

ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

« ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ »

7ο ΕΞ. ΠΟΛ-ΜΗΧ. ΕΜΠ - Ακαδ. Έτος 2005 - 06

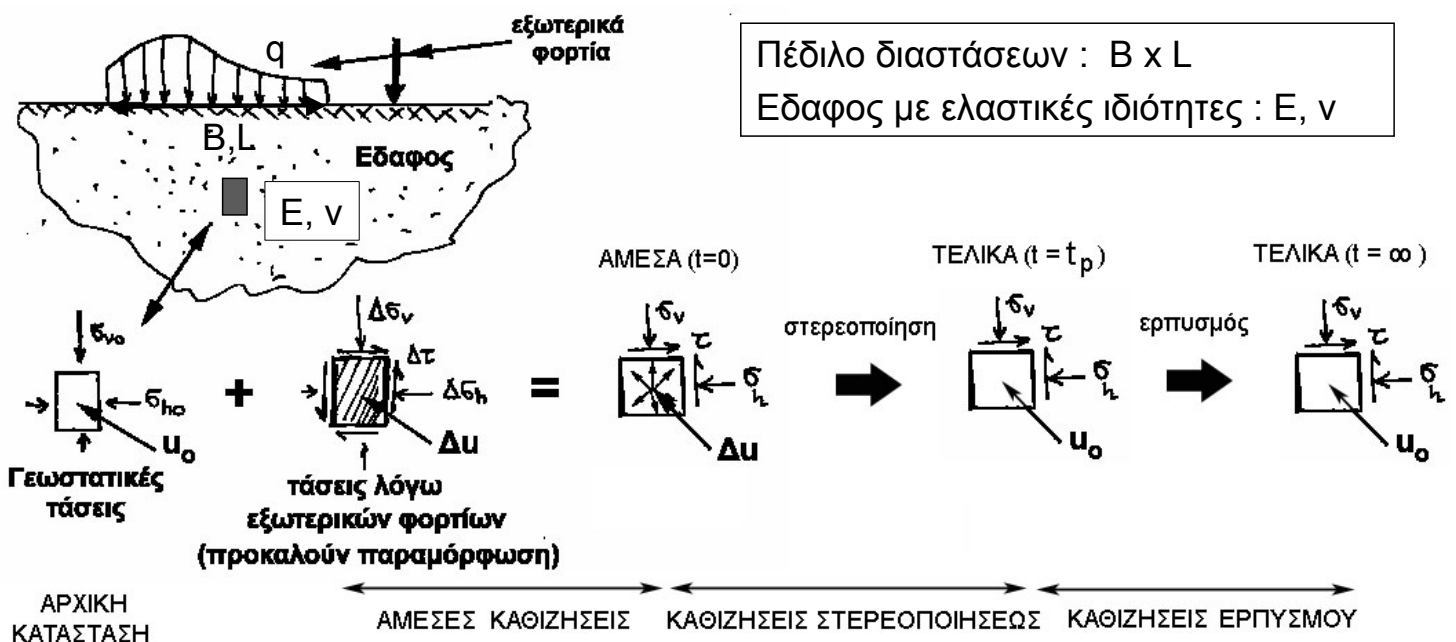
ΔΙΑΛΕΞΗ 4

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων
Ανάλυση με σχέσεις ελαστικής μορφής

11.9.2006

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

Οι καθιζήσεις (κατακόρυφες βυθίσεις) οφείλονται στις πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) και υπερπιέσεις πόρων (Δu) που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω της φόρτισής του από το πέδιλο



Οι καθιζήσεις διακρίνονται σε :

(1) άμεσες, (2) εκ στερεοποίησεως, (3) ερπυστικές (δευτερεύουσα στερεοποίηση)

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

Πρόσθετες κατακόρυφες τάσεις ($\Delta\sigma_v$) λόγω φόρτισης ελαστικού ημιχώρου (εδάφους) με πέδιλο πλάτους (B) που ασκεί πίεση (q)

Παράδειγμα :

Σε βάθος $z = 3B$, και απόσταση από τον άξονα $x = 2B$:

