ενεργού τάσης (Terzaghi, 1923) η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους (παραμορφώσεις, διατμητική αντοχή) εξαρτάται από τις ενεργές τάσεις

Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

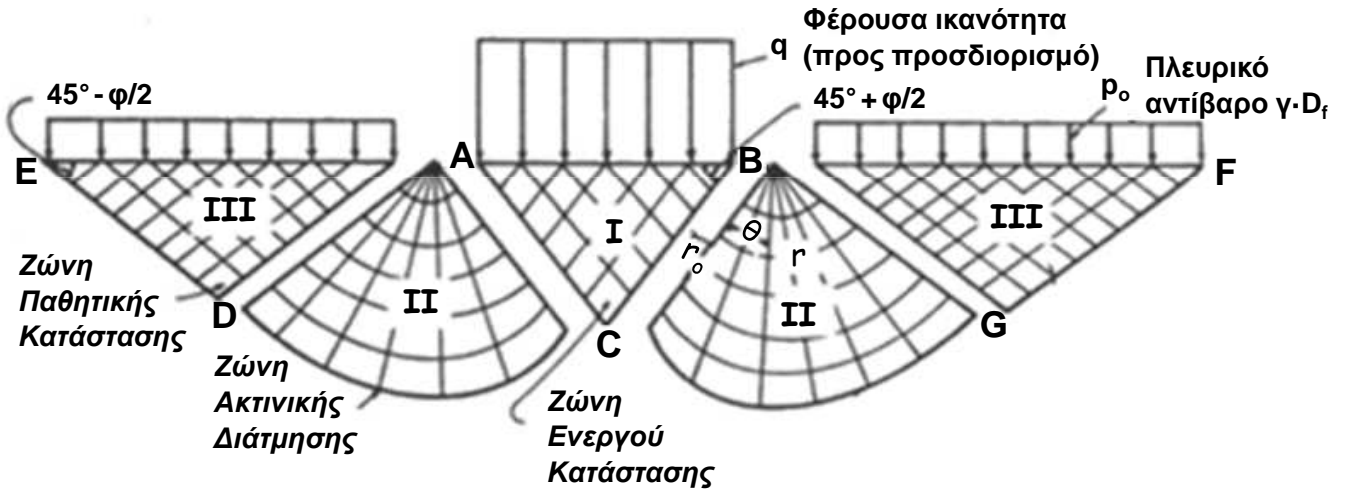
Ο μηχανισμός αστοχίας εδάφους στη γενική του μορφή μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του σχήματος:

- Το πρίσμα abd θεωρείται ένα σώμα με το θεμέλιο και βρίσκεται σε κατάσταση ενεργού ισορροπίας
- Το τμήμα ade βρίσκεται σε κατάσταση πλαστικής ισορροπίας
- Το πρίσμα aef βρίσκεται σε συνθήκες παθητικών ωθήσεων
- Το υπερκείμενο έδαφος όταν υπάρχει βάθος θεμελίωσης θεωρείται ως υπερκείμενο φορτίο (πλευρικό αντίβαρο)



Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

- Με την επιβολή του οριακού φορτίου η ζώνη I βυθίζεται στο έδαφος όταν η ασκούμενη κατά μήκος των πλευρών AC και BC ενεργός ώθηση ξεπεράσει την αντίσταση από την παθητική κατάσταση που επιβάλλουν οι ζώνες II και III
- Η αντίσταση αυτή προέρχεται από τη διατμητική αντοχή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

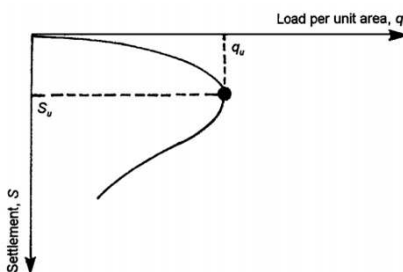
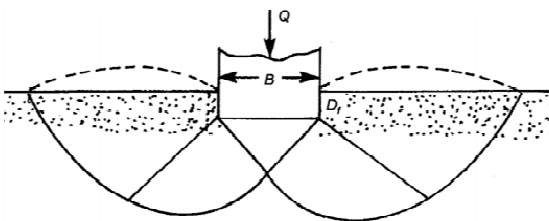


(Σχήμα: Τσότσος 1991, μοντέλο του Prandtl – διάκριση σε ζώνες)

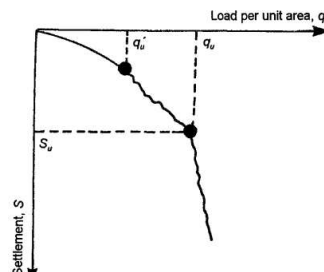
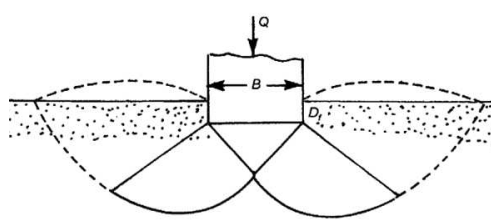
Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

Η αστοχία του εδάφους υπό κατακόρυφη φόρτιση σχετίζεται άμεσα με την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής του και εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και της φόρτισης. Κλασικές μορφές εδαφικής αστοχίας είναι:

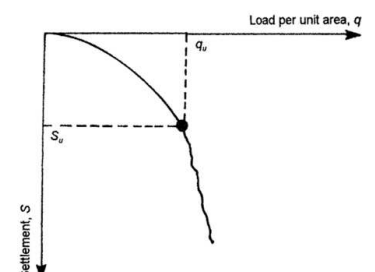
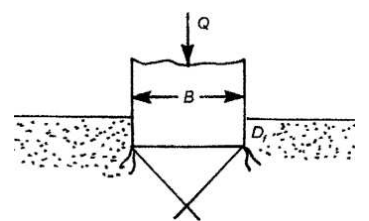
Γενική αστοχία



Τοπική αστοχία



Βύθιση (Διάτρηση)

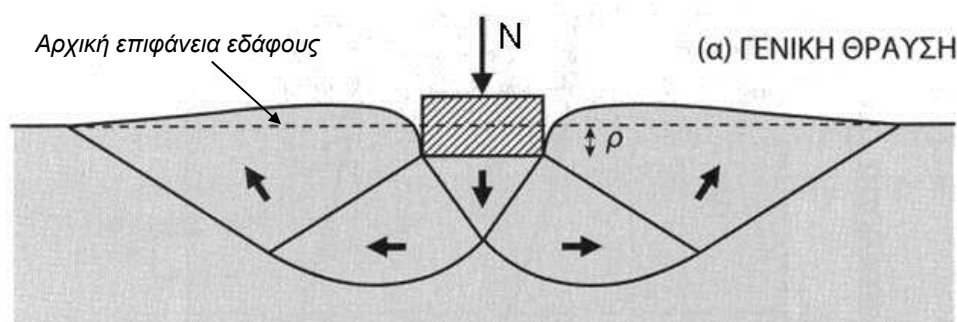


(Σχήμα: Das 1999, Vesic 1973)

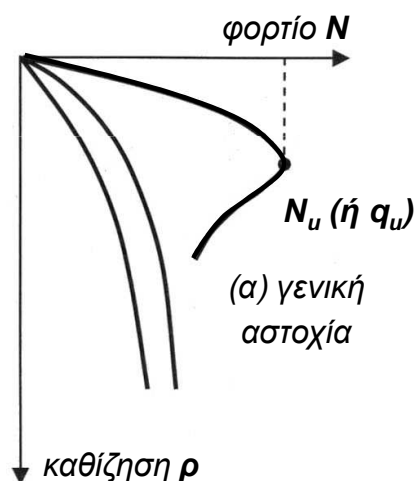
Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

• Γενική αστοχία (γενική θραύση):

- Αφορά πυκνά και πρακτικά ασυμπιέστα εδάφη (πυκνές άμμους, στιφρές αργίλους), όπου υπάρχει επαρκής αντοχή για την πλήρη ανάπτυξη του μηχανισμού αστοχίας και των επιφανειών ολίσθησης
- Η θεμελίωση καθιζάνει και η επιφάνεια του εδάφους ανυψώνεται
- Η αστοχία είναι ξαφνική (απότομη αύξηση της καθίζησης μετά την ανάπτυξη του οριακού φορτίου) και συνοδεύεται και από στροφή του θεμελίου



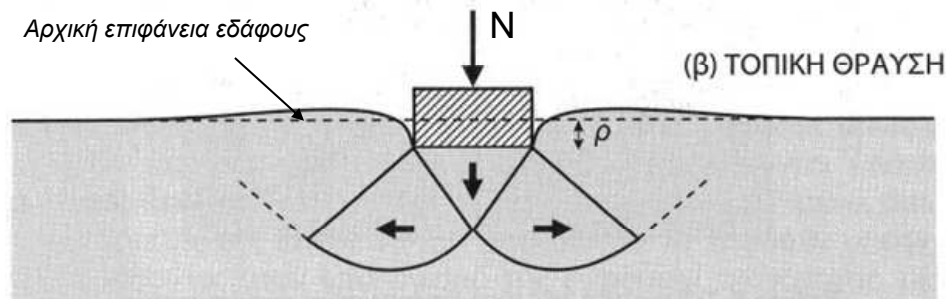
(Σχήμα: Γεωργιάδης Κ. και Γεωργιάδης Μ. 2009)



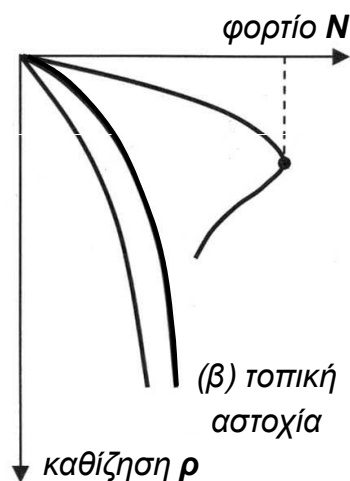
Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

• Τοπική αστοχία (τοπική θραύση):

- Αφορά εδάφη μέσης πυκνότητας και μέσης συμπιεστότητας (μέσης έως χαμηλής πυκνότητας άμμους, μέσης έως μικρής αντοχής αργίλους)
- Εμφανίζεται μικρή ανύψωση στην επιφάνεια του εδάφους
- Οι επιφάνειες αστοχίας εμφανίζονται τοπικά μόνο, κάτω από το θεμέλιο
- Η θεμελίωση καθιζάνει χωρίς να ορίζεται με ακρίβεια το φορτίο αστοχίας



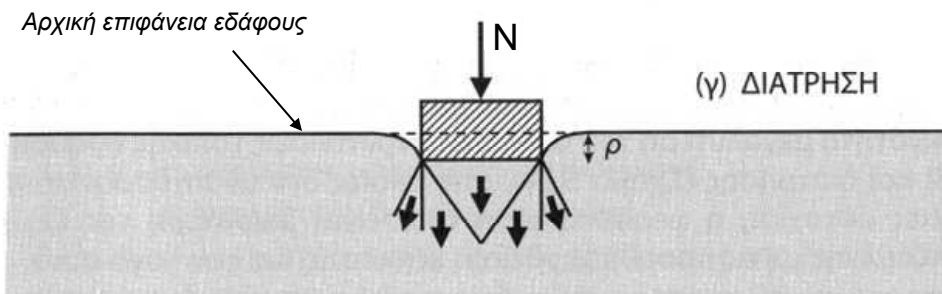
(Σχήμα: Γεωργιάδης Κ. και Γεωργιάδης Μ. 2009)