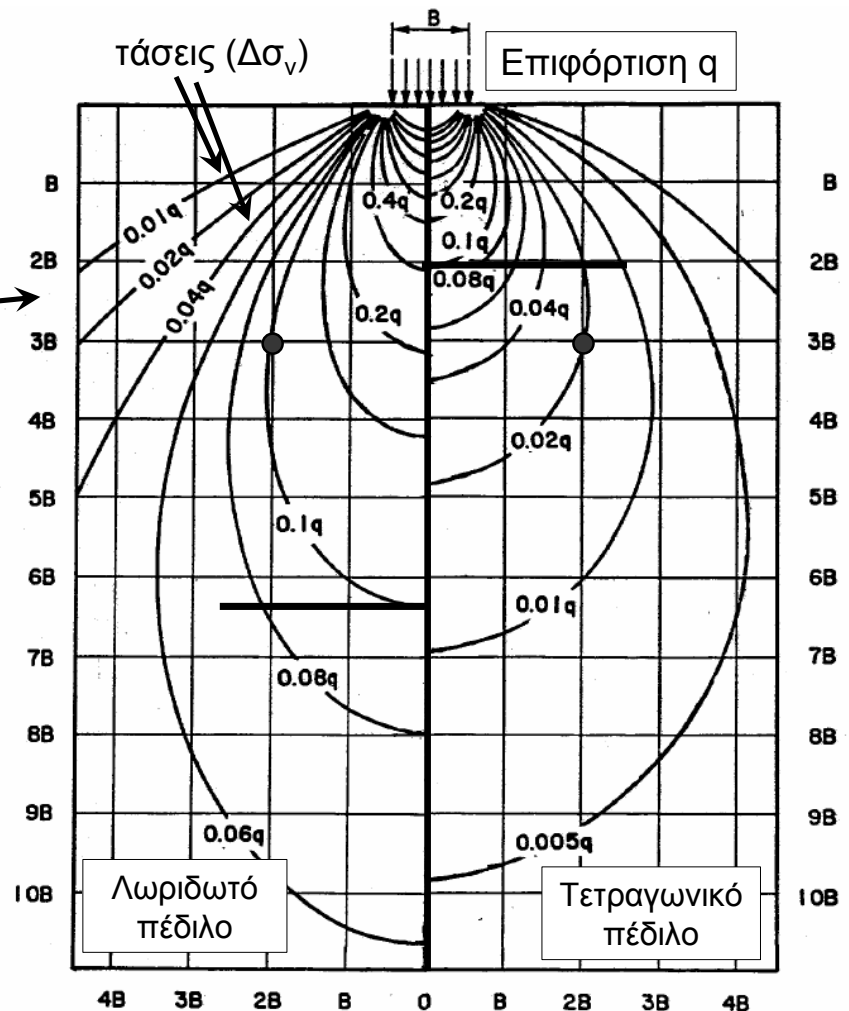
Λωριδωτό : $\Delta\sigma_v = 0.1 q$

Τετραγωνικό : $\Delta\sigma_v = 0.02 q$

Βάθος επιρροής της φόρτισης :

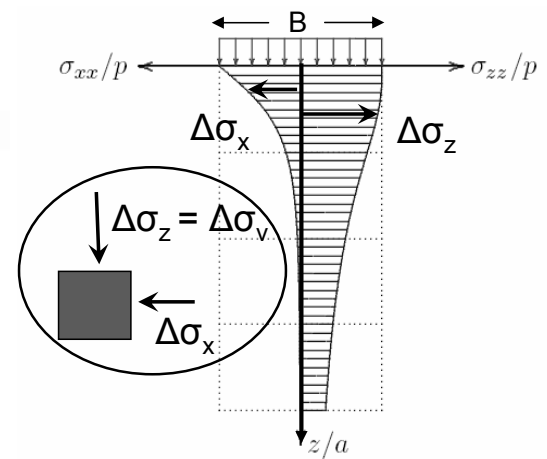
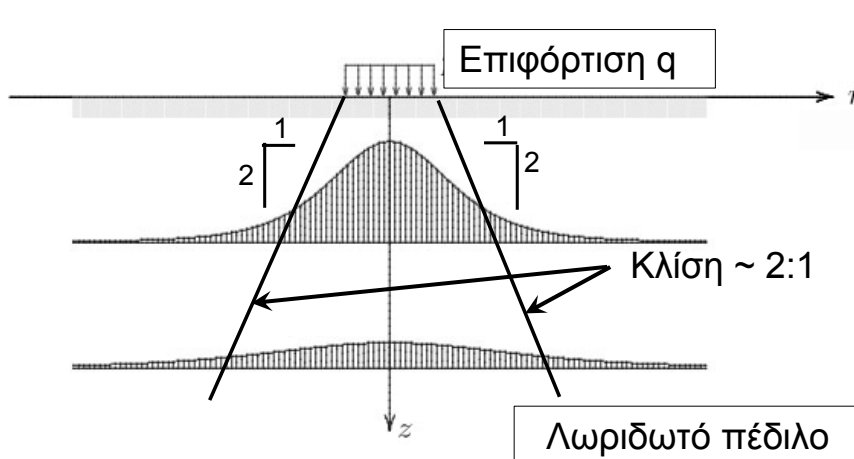
Λωρίδα : $z_{\max} \approx 6B$

Τετράγωνο : $z_{\max} \approx 2B$



Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

Οι καθιζήσεις (κατακόρυφες βυθίσεις) οφείλονται στις πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω της φόρτισής του από το πέδιλο



Πρόσθετες κατακόρυφες τάσεις ($\Delta\sigma_v = \Delta\sigma_z$) λόγω φόρτισης ελαστικού ημιχώρου (εδάφους) με πέδιλο πλάτους (B) που ασκεί πίεση (q)

Πρόσθετες κατακόρυφες ($\Delta\sigma_z$) και οριζόντιες ($\Delta\sigma_x$) τάσεις λόγω φόρτισης ελαστικού ημιχώρου (εδάφους) με λωριδωτό πέδιλο πλάτους (B) που ασκεί πίεση (p)

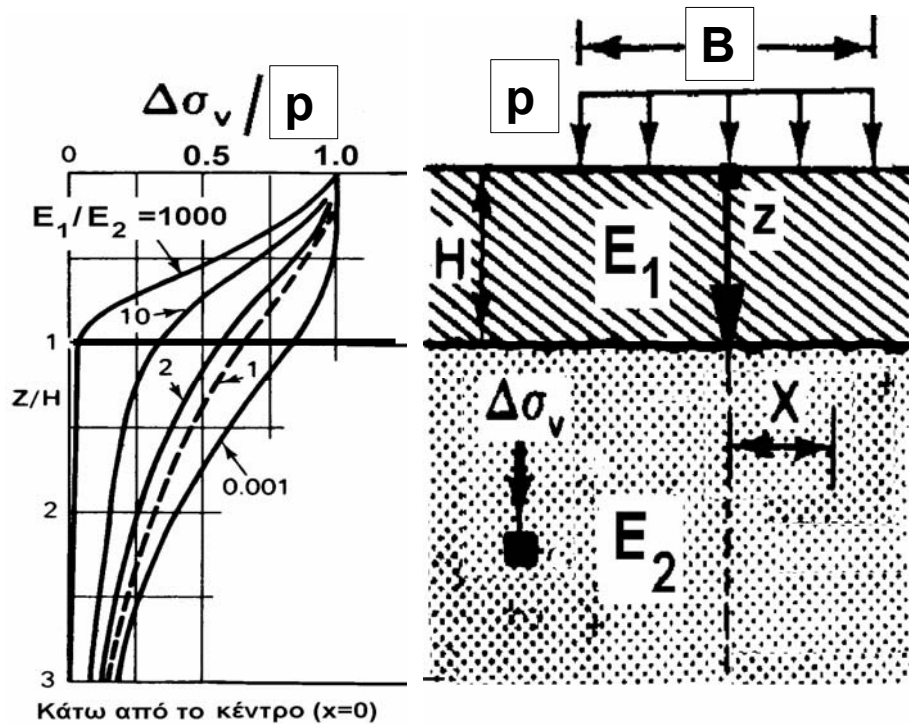
Κατά το DIN 4019, οι καθιζήσεις επιφανειακών θεμελιώσεων υπολογίζονται για εδαφική ζώνη μέχρι βάθους (z) όπου η πρόσθετη τάση : $\Delta\sigma_v = 0.20 \sigma'_{vo}$.
 σ'_{vo} = αρχική (γεωστατική) ενεργός κατακόρυφη τάση στο βάθος (z)

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίλων)

Επιρροή της παρουσίας σκληρής επιφανειακής στρώσης στη μείωση των τάσεων εντός της υποκείμενης μαλακής (συμπιεστής) στρώσης, και συνεπώς στη μείωση του μεγέθους των καθιζήσεων του πεδίου

Τιμές της κατακόρυφης τάσης ($\Delta\sigma_v$) διαιρεμένης με την πίεση του πεδίου (p) για διάφορα βάθη (z) κάτω από το κέντρο λωριδωτού πεδίου εύρους (B). Η ανώτερη εδαφική στρώση (πάχους H) έχει μέτρο ελαστικότητας E_1 και η κατώτερη (μεγάλου πάχους) έχει μέτρο $E_2 < E_1$.

Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές του λόγου :
 E_1 / E_2



Συμπέρασμα : Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της ανώτερης στρώσης προκαλεί σημαντική μείωση των πιέσεων στην κατώτερη στρώση $\Rightarrow$ μείωση των καθιζήσεων

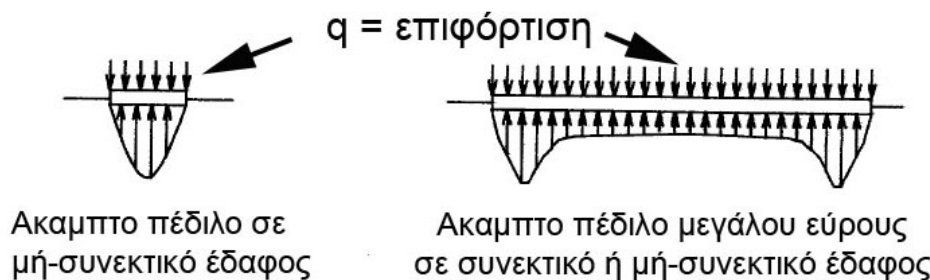
Επιρροή της παρουσίας μίας σκληρής επιφανειακής στρώσης στην απομείωση των τάσεων στην υποκείμενη μαλακή στρώση



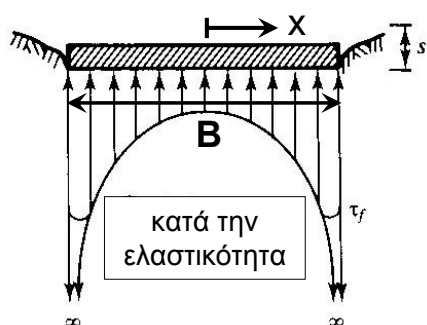
Μείωση της βύθισης των τροχών λόγω της απομείωσης των τάσεων στην άμμο κάτω από τις μεταλλικές πλάκες

Κατανομή τάσεων και καθιζήσεων στη βάση πεδίων

1. Ακαμπτα πέδιλα



Κατανομή τάσεων στη βάση άκαμπτου πεδίου που φορτίζεται με ομοιόμορφη πίεση.
Οι καθιζήσεις είναι προφανώς ομοιόμορφες (άκαμπτο πέδιλο)



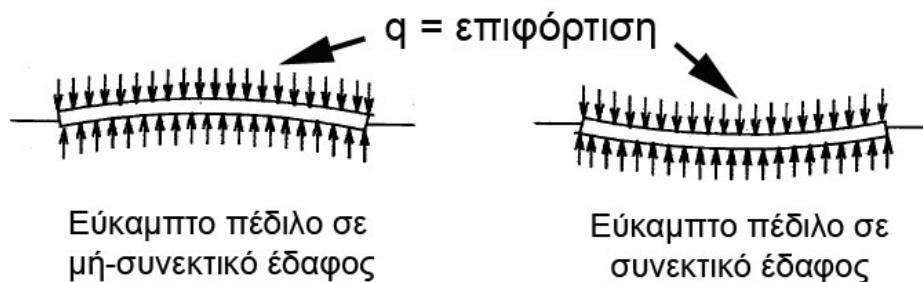
Πρόβλεψη της θεωρίας ελαστικότητας για την κατανομή των τάσεων στη βάση ακάμπτου λωριδωτού πεδίου εύρους (B) με ομοιόμορφη επιφόρτιση $q = P / B$:

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

Συμπέρασμα : Οι προβλέψεις της θεωρίας ελαστικότητας έχουν περιορισμένη αξιοπιστία στα μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη (κυρίως)

Κατανομή τάσεων και καθιζήσεων στη βάση θεμελιώσεων

2. Εύκαμπτες θεμελιώσεις (π.χ. δεξαμενές)



Κατανομή καθιζήσεων στη βάση εύκαμπτης θεμελίωσης που φορτίζεται με ομοιόμορφη πίεση (q). Οι τάσεις είναι προφανώς ομοιόμορφα κατανεμημένες.