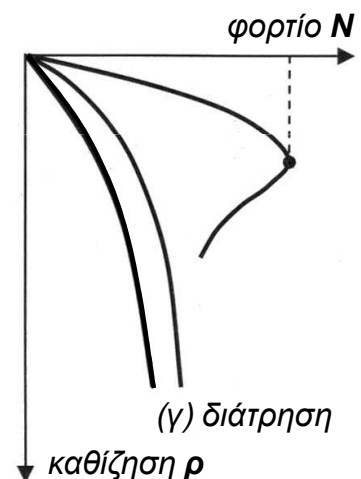
Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

• Διάτρηση (διείσδυση):

- Αφορά χαλαρά εδάφη μικρής πυκνότητας και μεγάλης συμπιεστότητας (χαμηλής πυκνότητας άμμους, μαλακά αργιλικά εδάφη)
- Το θεμέλιο βυθίζεται δίχως ανύψωση στην επιφάνεια του εδάφους
- Λόγω της μεγάλης συμπιεστότητας εμφανίζεται σημαντική καθίζηση δίχως την ενεργοποίηση της πλήρους επιφάνειας διατμητικής αστοχίας
- Πρακτικά σχηματίζεται μια εδαφική σφήνα κάτω από το θεμέλιο η οποία συμπιέζεται και ολισθαίνει μέσα στο έδαφος



(Σχήμα: Γεωργιάδης Κ. και Γεωργιάδης Μ. 2009)



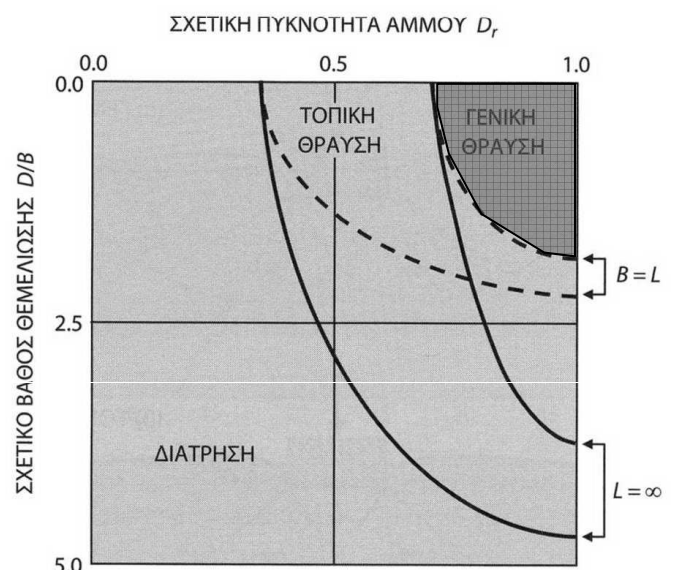
Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

• Προσδιορισμός τύπου αστοχίας του εδάφους (μόνο για αμμώδη εδάφη)

- Γίνεται χρήση του σχήματος (Vesic, 1963) όταν είναι γνωστή η D_r της άμμου
- Τα όρια εμφάνισης των τριών τύπων αστοχίας καθορίζονται με βάση τη σχετική πυκνότητα της άμμου D_r , του πλάτους θεμελίου B , του μήκους θεμελίου L και του βάθους θεμελίωσης D

➤ Γενική θραύση

Για συνήθη βάθη επιφανειακών θεμελιώσεων ($D \leq B$) παρατηρείται σε πυκνά εδάφη με $D_r > 67\%$

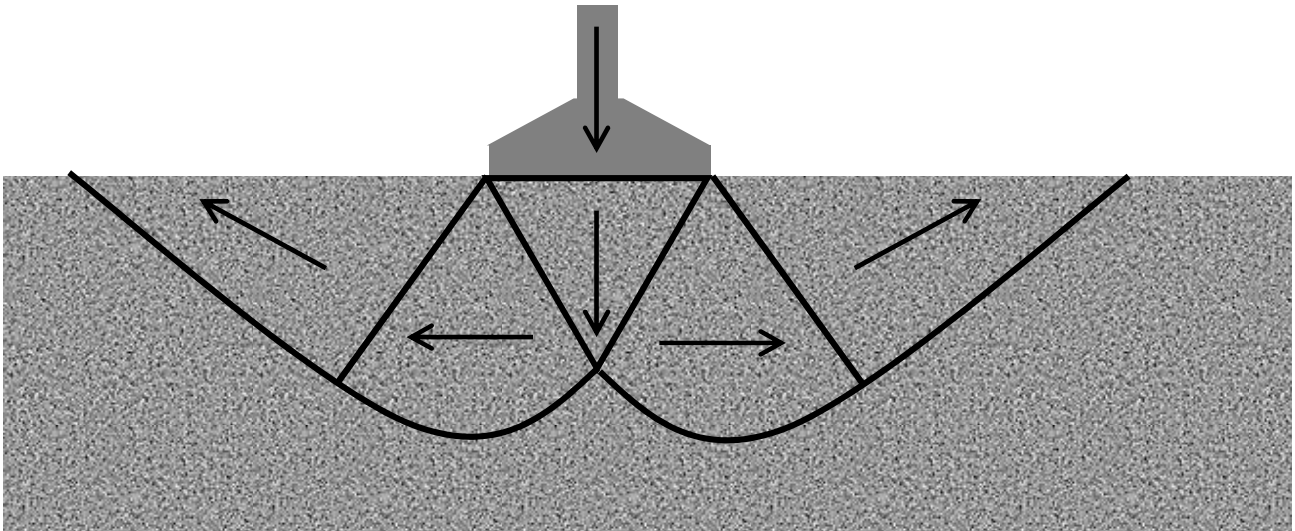


(Σχήμα: Γεωργιάδης Κ. και Γεωργιάδης Μ. 2009 επανασχεδιασμένο από Vesic 1963)



Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

- Γενική αστοχία (γενική θραύση):

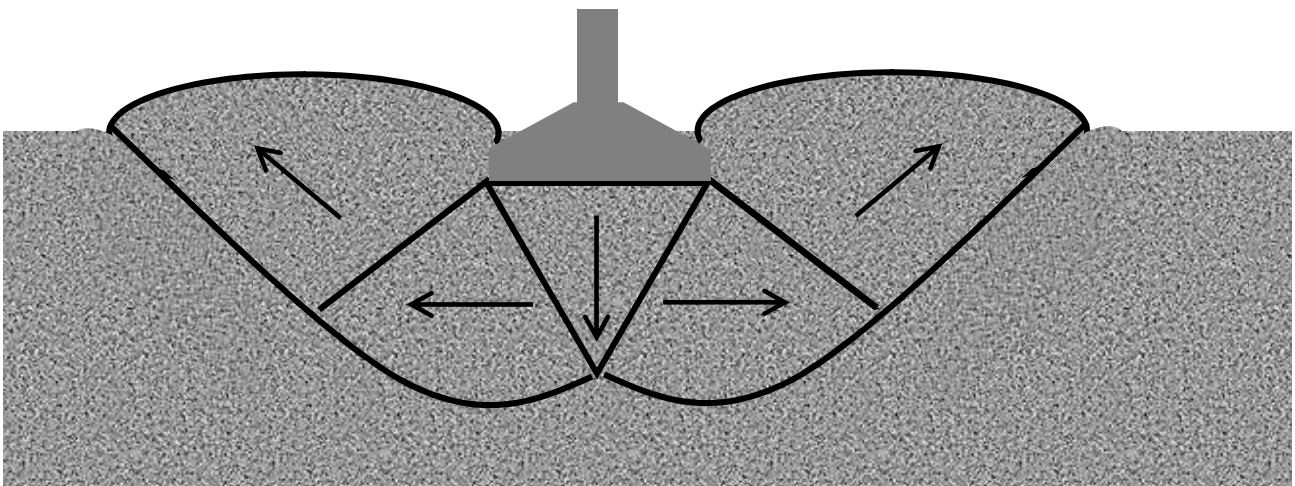


(Σχήμα: Πιπιάκης και συνεργάτες, 2004)



Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους

- Γενική αστοχία (γενική θραύση):



(Σχήμα: Πιπιάκης και συνεργάτες, 2004)

Μηχανισμοί αστοχίας εδάφους



❖ Εφαρμογή :

Να βρεθεί η μορφή θραύσης (δηλαδή ο τύπος αστοχίας) για:

- α) έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=0.8$, πέλδιλο $2 \times 3\text{m}$ και βάθος θεμελίου 2m και 7m
- β) έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=0.2$, πέλδιλο $2 \times 2\text{m}$ και βάθος θεμελίου 1m

Επίλυση :

Γίνεται χρήση του διπλανού σχήματος.

α.1. Είναι $D_f=D=2\text{m}$ και $B=2\text{m}$

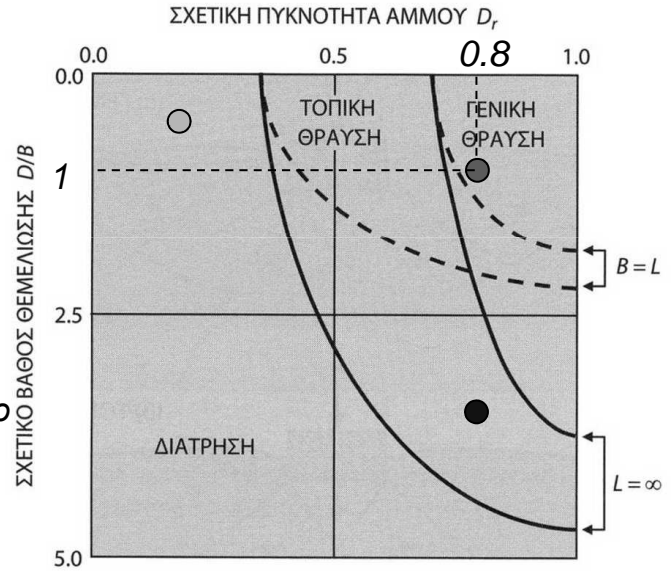
$$\frac{D}{B} = \frac{2}{2} = 1 \quad \text{και} \quad D_r = 0.8 \quad \longrightarrow \quad \text{Γενική αστοχία}$$

α.2. Είναι $D_f=D=7\text{m}$ και $B=2\text{m}$

$$\frac{D}{B} = \frac{7}{2} = 3.5 \quad \text{και} \quad D_r = 0.8 \quad \longrightarrow \quad \text{Τοπική αστοχία, πιο κοντά σε διάτρηση για περίπου τετράγωνο-πέδιλο}$$

β. Είναι $D_f=D=1\text{m}$ και $B=2\text{m}$

$$\frac{D}{B} = \frac{1}{2} = 0.5 \quad \text{και} \quad D_r = 0.2 \quad \longrightarrow \quad \text{Διάτρηση}$$