Πρόβλεψη της θεωρίας ελαστικότητας για την κατανομή των καθιζήσεων στη βάση εύκαμπτης θεμελίωσης (μεγαλύτερες καθιζήσεις στο κέντρο)

Συμπέρασμα : Οι προβλέψεις της θεωρίας ελαστικότητας έχουν περιορισμένη αξιοπιστία στα μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη (κυρίως)

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

q = επιφόρτιση



Ζητούμενα :

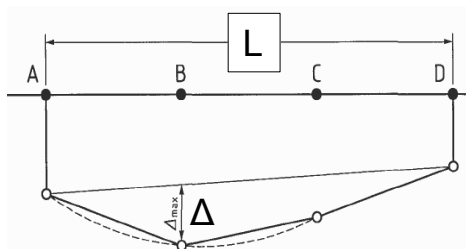
1. Εκτίμηση του μεγέθους και της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων
2. Εκτίμηση των μέγιστων αποδεκτών καθιζήσεων (αναλόγως των λειτουργικών και στατικών απαιτήσεων της ανωδομής)
3. Απόφαση για τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν στην περίπτωση όπου οι αναμενόμενες καθιζήσεις υπερβαίνουν τις μέγιστες αποδεκτές :

Παραδείγματα πιθανών μέτρων :

- Διεύρυνση των πεδίων, θεμελίωση με πεδιλοδοκούς / κοιτόστρωση
- Θεμελίωση με πασσάλους
- Βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης (π.χ. προφόρτιση, δυναμική συμπύκνωση, δονητική συμπύκνωση, χαλικοπάσσαλοι, κλπ)
- Μείωση των φορτίων της ανωδομής

Ορια αποδεκτών καθιζήσεων κατασκευών

1. Συνολική (ομοιόμορφη) καθίζηση :
Συνήθως, το όριο τίθεται από τις λειτουργικές απαιτήσεις (π.χ. συνδέσεις με δίκτυα, πρόσβαση από το δρόμο)
2. Διαφορική καθίζηση (Δ) μεταξύ θέσεων σε απόσταση (L):
Συνήθως επιβάλλεται από τις στατικές απαιτήσεις του φορέα (π.χ. ένταση λόγω διαφορικής καθίζησης βάθρων γέφυρας, ρωγμές σε επιχρίσματα κτιρίου)



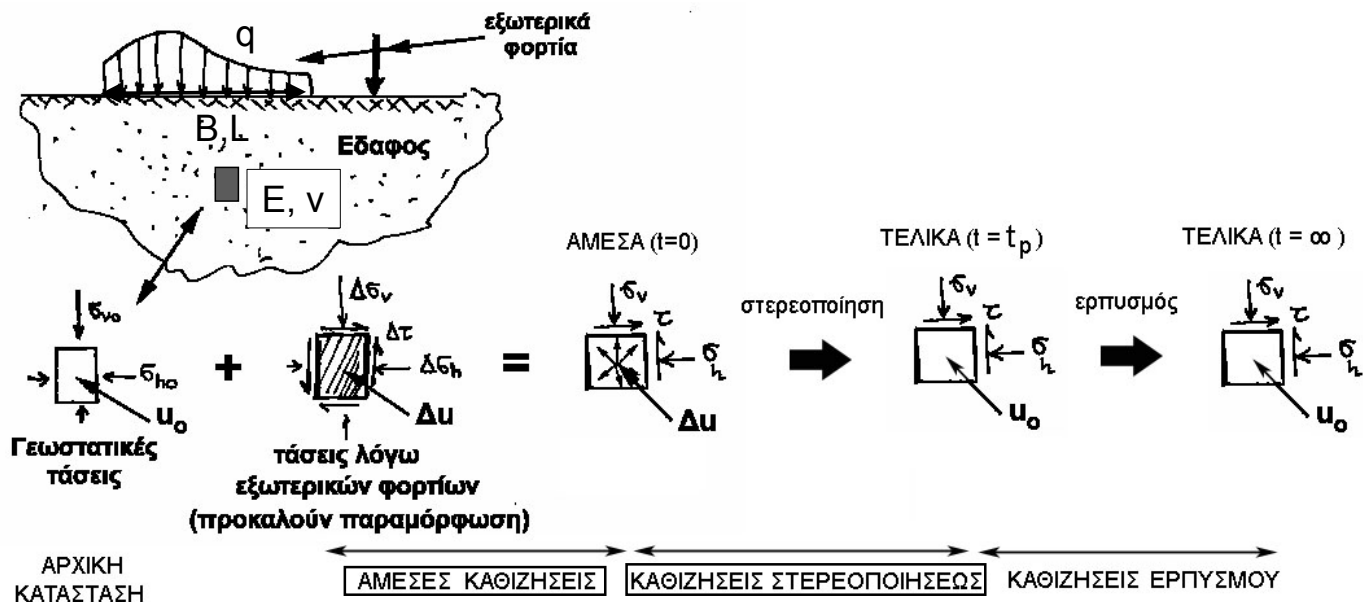
Συνήθεις μέγιστες αποδεκτές τιμές του λόγου Δ / L (σχετική στρόφη) :

Είδος κατασκευής	Μέγιστες αποδεκτές τιμές του λόγου Δ / L	
	Σε άμμο ή σκληρή άργιλο	Σε μαλακή ή συνεκτική άργιλο
Λιθοδομές και φέρουσες τοιχοποιίες : Μήκος / Ύψος ≤ 3 Μήκος / Ύψος ≥ 5	1 / 3333 1 / 2000	1 / 2500 1 / 1500
Μονόροφα κτίρια από τοιχοποιία	1 / 1000	1 / 1000
Ανω όριο συνήθων κατασκευών με σκελετό από σκυρόδεμα ή χάλυβα :	1 / 500	1 / 500
Εναρξη ρηγματώσεων σε καλές κατασκευές :	1 / 300	1 / 300
Εναρξη βλαβών στον φέροντα στοιχείο :	1 / 150	1 / 150

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίλων)

Είδη καθιζήσεων και αίτια που τις προκαλούν :