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

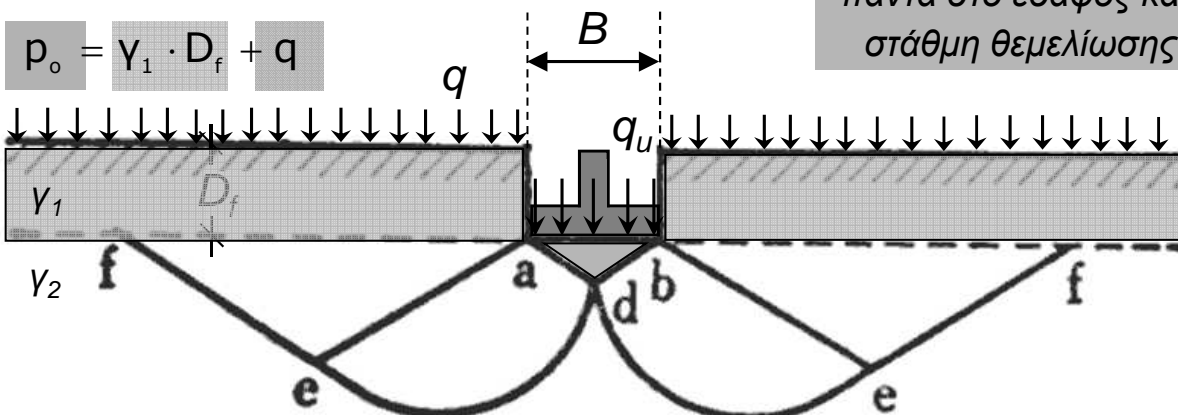
Η σχέση για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους υπό κατακόρυφη φόρτιση στην περίπτωση θεμελίου άπειρου μήκους που εμφανίζει γενική αστοχία δίνεται από τον Terzaghi (1943):

$$q_u = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$

όρος συνοχής
όρος φορτίου υπερκειμένων
όρος ίδιου βάρους

Ο όρος γ στο p_o αναφέρεται πάντα στο έδαφος πάνω από τη στάθμη θεμελίωσης (εδώ γ_1)

Ο όρος γ στο $1/2\gamma B N_\gamma$ αναφέρεται πάντα στο έδαφος κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης (εδώ γ_2)



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

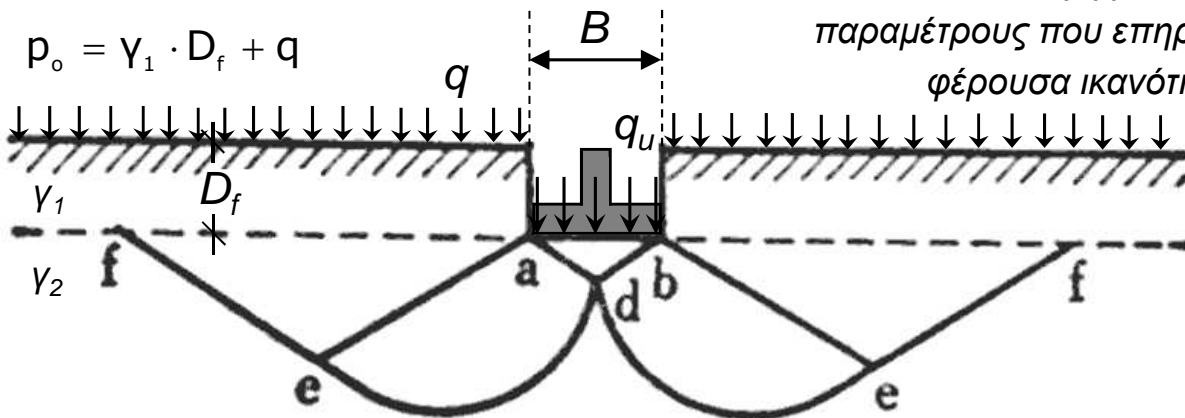
Η σχέση για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους υπό κατακόρυφη φόρτιση στην περίπτωση θεμελίου άπειρου μήκους που εμφανίζει γενική αστοχία δίνεται από τον Terzaghi (1943):

$$q_u = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$

όρος συνοχής όρος φορτίου υπερκειμένων όρος ίδιου βάρους

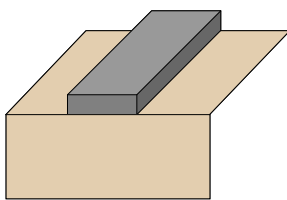
Οι όροι N_c , N_q , N_γ υπολογίζονται βάσει της γωνίας τριβής του εδάφους κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης

Η συγκεκριμένη σχέση δεν λαμβάνει αναλυτικά υπόψη μια σειρά από παραμέτρους που επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα



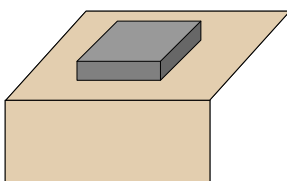
Φέρουσα ικανότητα εδάφους

Αρχικές σχέσεις για τον υπολογισμό φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων από τον Terzaghi (1943):



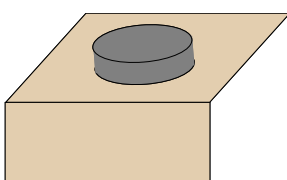
Θεμέλια άπειρου μήκους

$$q_u = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$



Τετραγωνικά θεμέλια

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + 0.4 \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$



Κυκλικά θεμέλια

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + 0.3 \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$

Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων c - ϕ των υπολογισμών αναφέρονται πάντα σε ενεργές τιμές

Η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα υπολογίζεται βάσει των σελ. 5.29-5.30

Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Terzaghi (1943):

Συντελεστές για μορφή γενικής αστοχίας

ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ
0	5.70	1.00	0.00
1	6.00	1.10	0.01
2	6.30	1.22	0.04
3	6.62	1.35	0.06
4	6.97	1.49	0.10
5	7.34	1.64	0.14
6	7.73	1.81	0.20
7	8.15	2.00	0.27
8	8.60	2.21	0.35
9	9.09	2.44	0.44
10	9.61	2.69	0.56
11	10.16	2.98	0.69
12	10.76	3.29	0.85
13	11.41	3.63	1.04
14	12.11	4.02	1.26
15	12.86	4.45	1.52
16	13.68	4.92	1.82
17	14.60	5.45	2.18
18	15.12	6.04	2.59
19	16.56	6.70	3.07
20	17.69	7.44	3.64
21	18.92	8.26	4.31
22	20.27	9.19	5.09
23	21.75	10.23	6.00
24	23.36	11.40	7.08
25	25.13	12.72	8.34

(Σχήμα: Das 2007, μεταφορά από Kumbhojkar 1993)

Η γωνία τριβής αναφέρεται στο έδαφος κάτω από τη θεμελίωση

Συντελεστές για μορφή τοπικής αστοχίας

ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5.70	1.00	0.00
1	5.90	1.07	0.005
2	6.10	1.14	0.02
3	6.30	1.22	0.04
4	6.51	1.30	0.055
5	6.74	1.39	0.074
6	6.97	1.49	0.10
7	7.22	1.59	0.128
8	7.47	1.70	0.16
9	7.74	1.82	0.20
10	8.02	1.94	0.24
11	8.32	2.08	0.30
12	8.63	2.22	0.35
13	8.96	2.38	0.42
14	9.31	2.55	0.48
15	9.67	2.73	0.57
16	10.06	2.92	0.67
17	10.47	3.13	0.76
18	10.90	3.36	0.88
19	11.36	3.61	1.03
20	11.85	3.88	1.12
21	12.37	4.17	1.35
22	12.92	4.48	1.55
23	13.51	4.82	1.74
24	14.14	5.20	1.97
25	14.80	5.60	2.25

Για τοπική αστοχία θα πρέπει επίσης να ληφθεί:

$$c^* = 0.67 \cdot c \text{ (αναλύεται σε επόμενη διαφάνεια)}$$

Φέρουσα Ικανότητα εδάφους



❖ Εφαρμογή :

Θεμέλιο με μορφή λωρίδας πλάτους $B=1.5m$ θεμελιώνεται σε βάθος $2m$ σε ασυμπίεστο έδαφος με χαρακτηριστικά $c=20 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ και $\phi=25^\circ$. Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα q_u κατά Terzaghi.

Επίλυση :

Θεωρούμε λόγω ασυμπίεστου εδάφους γενική μορφή αστοχίας.

Η φέρουσα ικανότητα κατά Terzaghi δίνεται: $q_u = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$ με $p_o = \gamma_1 \cdot D_f$

Για $\phi=25^\circ$ προκύπτει από τους πίνακες του Terzaghi:

ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ
25	25.13	12.72	8.34

$$\text{Οπότε: } q_u = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 25.13 + 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 2m \cdot 12.72 + \frac{1}{2} 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 1.5m \cdot 8.34 \Rightarrow$$

$$q_u = 502.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 457.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 112.59 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \Rightarrow q_u = 1073.11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ ή } \text{kPa}$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Εφαρμογή :

Τετραγωνικό θεμέλιο $1.5 \times 1.5 \text{ m}$ θεμελιώνεται σε βάθος 2 m σε συμπιεστό έδαφος με χαρακτηριστικά $c=20 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ και $\phi=25^\circ$. Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα q_u κατά Terzaghi.

Επίλυση :

Θεωρούμε λόγω συμπιεστού εδάφους τοπική μορφή αστοχίας (πίνακας με μειωμένους συντελεστές N και απομειωμένη τιμή συνοχής c).

Για τετραγωνικό θεμέλιο κατά Terzaghi: $q_u = 1.3 \cdot (0.67 c) N'_c + p_o N'_q + 0.4 \gamma_2 B N'_\gamma$ με $p_o = \gamma_1 \cdot D_f$

Για $\phi=25^\circ$ προκύπτει από τους πίνακες του Terzaghi:

$\phi' (^\circ)$	N'_c	N'_q	N'_γ
25	14.80	5.60	2.25

Οπότε: $q_u = 1.3 \cdot 0.67 \cdot 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 14.80 + 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 2 \text{ m} \cdot 5.60 + 0.4 \cdot 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 1.5 \text{ m} \cdot 2.25 \Rightarrow$

$$q_u = 257.82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 201.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 24.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \Rightarrow q_u = 483.72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ ή } \text{kPa}$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

Αρχική σχέση για τον υπολογισμό φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων από τον Terzaghi (θεμέλιο άπειρου μήκους):

$$q_u = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma$$

Όπως ήδη αναφέρθηκε η συγκεκριμένη σχέση δεν λαμβάνει αναλυτικά υπόψη μια σειρά από παραμέτρους που επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα

Γενική σχέση υπολογισμού φέρουσας ικανότητας μετά από συμβολή πολλών ερευνητών (Meyerhof, Hansen, Vesic)