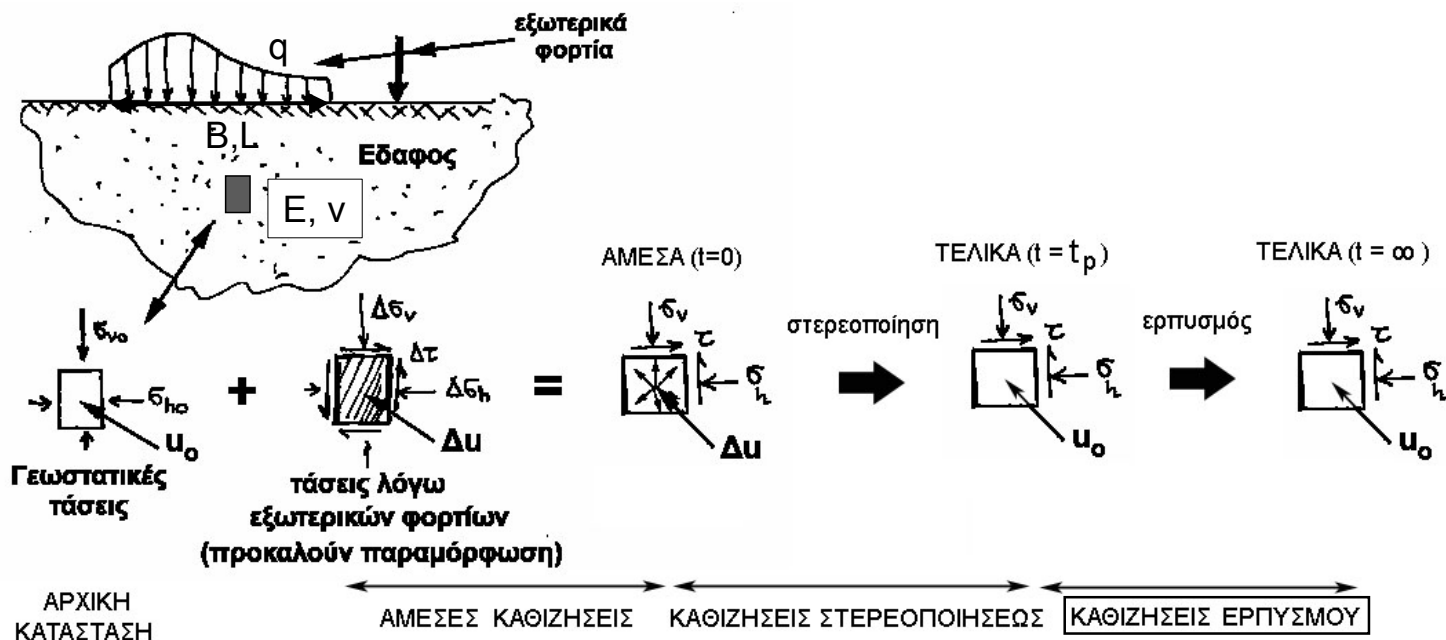
1. Άμεσες καθιζήσεις : καθιζήσεις σε ξηρά ή μερικώς κορεσμένα εδάφη, καθιζήσεις σε ταχέως στραγγιζόμενα κορεσμένα εδάφη (π.χ. άμμους), άμεσες καθιζήσεις λόγω διατμητικής (ισο-όγκης) παραμόρφωσης σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (βύθιση του πεδίου και «φούσκωμα» γύρω από το πέδιλο).
2. Καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης : Χρονικά εξελισσόμενες καθιζήσεις λόγω εκτόνωσης των υπερπιέσεων πόρων που αναπτύσσονται κατά την «ταχεία» φόρτιση κορεσμένων εδαφών (κυρίως αργιλικών).



Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίλων)

Είδη καθιζήσεων και αίτια που τις προκαλούν :

3. Ερπυστικές (δευτερεύουσες) καθιζήσεις : Χρονικά εξελισσόμενες καθιζήσεις λόγω ερπυστικής συμπεριφοράς των εδαφών (υπό πρακτικώς σταθερές ενεργές τάσεις) μετά το πέρας της στερεοποίησης. Συνήθως είναι σημαντικές σε οργανικά εδάφη και μαλακές αργίλους υψηλής πλαστικότητας. Σε αμώδη εδάφη και αργίλους χαμηλής πλαστικότητας συνήθως αμελούνται.



Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίλων)

Είδη καθιζήσεων και αίτια που τις προκαλούν :

Λοιπά αίτια καθιζήσεων :

1. Καθίζηση λόγω «συνίζησης» σε :

- Χαλαρά μή-συνεκτικά εδάφη υπό ταχέως επαναλαμβανόμενες φορτίσεις (δονήσεις, σεισμοί, κλπ).
- Γαιώδη ή ημι-βραχώδη υλικά επίχωσης λόγω πλημμελούς συμπύκνωσης.
- Λιθορριπές από ασθενείς βράχους (π.χ. ιλυολίθους, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, κλπ) λόγω θραύσης των σημείων επαφής των κόκκων.

Συνίζηση : Μείωση του όγκου υπό πρακτικώς σταθερές ορθές ενεργές τάσεις.

2. Ανύψωση (αρνητική καθίζηση) σε διογκούμενα εδάφη, λόγω αύξησης της υγρασίας ή καθίζηση λόγω μείωσης της υγρασίας.

Διογκούμενα εδάφη : Εδάφη με ισχυρή τάση για διόγκωση με απορρόφηση υγρασίας (κυρίως άργιλοι υψηλής πλαστικότητας).

3. Καθίζηση λόγω κατάρρευσης της δομής ευαίσθητων εδαφών (π.χ. λόγω καταστροφής των συγκολλητικών δεσμών κατά την ύγρανση).

Παράδειγμα : Χαλαρές, ασθενώς συγκολλημένες άμμοι (loess)

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίλων)

Υπολογισμός μεγέθους καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων

$$\text{Συνολική καθίζηση : } \rho = \rho_i + \rho_c + \rho_s$$

ρ_i = άμεση καθίζηση

ρ_c = καθίζηση εκ στερεοποίησης

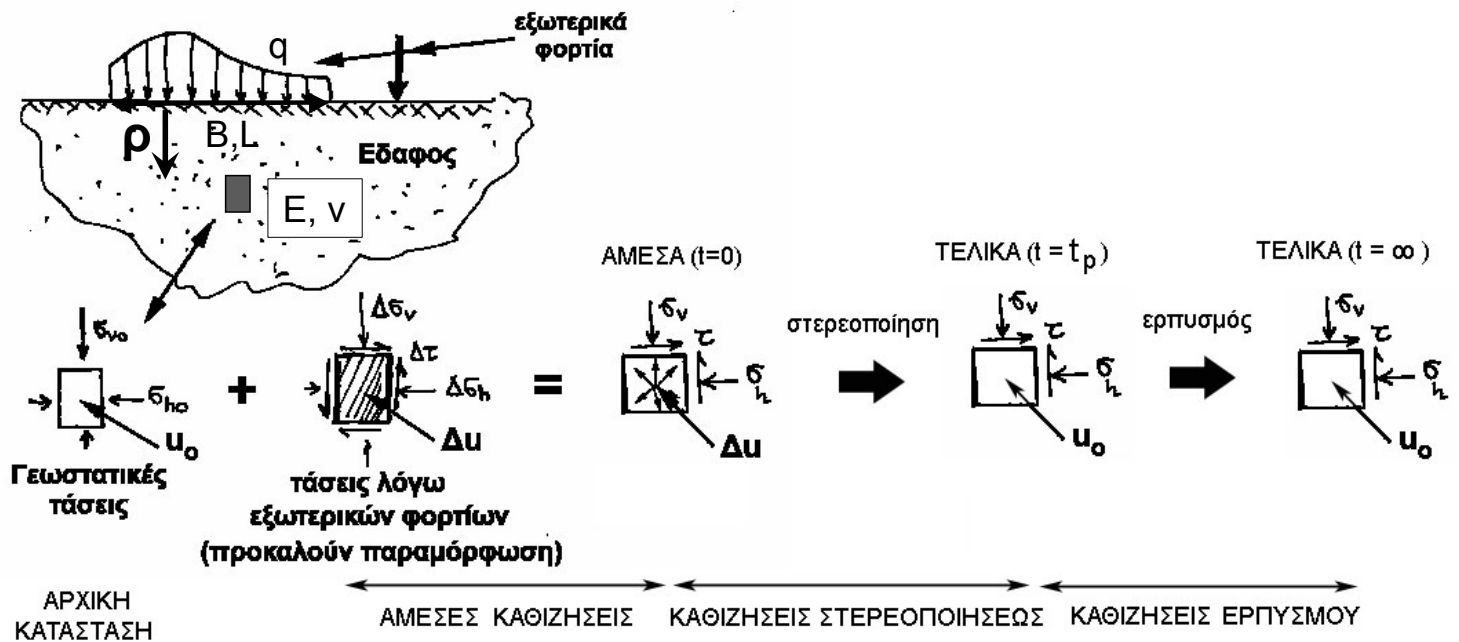
ρ_s = ερπυστική (δευτερεύουσα) καθίζηση

Παρατήρηση : Κατά περίπτωση, κάποιες από τις ανωτέρω συνιστώσες μπορεί να είναι μηδέν (π.χ. άμμοι και μερικώς κορεσμένες άργιλοι : $\rho_c = \rho_s = 0 \Rightarrow \rho = \rho_i$)

Σε κορεσμένες αργίλους, με την επιβολή της φόρτισης προκαλείται (ταχέως) η άμεση καθίζηση του εδάφους (υπό σταθερό όγκο), στη συνέχεια λόγω της βαθμιαίας αποτόνωσης των υπερπιέσεων πόρων εξελίσσονται οι καθιζήσεις εκ στερεοποίησης και, μετά την αποτόνωση των υπερπιέσεων πόρων, συμβαίνουν οι ερπυστικές καθιζήσεις.

Υπολογισμός καθιζήσεων πεδίων (ρ) με σχέσεις «ελαστικής μορφής»

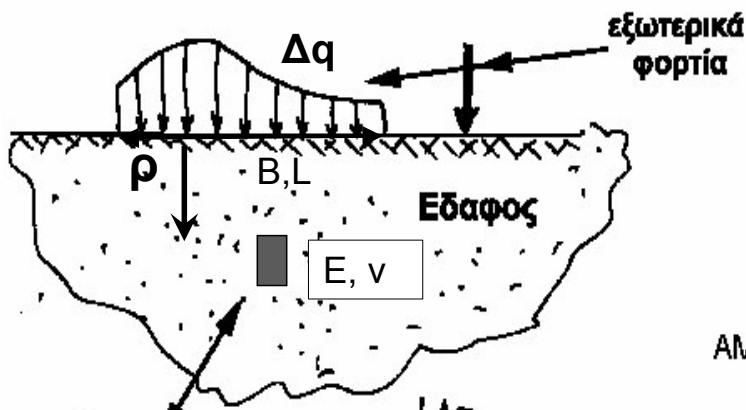
$$\rho = f(E, \nu, q, B, L)$$



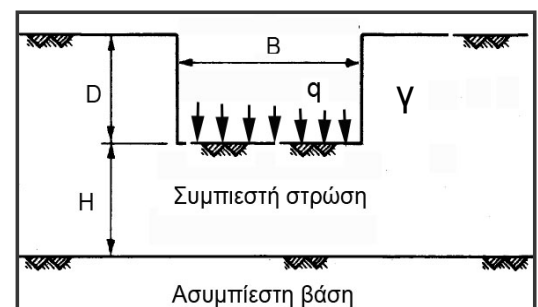
Οι καθιζήσεις οφείλονται στις πρόσθετες τάσεις $\Delta\sigma$ και στην υπερπίεση πόρων Δu που προκαλείται από την $\Delta\sigma$ (σε κορεσμένα εδάφη μικρής διαπερατότητας), και εξαρτώνται από:

- τα χαρακτηριστικά του εδάφους (π.χ. E, ν),
- τα χαρακτηριστικά της φόρτισης (π.χ. q) και
- τα χαρακτηριστικά του πεδίου (π.χ. B, L)

Υπολογισμός καθιζήσεων πεδίων (ρ) με σχέσεις «ελαστικής μορφής»



$$\rho = f(E, \nu, \Delta q, B, L)$$



Η επιφόρτιση (Δq) που προκαλεί καθιζήσεις στα εδάφη είναι η πρόσθετη τιμή της φόρτισης, πέραν της αρχικώς επιβεβλημένης (q_0) στη στάθμη θεμελίωσης, δηλαδή :

$$\Delta q = q - q_0$$

αφού οι καθιζήσεις του εδάφους λόγω της (q_0) έχουν ήδη συντελεσθεί (πριν την επιβολή του Δq)