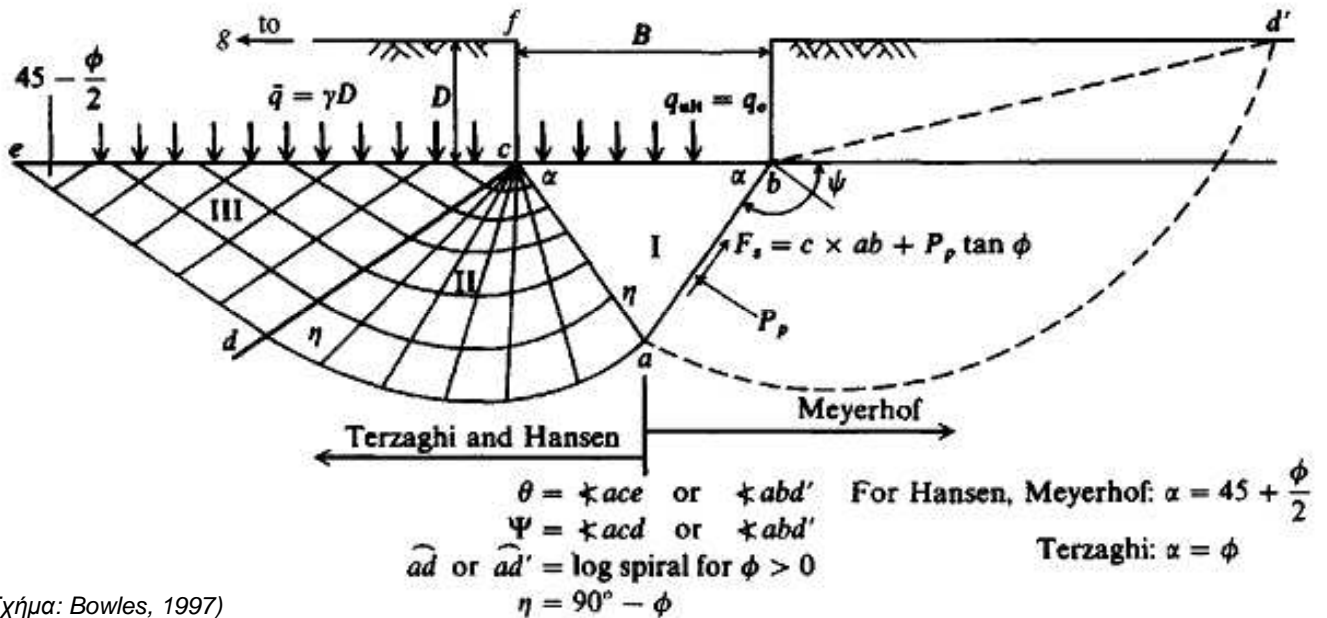
$$q_u = s_c d_c i_c g_c b_c (c \cdot N_c) + s_q d_q i_q g_q b_q (p_o \cdot N_q) + s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \left(\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma \right)$$

- s: Συντελεστές μορφής-σχήματος της θεμελίωσης
- d: Συντελεστές βάθους θεμελίωσης
- i: Συντελεστές κλίσης του φορτίου
- g: Συντελεστές κλίσης της επιφάνειας τους εδάφους
- b: Συντελεστές κλίσης της βάσης έδρασης της θεμελίωσης

Η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα για όλες τις μεθόδους ανάλυσης (Terzaghi, Meyerhof, κτλ) υπολογίζεται βάσει των σελ. 5.29-5.30

Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

Κάποιες από τις διαφορές στις θεωρήσεις μεταξύ των διαφόρων ερευνητών φαίνονται εποπτικά στο σχήμα:

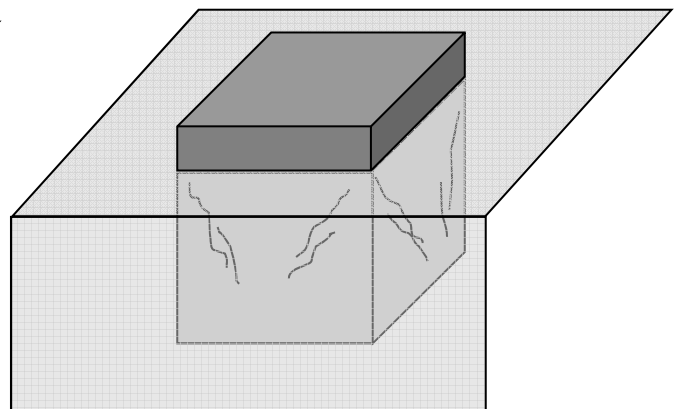
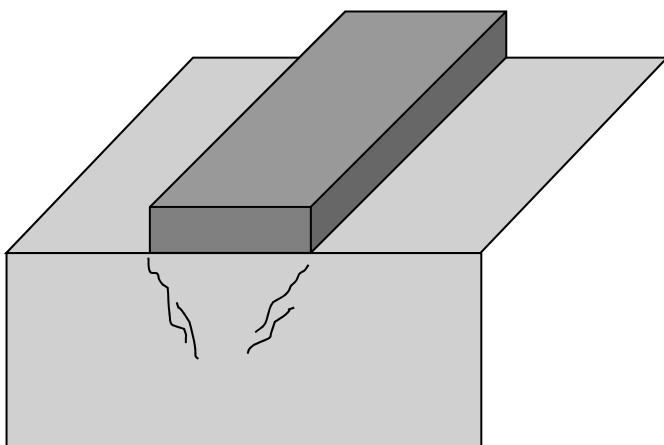


(Σχήμα: Bowles, 1997)

Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

• Επιρροή του σχήματος της θεμελίωσης:

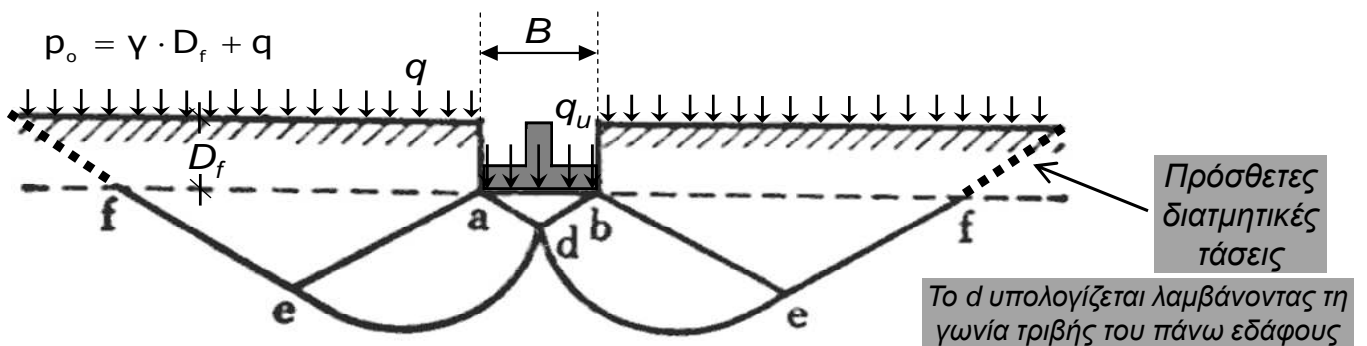
- Η θεωρητική λύση αφορά θεμελίωση απείρου μήκους
- Στα θεμέλια πεπερασμένου μήκους L, η αστοχία του εδάφους στα όρια του μήκους δίνει μια πρόσθετη αντοχή στο έδαφος
- Για θεμέλια πεπερασμένου μήκους L λαμβάνονται συντελεστές σχήματος της θεμελίωσης με τον δείκτη *s* (shape)



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Επιρροή του βάθους της θεμελίωσης:

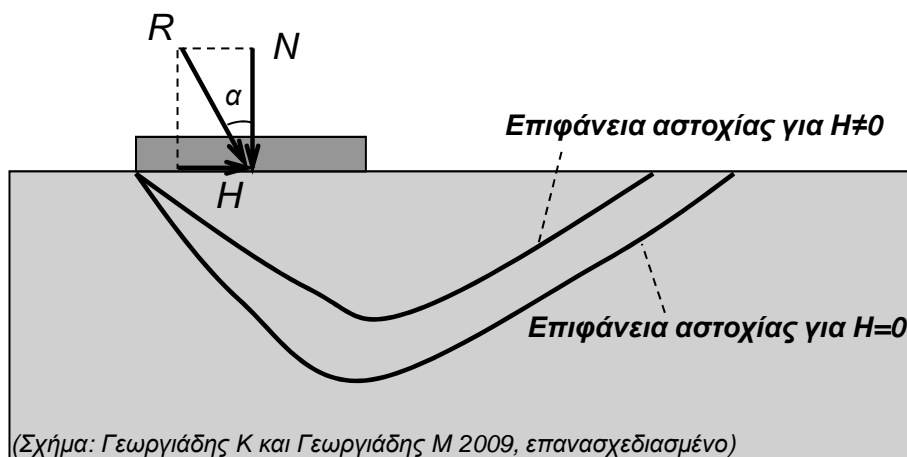
- Το βάθος της θεμελίωσης D_f αυξάνει την επιφόρτιση p_o η οποία ούτως η άλλως υπολογίζεται στη φέρουσα ικανότητα με τον σχετικό όρο
- Παράλληλα υπάρχει μια πρόσθετη αύξηση της φέρουσας ικανότητας λόγω των διατμητικών τάσεων στο έδαφος στο τμήμα της επιφάνειας θραύσης πάνω από τη στάθμη του θεμελίου, που συνυπολογίζεται με τους συντελεστές βάθους με δείκτη d (*depth*)
- Για λόγους ασφαλείας, καθώς το υπερκείμενο έδαφος είναι αμφιβόλου ποιότητας (επίχωση), συχνά οι δείκτες αυτοί δεν λαμβάνονται υπόψη ($d=1$)



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Επιρροή της κλίσης του φορτίου:

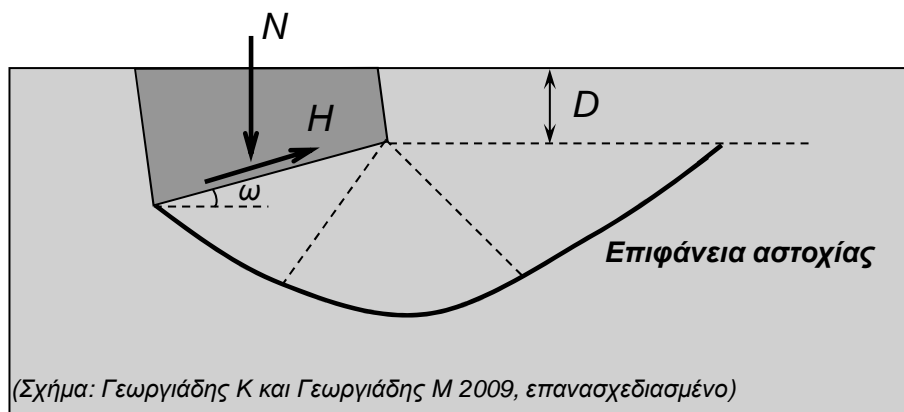
- Η κλίση του φορτίου οφείλεται στην συνύπαρξη οριζόντιου φορτίου εκτός από το κατακόρυφο
- Στην περίπτωση κεκλιμένης φόρτισης το μήκος της επιφάνειας αστοχίας είναι μικρότερο με αποτέλεσμα μικρότερη φέρουσα ικανότητα
- Για τον συνυπολογισμό της κλίσης του φορτίου λαμβάνονται συντελεστές κλίσης με τον δείκτη i (*inclination*)



Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

• Επιρροή της κλίσης της βάσης έδρασης του θεμελίου:

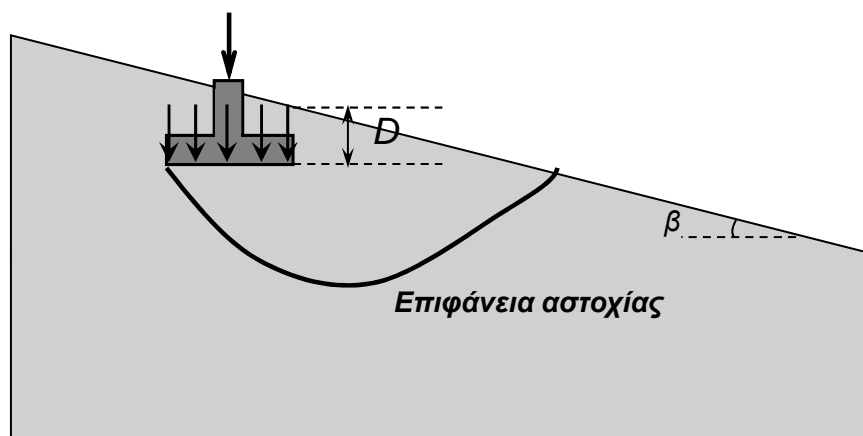
- Όταν η βάση του θεμελίου είναι κεκλιμένη μικραίνει το μήκος αστοχίας του εδάφους με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας
- Η μείωση αυτή λαμβάνεται υπόψη με τους συντελεστές κλίσης της βάσης της θεμελίωσης με τον δείκτη **b** (base)
- Η επιφόρτιση p_0 υπολογίζεται στην πλευρά με το μικρότερο βάθος D



Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

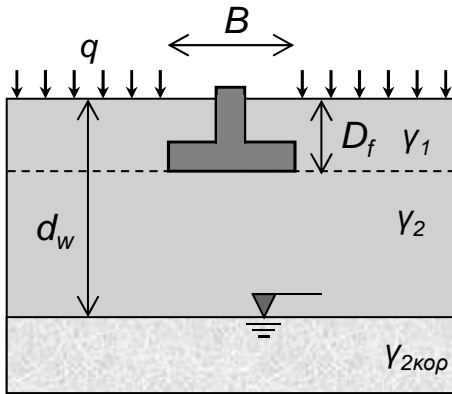
• Επιρροή της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους:

- Όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι κεκλιμένη μικραίνει το μήκος αστοχίας του εδάφους με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας
- Η μείωση αυτή λαμβάνεται υπόψη με τους συντελεστές κλίσης εδάφους με τον δείκτη **g** (ground)

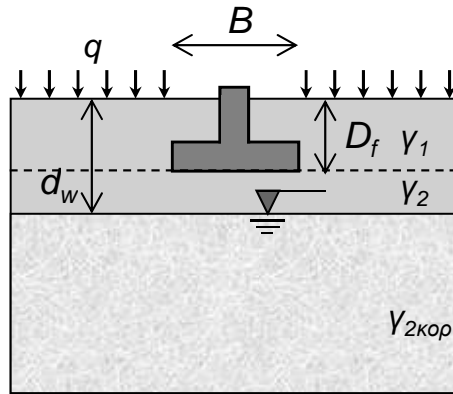


Φέρουσα ικανότητα εδάφους

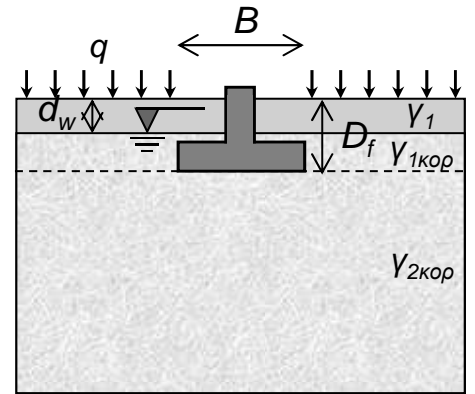
- Επιρροή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (για όλες τις μεθόδους):
 - Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα επηρεάζει το ειδικό βάρος του εδάφους που εμπλέκεται στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας (στους όρους για το φορτίο υπερκειμένων και για το ίδιο βάρος)
 - Διακρίνονται οι υποπεριπτώσεις των παρακάτω σχημάτων ($\gamma_{\text{κορ}} = \gamma_{\text{sat}}$)



$d_w \geq D_f + B$
μηδενική επιρροή



$D_f < d_w < D_f + B$
σταθμισμένη τιμή γ_2 κάτω από τη θεμελίωση



$d_w \leq D_f$
τιμή $\gamma_2' = \gamma_{2\text{κορ}} - \gamma_w$ κάτω από τη θεμελίωση και αλλαγή ρ_o

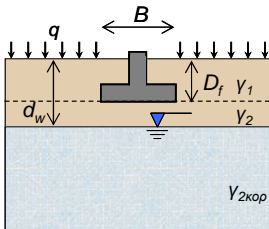
Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Επιρροή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (για όλες τις μεθόδους):

$d_w \geq D_f + B$

- Υδροφόρος ορίζοντας σε μεγάλο βάθος - καμία επιρροή στη φέρουσα ικανότητα

$D_f < d_w < D_f + B$

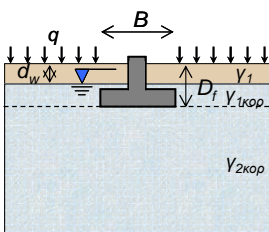


- Τιμή φορτίου επιφόρτισης (δεν μεταβάλλεται) $\rho_o = \gamma_1 \cdot D_f + q$

- Ενεργός τιμή ειδικού βάρους (σταθμισμένη από D_f έως $D_f + B$)

$$\bar{\gamma}'_2 = \frac{\gamma_2 (d_w - D_f) + (\gamma_{2\text{κορ}} - \gamma_w) (D_f + B - d_w)}{B}$$

$d_w \leq D_f$



- Τιμή φορτίου επιφόρτισης $\rho_o = \gamma_1 \cdot d_w + (\gamma_{1\text{κορ}} - \gamma_w) (D_f - d_w) + q$

- Ενεργός τιμή ειδικού βάρους $\gamma'_2 = \gamma_{2\text{κορ}} - \gamma_w$

Σημείωση: Αν δεν δίνεται η τιμή του $\gamma_{\text{κορ}}$ συχνά λαμβάνεται $\gamma_{\text{κορ}} \approx \gamma$

Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

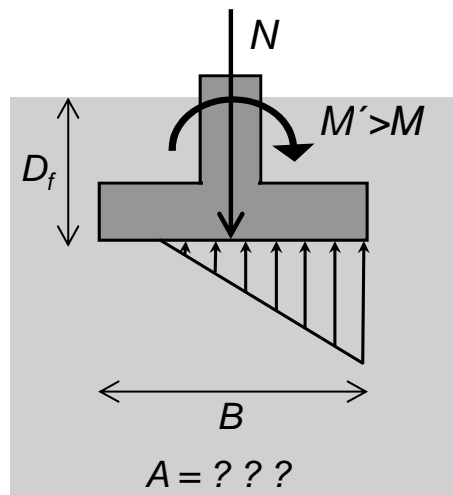
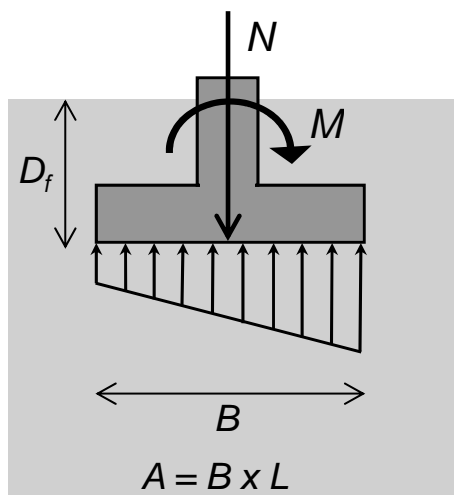
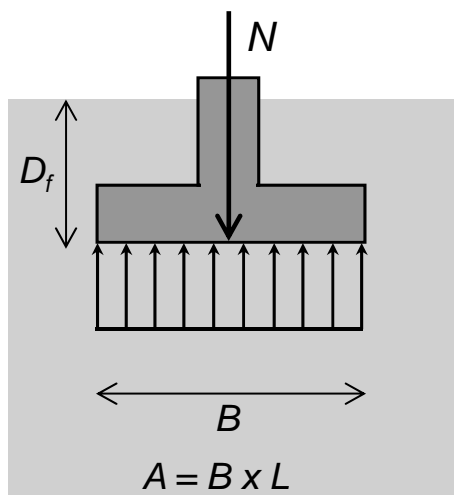
• Επιρροή της εκκεντρότητας του φορτίου:

- Η φόρτιση παρουσιάζει σχεδόν πάντα εκκεντρότητα είτε κατασκευαστική είτε λόγω ύπαρξης ροπής στο κατακόρυφο στοιχείο
- Λόγω της εκκεντρότητας τροποποιείται η ανάπτυξη των τάσεων στο έδαφος

Κεντρική φόρτιση

Εκκεντρότητα

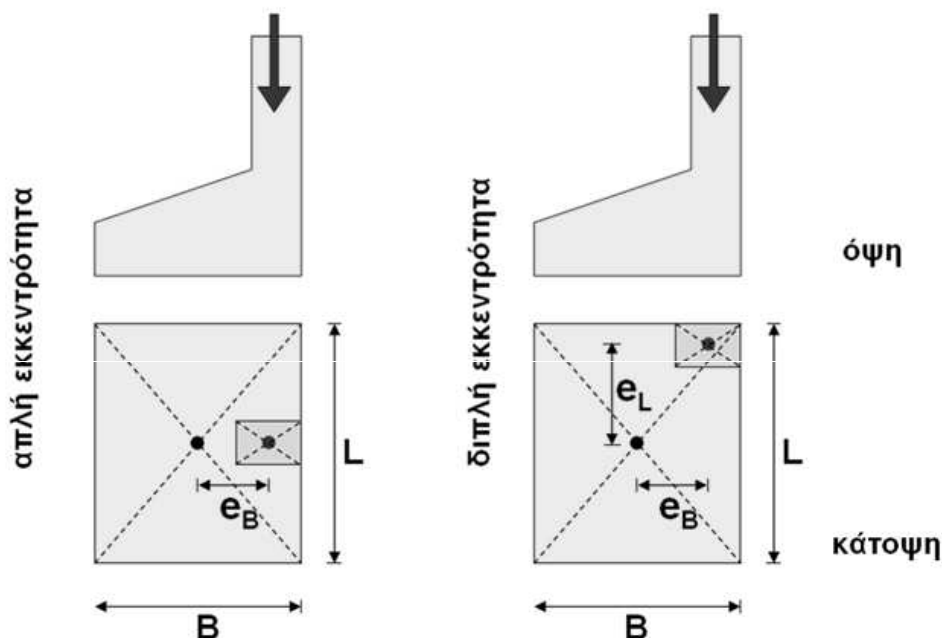
Μεγάλη εκκεντρότητα



Φέρουσα Ικανότητα εδάφους

• Επιρροή της εκκεντρότητας του φορτίου:

- Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την κατασκευαστική εκκεντρότητα



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Επιρροή της εκκεντρότητας του φορτίου:

- Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας χρησιμοποιείται η μέθοδος που εισήγαγε ο Meyerhof (1953)
- Θεωρείται πως η N ασκείται κεντρικά αλλά σε ένα ενεργό πλάτος θεμελίου

Εκκεντρότητα

$$e_B = \frac{M_L}{N} \quad e_L = \frac{M_B}{N}$$

$$B' = B - 2 \cdot e_B$$

$$L' = L - 2 \cdot e_L$$

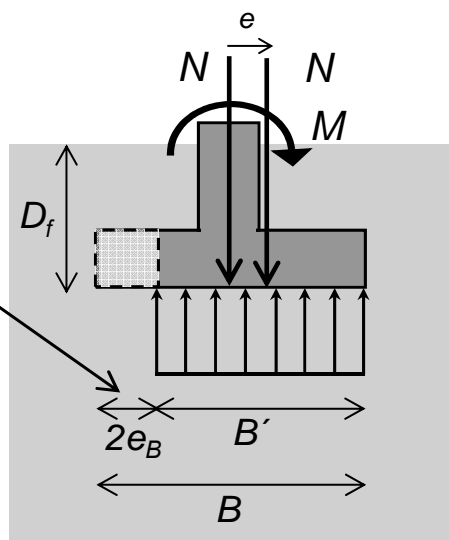
Ενεργές διαστάσεις

B' και L'