Παράδειγμα : Στην περίπτωση θεμελίωσης του πεδίου σε βάθος (D) από το φυσικό έδαφος, ή μετά από προφόρτιση ύψους (D) :

$$q_0 = \gamma D$$

Προσοχή : Εάν η θεμελίωση (που επιβάλλει πίεση q) γίνει στην επιφάνεια του εδάφους, και στη συνέχεια η περιοχή γύρω από το πέδιλο επιχωθεί σε ύψος (D), τότε $\Delta q = q$ και επιπλέον, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι καθιζήσεις λόγω της επίχωσης (πίεση γD).

Υπολογισμός καθιζήσεων πεδίων (ρ) με σχέσεις «ελαστικής μορφής»

$$\rho = f(E, \nu, \Delta q, B, L)$$

$$\text{Συνολική καθίζηση : } \rho = \rho_i + \rho_c + \rho_s$$

ρ_i = άμεση καθίζηση

ρ_c = καθίζηση εκ στερεοποίησης

ρ_s = ερπυστική (δευτερεύουσα) καθίζηση

Με την παραδοχή γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς για το έδαφος, μπορούν να υπολογισθούν με σχέσεις ελαστικής μορφής οι ακόλουθες καθιζήσεις πεδίων :

- (1) Άμεσες καθιζήσεις (ρ_i), σε κορεσμένες αργίλους (αστράγγιστες συνθήκες) με ελαστικές παραμέτρους $E = E_u$ και $\nu = 0.50$ (αστράγγιστες τιμές).
- (2) Συνολικές καθιζήσεις (ρ) σε όλα τα εδάφη (στραγγισμένες συνθήκες) με ελαστικές παραμέτρους $E = E'$ και $\nu = \nu'$ (στραγγισμένες τιμές).

Παρατήρηση : Σε άμμους και ξηρές ή μερικώς κορεσμένες αργίλους οι συνολικές καθιζήσεις είναι πρακτικώς ίσες με τις άμεσες

Προσοχή : Η παραδοχή γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς, συνήθως δεν είναι ικανοποιητική :

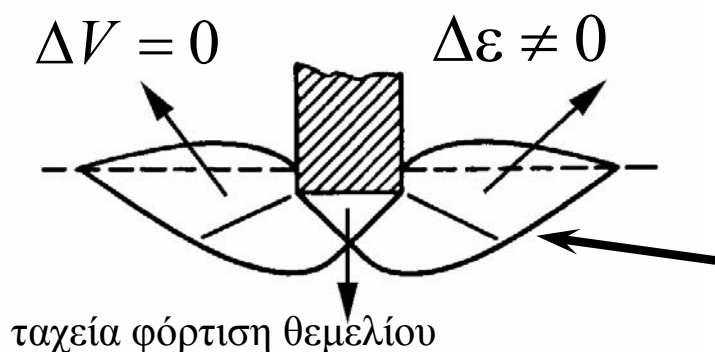
- σε αμμώδη εδάφη (επειδή το E εξαρτάται από τη συμπίεση)
- σε αργιλικά εδάφη κοντά στην αστοχία (λόγω μή-γραμμικότητας)

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων (πεδίων)

Άμεσες καθιζήσεις (ρ_i) :

- Καθιζήσεις σε ξηρά και μερικώς κορεσμένα εδάφη (αμμώδη και αργιλικά) : $\rho = \rho_i$
- Καθιζήσεις σε ταχέως στραγγιζόμενα κορεσμένα εδάφη (π.χ. άμμους) : $\rho = \rho_i$
- Άμεσες καθιζήσεις ($\rho_i < \rho$) σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη λόγω διατμητικής (ισοόγκης) παραμόρφωσης (βύθιση του πεδίου και «φούσκωμα» γύρω από αυτό).

Στην περίπτωση ταχείας φόρτισης κορεσμένων αργίλων, αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων (Δu) οι οποίες με την πάροδο του χρόνου εκτονώνονται, προκαλώντας καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης (και στη συνέχεια κάποιες ερπυστικές καθιζήσεις)



Αστράγγιστη φόρτιση σημαίνει μηδενική μεταβολή του όγκου, ΟΧΙ πάντοτε μηδενική παραμόρφωση. Στο παραπλεύρως σχήμα συμβαίνουν διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους (υπό σταθερό όγκο) που δίνουν «άμεσες καθιζήσεις»

Υπολογισμός μεγέθους καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων

Υπολογισμός άμεσων καθιζήσεων (ρ_i) :

- Με σχέσεις «ελαστικής μορφής» - κυρίως σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη για φόρτιση αρκετά μικρότερη από την φέρουσα ικανότητα (P_u)
- Με εμπειρικές σχέσεις - κυρίως σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη

Ο υπολογισμός των άμεσων καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» βασίζεται στην θεωρία ελαστικότητας, με κατάλληλη εκτίμηση των «ελαστικών» σταθερών του εδάφους θεμελίωσης (E, ν).

Μέθοδοι για την εκτίμηση των παραμέτρων (E, ν) δίνονται στο επόμενο εδάφιο.

Υπολογισμός (άμεσων) καθιζήσεων σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη και σε ξηρά ή μερικώς κορεσμένα συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη :

Στα μή-συνεκτικά εδάφη, το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλεται (αυξάνει) με την αύξηση της συμπίεσης (π.χ. την αύξηση των γεωστατικών τάσεων με το βάθος, την συμπίεση κάτω από το πέλδιλο λόγω της επιφόρτισης, κλπ). Συνεπώς, οι σχέσεις ελαστικότητας έχουν περιορισμένη εφαρμογή (επειδή θεωρούν E =σταθερό). Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί άλλες (εμπειρικές) σχέσεις για την εκτίμηση των άμεσων καθιζήσεων σε άμμους.