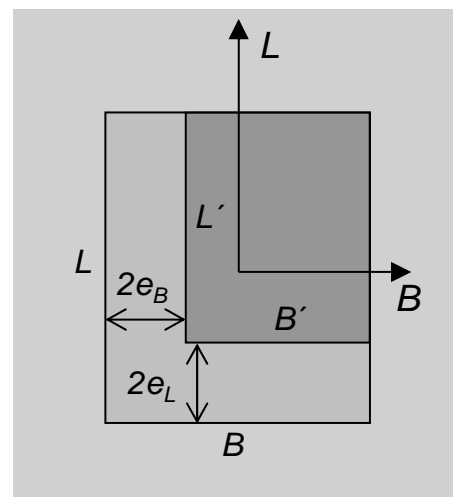
$$A' = B' \cdot L'$$

$$\sigma_{av} = \frac{N}{B' \cdot L'}$$

Τομή θεμελίωσης



Κάτοψη θεμελίωσης

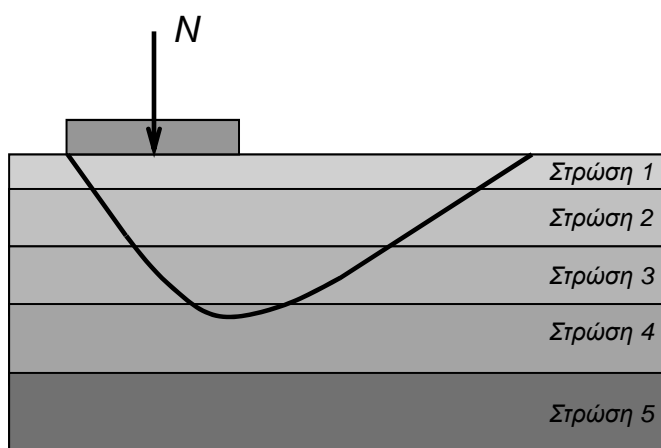


Φέρουσα ικανότητα εδάφους

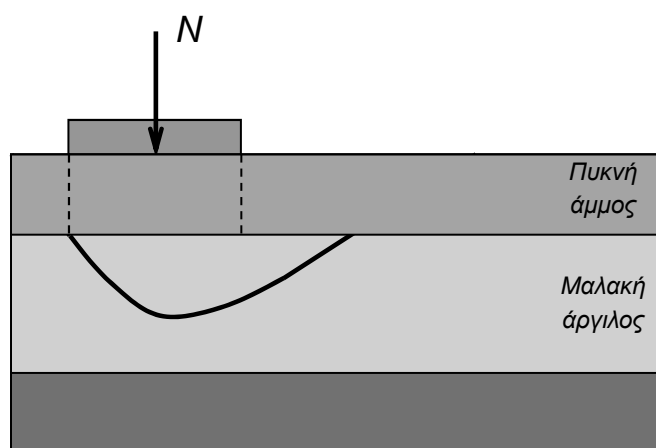
• Επιρροή της στρωματογραφίας του εδάφους:

- Η φέρουσα ικανότητα πολυστρωματικού εδάφους εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή και το πάχος της κάθε στρώσης
- Διακρίνονται δυο περιπτώσεις α) γενικής αστοχίας και β) διάτρησης
- Διάφορες μέθοδοι υπολογισμού (Γεωργιάδης Κ. και Μ., 2009)

Γενική αστοχία



Μηχανισμός διάτρησης



Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Επιρροή των συνθηκών φόρτισης:

- Γενικότερα ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας εξαρτάται από τις συνθήκες της φόρτισης σε κάθε έδαφος
- Οι άργιλοι που υφίστανται ταχεία φόρτιση θεωρείται ότι φορτίζονται υπό αστραγγιστες συνθήκες και αστοχούν με την μορφή γενικής αστοχίας
- Αντίθετα άργιλοι υπό αργή διάτμηση μπορεί να θεωρηθεί ότι φορτίζονται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες οπότε χρησιμοποιούνται απομειωμένες παράμετροι $c=c'$ και $\varphi=\varphi'$
- Το ίδιο συμβαίνει και για άμμους που στραγγίζουν γρήγορα λόγω της κοκκομετρικής τους σύνθεσης

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Επιρροή μορφής αστοχίας:

- Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν περιγράφουν την φέρουσα ικανότητα κατά την ανάπτυξη της γενικής μορφής αστοχίας
- Για την περίπτωση τοπικής αστοχίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής απλοποιητικές παραδοχές (Barnes, 2005):

(α) άργιλοι μέσης ή μεγάλης συμπιεστότητας υπό αργή διάτμηση σε στραγγιζόμενες συνθήκες (Terzaghi, 1943)

$$c^* = 0.67 \cdot c \quad \text{και} \quad \tan \varphi^* = 0.67 \cdot \tan \varphi$$

Σημειώνεται πως η παραπάνω μείωση του φ ήδη λαμβάνεται υπόψη στις τιμές των πινάκων για τοπική μορφή αστοχίας άρα απαιτείται μόνο η τροποποίηση του c

(β) χαλαρές ή μέσης πυκνότητας άμμοι ($D_r < 0.67$) που εμφανίζουν τοπική αστοχία (Vesic, 1973)

$$\tan \varphi^* = (0.67 + D_r - 0.75 \cdot D_r^2) \cdot \tan \varphi$$

Η σχέση δίνεται βιβλιογραφικά. Στο παρόν χρησιμοποιούνται οι μειωμένες τιμές φ από τους πίνακες για τοπική μορφή αστοχίας

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Ποιες είναι οι κατάλληλες σχέσεις για τον υπολογισμό :

- Κατά καιρούς έχουν παρουσιαστεί πολλές σχέσεις προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας, μια σύνοψη των οποίων γίνονται από τον Bowles (1997) και από τους Γεωργιάδη Κ. και Μ. (2009)
- Οι σχέσεις του Terzaghi πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για κεντρικά φορτιζόμενα θεμέλια σε έδαφος δίχως κλίση. Δεν συνιστώνται στην περίπτωση ύπαρξης ροπής ή οριζόντιας δύναμης, ή σε θεμέλιο με κεκλιμένη βάση. Συχνά, λόγω απλότητας, χρησιμοποιούνται στη φάση της προδιαστασιολόγησης
- Οι σχέσεις του Meyerhof, Hansen χρησιμοποιούνται επίσης συχνά.
- Στις επόμενες διαφάνειες παρουσιάζονται οι σχέσεις και οι διάφορες παράμετροι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας βάσει:
 - (α) του Ευρωκώδικα 7
 - (β) της σχέσης του Meyerhof

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Eurocode 7 (annex D):

Με βάση τον EC7 γίνεται δεκτή η χρήση οποιασδήποτε επιστημονικώς τεκμηριωμένης σχέσης υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας

Ο EC7 προτείνει τις σχέσεις του διπλανού πίνακα

Θα πρέπει επίσης να συνυπολογιστούν:

α) τυχόν επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα

β) η εκκεντρότητα εφαρμογής των φορτίων (λόγω ροπής ή κατασκευαστικής εκκεντρότητας)

γ) επιρροή της στρωματογραφίας

Οι διάφορες εδαφικές παράμετροι του πίνακα αφορούν το έδαφος κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης

Στραγγισμένη φόρτιση (άμμοι γενικά – άργιλοι υπό αργή διάτμηση)		
Φέρουσα ικανότητα	$q_u = s_c i_c b_c (c \cdot N_c) + s_q i_q b_q (p_o \cdot N_q) + s_v i_v b_v \left(\frac{1}{2} \gamma_z \cdot B' \cdot N_v \right)$	
$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \phi}$	$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{n \cdot \tan \phi}$	$N_v = 2(N_q - 1) \tan \phi$
$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi$	$s_v = 1 - 0.3 \frac{B'}{L'}$
$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + \frac{B' L' c}{\tan \phi}} \right)^m$	$i_v = \left(1 - \frac{H}{V + \frac{B' L' c}{\tan \phi}} \right)^{m+1}$
$b_c = \frac{b_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$b_q = (1 - \omega \tan \phi)^2$	$b_v = (1 - \omega \tan \phi)^2$
$m = m_L \cos^2 \theta + m_b \sin^2 \theta$ όπου $m_L = \frac{2 + L'/B'}{1 + L'/B'}$ και $m_b = \frac{2 + B'/L'}{1 + B'/L'}$ θ η γωνία της συνισταμένης H των οριζόντιων φορτίων με την μεγάλη διάσταση του θεμελίου		
Αστράγγιστη φόρτιση (άργιλοι υπό ταχεία φόρτιση)		
Φέρουσα ικανότητα	$q_u = 5.14 c_u s_c i_c b_c + p_o$	
$s_c = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'}$	$i_c = 0.5 + 0.5 \left(1 - \frac{H}{B' L' c_u} \right)^{0.5}$	$b_c = 1 - \frac{2 \omega}{\pi + 2}$
Το ω στις παραπάνω σχέσεις εισάγεται σε ακτίνια (γωνία της βάσης του θεμελίου) V, H το κατακόρυφο και οριζόντιο φορτίο στη θεμελίωση c, φ, γ ενεργός τιμή συνοχής, γωνίας τριβής και πυκνότητας του εδάφους c _u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους B', L' ενεργός τιμή πλάτους και μήκους θεμελίου (σε κυκλικά-τετραγωνικά B'/L' = 1)		

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Eurocode 7 (annex D):

Συντελεστές για μορφή γενικής αστοχίας

ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ	ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ
0	5.140	1.000	0.000	26	22.254	11.854	10.588
1	5.379	1.094	0.003	27	23.942	13.199	12.432
2	5.632	1.197	0.014	28	25.803	14.720	14.590
3	5.900	1.309	0.032	29	27.860	16.443	17.121
4	6.185	1.433	0.060	30	30.140	18.401	20.093
5	6.489	1.568	0.099	31	32.671	20.631	23.591
6	6.813	1.716	0.151	32	35.490	23.177	27.715
7	7.158	1.879	0.216	33	38.638	26.092	32.590
8	7.527	2.058	0.297	34	42.164	29.440	38.366
9	7.922	2.255	0.397	35	46.124	33.296	45.228
10	8.345	2.471	0.519	36	50.585	37.752	53.405
11	8.798	2.710	0.665	37	55.630	42.920	63.178
12	9.285	2.974	0.839	38	61.352	48.933	74.899
13	9.807	3.264	1.045	39	67.867	55.957	89.007
14	10.370	3.586	1.289	40	75.313	64.195	106.054
15	10.977	3.941	1.576	41	83.858	73.897	126.737
16	11.631	4.335	1.913	42	93.706	85.374	151.941
17	12.338	4.772	2.307	43	105.107	99.014	182.800
18	13.104	5.258	2.767	44	118.369	115.308	220.772
19	13.934	5.798	3.304	45	133.874	134.874	267.748
20	14.835	6.399	3.930	46	152.098	158.502	326.196
21	15.815	7.071	4.661	47	173.640	187.206	399.363
22	16.883	7.821	5.512	48	199.259	222.300	491.556
23	18.049	8.661	6.504	49	229.924	265.497	608.539
24	19.324	9.603	7.661	50	266.882	319.057	758.092
25	20.721	10.662	9.011				

Η γωνία τριβής αναφέρεται στο έδαφος κάτω από τη θεμελίωση

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Eurocode 7 (annex D):

Συντελεστές για μορφή τοπικής αστοχίας

ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ	ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5.140	1.000	0.000	26	13.181	5.307	2.815
1	5.299	1.062	0.001	27	13.804	5.712	3.217
2	5.463	1.128	0.006	28	14.473	6.156	3.673
3	5.634	1.198	0.014	29	15.192	6.642	4.191
4	5.813	1.272	0.026	30	15.967	7.176	4.778
5	5.999	1.352	0.041	31	16.803	7.765	5.447
6	6.193	1.436	0.061	32	17.708	8.414	6.208
7	6.397	1.526	0.087	33	18.690	9.132	7.076
8	6.609	1.622	0.117	34	19.756	9.928	8.069
9	6.832	1.725	0.154	35	20.916	10.813	9.207
10	7.065	1.835	0.197	36	22.184	11.799	10.513
11	7.310	1.952	0.248	37	23.571	12.901	12.017
12	7.568	2.078	0.307	38	25.094	14.136	13.752
13	7.838	2.212	0.375	39	26.769	15.524	15.760
14	8.123	2.357	0.453	40	28.619	17.090	18.091
15	8.423	2.512	0.543	41	30.668	18.861	20.806
16	8.740	2.679	0.645	42	32.943	20.874	23.978
17	9.074	2.859	0.761	43	35.480	23.167	27.700
18	9.428	3.052	0.894	44	38.318	25.792	32.082
19	9.802	3.261	1.043	45	41.506	28.809	37.265
20	10.200	3.487	1.213	46	45.102	32.292	43.421
21	10.621	3.732	1.405	47	49.175	36.332	50.770
22	11.069	3.996	1.622	48	53.809	41.040	59.588
23	11.547	4.284	1.868	49	59.109	46.558	70.227
24	12.056	4.596	2.146	50	65.200	53.061	83.138
25	12.599	4.936	2.460				

Στον πίνακα ήδη έγινε χρήση της απομείωσης:

$$\tan\phi^* = 0.67 \cdot \tan\phi$$

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί:

$$c^* = 0.67 \cdot c$$

Η γωνία τριβής αναφέρεται στο έδαφος κάτω από τη θεμελίωση

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Meyerhof (1953, 1963):

Ο Meyerhof προτείνει τις σχέσεις του διπλανού πίνακα

Θα πρέπει επίσης να συνυπολογιστούν:

α) τυχόν επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα

β) η εκκεντρότητα εφαρμογής των φορτίων (λόγω ροπής ή κατασκευαστικής εκκεντρότητας)

γ) επιρροή της στρωματογραφίας

Οι διάφορες εδαφικές παράμετροι του πίνακα αφορούν το έδαφος κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης. Μόνο στον υπολογισμό του συντελ. βάθους d λαμβάνεται η ϕ του πάνω εδάφους.

Στραγγισμένη φόρτιση (άμμοι γενικά – άργιλοι υπό αργή διάτμηση)		
Φέρουσα ικανότητα $q_u = s_c i_c d_c (c \cdot N_c) + s_q i_q d_q (p_o \cdot N_q) + s_v i_v d_v \left(\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B' \cdot N_v \right)$		
$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \phi}$	$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{n \cdot \tan \phi}$	$N_v = (N_q - 1) \tan(1.4 \phi)$
$s_c = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	$s_q = 1 + 0.1 \frac{B'}{L'} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	$s_v = 1 + 0.1 \frac{B'}{L'} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$
$i_c = \left(1 - \frac{2a}{n} \right)^2$	$i_q = \left(1 - \frac{2a}{n} \right)^2$	$i_v = \left(1 - \frac{a}{\phi} \right)^2$
$d_c = 1 + 0.2 \frac{D}{B'} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	$d_q = 1 + 0.1 \frac{D}{B'} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	$d_v = 1 + 0.1 \frac{D}{B'} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$
Αστράγγιστη φόρτιση (άργιλοι υπό ταχεία φόρτιση)		
Φέρουσα ικανότητα $q_u = 5.14 c_u s_c i_c d_c + p_o s_q i_q d_q$		
$s_c = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'}$	$i_c = \left(1 - \frac{2a}{n} \right)^2$	$d_c = 1 + 0.2 \frac{D}{B'}$
$s_q = 1$	$i_q = \left(1 - \frac{2a}{n} \right)^2$	$d_q = 1$
α η γωνία της συνισταμένης οριζόντιου και κατακόρυφου φορτίου με την κατακόρυφο c , φ , γ ενεργός τιμή συνοχής, γωνίας τριβής και πυκνότητας του εδάφους c _u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους B', L' ενεργός τιμή πλάτους και μήκους θεμελίου (σε κυκλικά-τετραγωνικά B'/L' = 1) (Bowles 1997): κατά τον υπολογισμό του συντελεστή βάθους d χρησιμοποιείται η ενεργός τιμή B'		

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Meyerhof (1953, 1963):

Συντελεστές για μορφή γενικής αστοχίας

φ (°)	N _c	N _q	N _v	φ (°)	N _c	N _q	N _v
0	5.140	1.000	0.000	26	22.254	11.854	8.002
1	5.379	1.094	0.002	27	23.942	13.199	9.463
2	5.632	1.197	0.010	28	25.803	14.720	11.190
3	5.900	1.309	0.023	29	27.860	16.443	13.237
4	6.185	1.433	0.042	30	30.140	18.401	15.668
5	6.489	1.568	0.070	31	32.671	20.631	18.564
6	6.813	1.716	0.106	32	35.490	23.177	22.022
7	7.158	1.879	0.152	33	38.638	26.092	26.166
8	7.527	2.058	0.209	34	42.164	29.440	31.146
9	7.922	2.255	0.280	35	46.124	33.296	37.152
10	8.345	2.471	0.367	36	50.585	37.752	44.426
11	8.798	2.710	0.471	37	55.630	42.920	53.271
12	9.285	2.974	0.596	38	61.352	48.933	64.074
13	9.807	3.264	0.744	39	67.867	55.957	77.333
14	10.370	3.586	0.921	40	75.313	64.195	93.691
15	10.977	3.941	1.129	41	83.858	73.897	113.986
16	11.631	4.335	1.375	42	93.706	85.374	139.317
17	12.338	4.772	1.664	43	105.107	99.014	171.143
18	13.104	5.258	2.003	44	118.369	115.308	211.408
19	13.934	5.798	2.403	45	133.874	134.874	262.742
20	14.835	6.399	2.871	46	152.098	158.502	328.731
21	15.815	7.071	3.421	47	173.640	187.206	414.327
22	16.883	7.821	4.066	48	199.259	222.300	526.451
23	18.049	8.661	4.825	49	229.924	265.497	674.918
24	19.324	9.603	5.716	50	266.882	319.057	873.855
25	20.721	10.662	6.766				

Η γωνία τριβής αναφέρεται στο έδαφος κάτω από τη θεμελίωση

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά Meyerhof (1953, 1963):

Συντελεστές για μορφή τοπικής αστοχίας

Στον πίνακα ήδη έγινε χρήση της απομείωσης:

$$\tan\phi^* = 0.67 \cdot \tan\phi$$

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί:

$$c^* = 0.67 \cdot c$$

ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ	ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5.140	1.000	0.000	26	13.181	5.307	2.039
1	5.299	1.062	0.001	27	13.804	5.712	2.338
2	5.463	1.128	0.004	28	14.473	6.156	2.678
3	5.634	1.198	0.010	29	15.192	6.642	3.066
4	5.813	1.272	0.018	30	15.967	7.176	3.510
5	5.999	1.352	0.029	31	16.803	7.765	4.017
6	6.193	1.436	0.043	32	17.708	8.414	4.598
7	6.397	1.526	0.061	33	18.690	9.132	5.265
8	6.609	1.622	0.082	34	19.756	9.928	6.033
9	6.832	1.725	0.108	35	20.916	10.813	6.919
10	7.065	1.835	0.139	36	22.184	11.799	7.944
11	7.310	1.952	0.175	37	23.571	12.901	9.133
12	7.568	2.078	0.216	38	25.094	14.136	10.517
13	7.838	2.212	0.265	39	26.769	15.524	12.133
14	8.123	2.357	0.320	40	28.619	17.090	14.027
15	8.423	2.512	0.384	41	30.668	18.861	16.255
16	8.740	2.679	0.457	42	32.943	20.874	18.887
17	9.074	2.859	0.540	43	35.480	23.167	22.009
18	9.428	3.052	0.635	44	38.318	25.792	25.731
19	9.802	3.261	0.743	45	41.506	28.809	30.190
20	10.200	3.487	0.866	46	45.102	32.292	35.562
21	10.621	3.732	1.005	47	49.175	36.332	42.070
22	11.069	3.996	1.163	48	53.809	41.040	50.004
23	11.547	4.284	1.342	49	59.109	46.558	59.744
24	12.056	4.596	1.545	50	65.200	53.061	71.785
25	12.599	4.936	1.777				

Η γωνία τριβής αναφέρεται στο έδαφος κάτω από τη θεμελίωση

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Εφαρμογή :

Πέδιλο 1.5x1.5m θεμελιώνεται σε συμπιεστό έδαφος σε βάθος 2m. Δίνονται $c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=25^\circ$, $\gamma=18\text{kN/m}^3$, $\gamma_{\text{κορ}}=20\text{kN/m}^3$ και $\gamma_w=9.8\text{kN/m}^3$. Να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα του πεδίλου κατά Terzaghi όταν κάτω από το πέδιλο υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας:

α) σε βάθος 2.75m από τη επιφάνεια του εδάφους β) σε βάθος 1m από την επιφάνεια

Επίλυση :

Θεωρούμε τοπική μορφή αστοχίας λόγω συμπιεστού εδάφους.

Για τετραγωνικό θεμέλιο κατά Terzaghi: $q_u = 1.3 \cdot (0.67 c) N'_c + p_o N'_q + 0.4 \gamma_2 B N'_\gamma$

Για $\phi=25^\circ$ και τοπική μορφή αστοχίας προκύπτει από τους πίνακες του Terzaghi:

ϕ (°)	N'_c	N'_q	N'_γ
25	14.80	5.60	2.25

Λόγω του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να τροποποιηθεί το γ του εδάφους στην σχέση υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας.

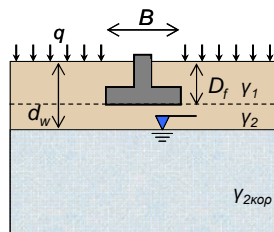
Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

Λόγω του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να τροποποιηθεί το γ του εδάφους:

(α) $D_f < d_w < D_f + B \rightarrow 2m < 2.75m < 3.5m$



- Τιμή φορτίου επιφόρτισης (δεν μεταβάλλεται)

$$p_o = \gamma_1 D_f + q = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 2m + 0 = 36 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Ενεργός τιμή ειδικού βάρους (σταθμισμένη από D_f έως $D_f + B$)

$$\bar{\gamma}'_2 = \frac{\gamma_2 (d_w - D_f) + (\gamma_{2\text{κορ}} - \gamma_w)(D_f + B - d_w)}{B} = \frac{18(2.75 - 2) + (20 - 9.8)(2 + 1.5 - 2.75)}{1.5}$$

Προκύπτει $\bar{\gamma}'_2 = 14.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Οπότε: $q_u = 1.3 \cdot (0.67 c) N'_c + p_o N'_q + 0.4 \bar{\gamma}'_2 B N'_\gamma$

$$q_u = 1.3 \cdot 0.67 \cdot 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 14.80 + 36 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5.60 + 0.4 \cdot 14.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 1.5m \cdot 2.25 \Rightarrow$$

$$q_u = 257.82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 201.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 19.03 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \Rightarrow q_u = 478.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ ή } \text{kPa}$$

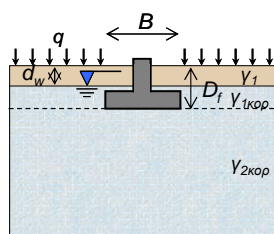
Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

Λόγω του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να τροποποιηθεί το γ του εδάφους:

(β) $d_w \leq D_f \rightarrow 1.0m \leq 2.0m$



- Τιμή φορτίου επιφόρτισης

$$p_o = \gamma_1 d_w + (\gamma_{1\text{κορ}} - \gamma_w)(D_f - d_w) + q = 18 \cdot 1 + (20 - 9.8)(2 - 1) + 0 = 28.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Ενεργός τιμή ειδικού βάρους (από D_f έως $D_f + B$)

$$\gamma'_2 = \gamma_{2\text{κορ}} - \gamma_w = 20 - 9.8 = 10.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Οπότε: $q_u = 1.3 \cdot (0.67 c) N'_c + p_o N'_q + 0.4 \gamma'_2 B N'_\gamma$

$$q_u = 1.3 \cdot 0.67 \cdot 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 14.80 + 28.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5.60 + 0.4 \cdot 10.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 1.5m \cdot 2.25 \Rightarrow$$

$$q_u = 257.82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 157.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 13.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \Rightarrow q_u = 429.51 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ ή } \text{kPa}$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Επιτρεπόμενη τιμή φέρουσας ικανότητας – Συντελεστής ασφαλείας:

- Οι τιμές που εκτιμώνται για τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζουν σημαντικές αβεβαιότητες και αποκλίσεις στο πεδίο
- Η εδαφική στρωματογραφία δεν είναι πλήρως προσδιορισμένη στην πλειονότητα των μελετών θεμελίωσης
- Παράλληλα, οι μέθοδοι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας εμπεριέχουν σε σημαντικό βαθμό απλοποιήσεις και παραδοχές
- Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες γίνεται κατανοητή η χρήση μεγάλων τιμών συντελεστή ασφαλείας κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας. Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις:
 - (α) Μέθοδος της επιτρεπόμενης τάσης: χρησιμοποιείται ενιαίος συντελεστής ασφαλείας
 - (β) Μέθοδος επιμέρους συντελεστών ασφαλείας (Eurocode 7), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα φορτία (δράσεις) και στις εδαφικές παραμέτρους

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

- Μέθοδος επιτρεπόμενης τάσης (ενιαίος συντελεστής ασφαλείας):

- Η τιμή της επιτρεπόμενης τάσης (επιτρεπόμενη τιμή φέρουσας ικανότητας) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_{\text{εν}} = \frac{q_u}{FS}$$

όπου:

FS ο ενιαίος συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety)

(σημειώνεται πως κατά τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης τάσης που θα πρέπει να είναι μικρότερη της επιτρεπόμενης, θα συμπεριλαμβάνεται και το ίδιο βάρος εδάφους+θεμελίου έως τη στάθμη έδρασης)

Τύπος έργου	Γεωτεχνικά στοιχεία	
	Πλήρη	Περιορισμένα
Συνήθη κτίρια κατασκευών και γραφείων	2.0	3.0
Οδικές γέφυρες, δημόσια κτίρια, ελαφρά βιομηχανικά κτίρια	2.5	3.5
Σιδηροδρομικές γέφυρες, βιομηχανικά κτίρια κ.τ.λ.	3.0	4.0

(Σχήμα: Γεωργιάδης Κ. και Μ. 2009, από Vesic 1975)

* Σε προσωρινά έργα οι τιμές μειώνονται στο 75%, αλλά πάντοτε $FS \geq 2$

** Σε πολύ ψηλές κατασκευές (π.χ. πύργοι, καμινάδες) οι τιμές αυξάνονται κατά 20-50%

Φέρουσα ικανότητα εδάφους

• Μέθοδος επιμέρους συντελεστών ασφαλείας (Eurocode 7):

- Λαμβάνονται υπόψη επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για φορτία, εδαφικές παραμέτρους και φέρουσα ικανότητα.
- Δεν γίνεται μεγαλύτερη αναφορά στη μέθοδο των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας του EC7 καθώς είναι εκτός των στόχων του συγκεκριμένου μαθήματος

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Εφαρμογή :

Τετράγωνο πέδιλο με μέγιστο φορτίο 150kN και κλίση φορτίου 20°, θα θεμελιωθεί σε βάθος 0.7m σε αμμώδες έδαφος με $c=0 \text{ kN/m}^2$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$. Να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος μεταξύ Terzaghi – Meyerhof για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του θεμελίου και να γίνει ο σχετικός υπολογισμός των διαστάσεων για ενιαίο συντελεστή ασφαλείας 3.

Επίλυση :

Θεωρούμε γενική μορφή αστοχίας. Καταλληλότερη θεωρείται η μέθοδος του Meyerhof καθώς μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό η κλίση του φορτίου. Επίσης χρησιμοποιείται η σχέση για στραγγισμένη φόρτιση (αμμώδες έδαφος).

Κατά Meyerhof : $q_u = s_c i_c d_c (c \cdot N_c) + s_q i_q d_q (p_o \cdot N_q) + s_v i_v d_v \left(\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B' \cdot N_\gamma \right)$ με $p_o = \gamma_1 \cdot D_f$

Για $\phi=30^\circ$ και γενική μορφή αστοχίας προκύπτει από τους πίνακες του Meyerhof:

ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ
30	30.140	18.401	15.668

Το σχήμα του θεμελίου κατά τη μέθοδο Meyerhof λαμβάνεται υπόψη από τις σχέσεις:

$$s_c = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 1 + 0.2 \frac{B'}{B'} \tan^2 \left(\frac{180}{4} + \frac{30}{2} \right) = 1 + 0.2 \tan^2 60^\circ = 1 + 0.2 \cdot 1.732^2 = 1.6$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

Το σχήμα του θεμελίου κατά τη μέθοδο Meyerhof λαμβάνεται υπόψη από τις σχέσεις:

$$s_q = s_v = 1 + 0.1 \frac{B'}{L'} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 1 + 0.1 \frac{B'}{B'} \tan^2 \left(\frac{180^\circ}{4} + \frac{30^\circ}{2} \right) = 1 + 0.1 \tan^2 60^\circ = 1 + 0.1 \cdot 1.732^2 = 1.3$$

Η κλίση του φορτίου κατά τη μέθοδο Meyerhof λαμβάνεται υπόψη από τις σχέσεις:

$$i_c = i_q = \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} \right)^2 = \left(1 - \frac{2 \cdot 20^\circ}{180^\circ} \right)^2 = 0.777^2 = 0.604 \quad i_v = \left(1 - \frac{\alpha}{\phi} \right)^2 = \left(1 - \frac{20^\circ}{30^\circ} \right)^2 = 0.333^2 = 0.111$$

Σημείωση: στην παραπάνω σχέση αρκεί οι γωνίες (α , ϕ , π) να δίνονται στις ίδιες μονάδες εφόσον οι μονάδες απλοποιούνται στις πράξεις (είτε σε μοίρες ή σε ακτίνια)

Το βάθος θεμελίωσης κατά τη μέθοδο Meyerhof λαμβάνεται υπόψη από τις σχέσεις:

$$d_c = 1 + 0.2 \frac{D}{B'} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 1 + 0.2 \frac{0.7}{B'} \tan \left(\frac{180^\circ}{4} + \frac{30^\circ}{2} \right) = 1 + 0.2 \frac{0.7}{B'} \cdot 1.732 = 1 + \frac{0.242}{B'}$$

$$d_q = d_v = 1 + 0.1 \frac{D}{B'} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 1 + 0.1 \frac{0.7}{B'} \tan \left(\frac{180^\circ}{4} + \frac{30^\circ}{2} \right) = 1 + 0.1 \frac{0.7}{B'} \cdot 1.732 = 1 + \frac{0.121}{B'}$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

Με αντικατάσταση στη σχέση του Meyerhof προκύπτει:

$$q_u = s_c i_c d_c (c \cdot N_c) + s_q i_q d_q (p_o \cdot N_q) + s_v i_v d_v \left(\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot B' \cdot N_\gamma \right)$$

$$q_u = s_c i_c d_c (0 \cdot N_c) + 1.3 \cdot 0.604 \cdot \left(1 + \frac{0.121}{B'} \right) (18 \cdot 0.7 \cdot 18.401) + 1.3 \cdot 0.111 \cdot \left(1 + \frac{0.121}{B'} \right) \left(\frac{1}{2} 18 \cdot B' \cdot 15.668 \right)$$

$$q_u = \left(182.051 + \frac{22.028}{B'} \right) + (20.348 B' + 2.462) \Rightarrow q_u = 184.513 + 20.348 B' + \frac{22.028}{B'}$$

Αναπτυσσόμενη τάση στο θεμέλιο λόγω του φορτίου των 150 kN είναι: $\sigma_{av} = \frac{150 \text{ kN}}{(B') \cdot (L')}$

Σημειώνεται πως στις παραπάνω σχέσεις και εφόσον δεν υπάρχει εκκεντρότητα (ούτε κατασκευαστική ούτε λόγω ροπής) το $B'=B$, $L'=L$. Ακόμη τετραγωνικό θεμέλιο $\rightarrow B=L$

Η αναπτυσσόμενη τάση θα πρέπει να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη με $FS=3$

$$\sigma_{av} \leq q_{en} = \frac{q_u}{3} \Rightarrow \frac{150}{B^2} \leq \frac{1}{3} \left(184.513 + 20.348 B' + \frac{22.028}{B'} \right) \Rightarrow \frac{150}{B^2} \leq 61.504 + 6.783 B + \frac{7.343}{B} \Rightarrow$$

$$150 \leq 61.504 B^2 + 6.783 B^3 + 7.343 B$$

Φέρουσα ικανότητα εδάφους



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

Με δοκιμές (ακρίβεια στα 10cm) προκύπτει :

Για $B=2.0\text{m}$ → $150 \leq 314.97$ Περιθώριο ασφαλείας, δοκιμάζουμε μικρότερο B

Για $B=1.3\text{m}$ → $150 \leq 128.39$ ΛΑΘΟΣ → απαιτείται μεγαλύτερο B

Για $B=1.5\text{m}$ → $150 \leq 172.29$ Περιθώριο ασφαλείας, δοκιμάζουμε μικρότερο B

Για $B=1.4\text{m}$ → $150 \leq 149.44$ ΛΑΘΟΣ → απαιτείται οριακά μεγαλύτερο B

Συνεπώς επιλέγεται $B=1.5\text{m}$

Θα μπορούσε θεωρητικά να βρεθεί η ακριβής λύση η οποία θα έδινε $B=1.41\text{m}$. Καθώς όμως κατά την κατασκευή ενός θεμελίου πρακτικά οι διαστάσεις μεταβάλλονται ανά 10cm (δεν κατασκευάζεται πέδιλο $1.41 \times 1.41\text{m}$), οδηγούμαστε στην αμέσως μεγαλύτερη διάσταση προς την πλευρά της ασφαλείας.