Όταν εφαρμόζονται οι σχέσεις «ελαστικής μορφής» σε μή-συνεκτικά εδάφη (άμμους) και σε ξηρά ή μερικώς κορεσμένα συνεκτικά εδάφη (αργίλους) : E, ν είναι οι «ελαστικές» σταθερές που αφορούν στραγγισμένες συνθήκες ($E = E'$ και $\nu = \nu'$).

Υπολογισμός άμεσων καθιζήσεων (ρ_i) :

Άμεσες καθιζήσεις σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη :

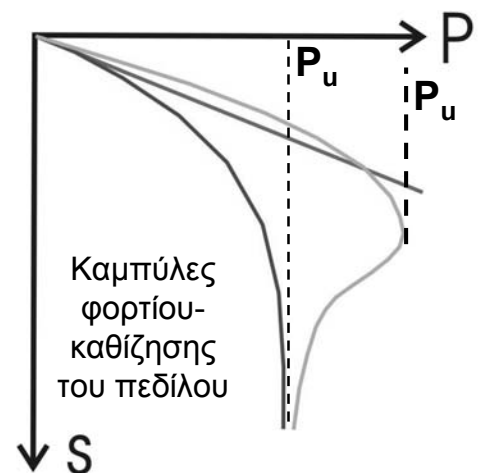
- Εάν η φόρτιση απέχει αρκετά από την κατάσταση αστοχίας (P_u), οι άμεσες καθιζήσεις πεδίων σε συνεκτικά εδάφη είναι περίπου γραμμικώς ελαστικές.
- Εάν η φόρτιση πλησιάζει την κατάσταση αστοχίας (P_u), οι άμεσες καθιζήσεις γίνονται έντονα μή γραμμικές.
- Συνήθως, οι άμεσες καθιζήσεις σε κορεσμένα συνεκτικά εδάφη υπολογίζονται με χρήση σχέσεων «ελαστικής μορφής», με «ελαστικές» σταθερές (E, ν) που αφορούν αστράγγιστες συνθήκες (ισό-ογκη παραμόρφωση) :

$$E = E_u \text{ (αστράγγιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας) και } \nu = \nu_u = 0.5.$$

Συσχέτιση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας E (υπό στραγγισμένες συνθήκες) και του μέτρου ελαστικότητας E_u υπό αστράγγιστες συνθήκες :

$$E_u = \frac{3}{2(1+\nu)} E$$

$$\text{Για την συνήθη τιμή : } \nu = 1/3 \Rightarrow E_u = 1.125 E$$



ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΜΕΣΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ (ρ_i)

1. Αμμώδη εδάφη :

- Η συνολική καθίζηση είναι πρακτικώς άμεση ($\rho_c = \rho_s = 0$)
- Επειδή το μέτρο ελαστικότητας (E) δεν είναι σταθερό (εξαρτάται από τη συμπίεση), δεν ενδείκνυται η εκτίμηση της καθίζησης με σχέσεις «ελαστικής μορφής». Προτιμώνται εμπειρικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για αμμώδη εδάφη.
- Εάν εφαρμοσθούν σχέσεις «ελαστικής μορφής», θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή κατάλληλης τιμής των ελαστικών παραμέτρων « E » και « ν » (βεβαίως «στραγγισμένες» τιμές : $E = E'$, $\nu = \nu'$).

2. Ξηρά ή μερικώς κορεσμένα αργιλικά εδάφη :

- Η συνολική καθίζηση είναι πρακτικώς άμεση ($\rho_c = \rho_s = 0$)
- Εάν η φόρτιση απέχει αρκετά από την κατάσταση αστοχίας, η καθίζηση είναι κατά προσέγγιση γραμμική και μπορεί να εκτιμηθεί με σχέσεις ελαστικής μορφής με χρήση «στραγγισμένων» τιμών ($E = E'$, $\nu = \nu'$).
- Κοντά στην κατάσταση αστοχίας, η καθίζηση γίνεται μή-γραμμική και δεν συνιστάται η εκτίμησή της με σχέσεις ελαστικής μορφής. Απαιτείται χρήση κατάλληλων εμπειρικών μεθόδων ή μή-γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΜΕΣΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ (ρ_i)

3. Κορεσμένα αργιλικά εδάφη :

- Η άμεση καθίζηση (ρ_i) αποτελεί μέρος μόνον της συνολικής καθίζησης. Με την πάροδο του χρόνου προστίθεται καθίζηση στερεοποιήσεως και ερπυστική καθίζηση
- Εάν η φόρτιση απέχει αρκετά από την κατάσταση αστοχίας, η άμεση καθίζηση (ρ_i) είναι κατά προσέγγιση γραμμική και μπορεί να εκτιμηθεί με σχέσεις ελαστικής μορφής με χρήση των «αστράγγιστων» τιμών των ελαστικών παραμέτρων ($E = E_u$, $\nu = 0.5$).
- Εάν η φόρτιση απέχει αρκετά από την κατάσταση αστοχίας, οι σχέσεις ελαστικής μορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εκτίμηση της συνολικής καθίζησης (ρ) με χρήση των «στραγγισμένων» τιμών των ελαστικών παραμέτρων ($E = E'$, $\nu = \nu'$).
- Κοντά στην κατάσταση αστοχίας, η άμεση καθίζηση (αλλά και η συνολική καθίζηση) είναι μή γραμμικές και δεν συνιστάται η εκτίμησή τους με σχέσεις ελαστικής μορφής. Απαιτείται χρήση κατάλληλων εμπειρικών μεθόδων ή μή-γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία)

Συσχέτιση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας E (υπό στραγγισμένες συνθήκες) και του μέτρου ελαστικότητας E_u υπό αστράγγιστες συνθήκες :

$$E_u = \frac{3}{2(1 + \nu)} E$$

Για την συνήθη τιμή : $\nu = 1/3 \Rightarrow$
 $E_u = 1.13 E$

Εκτίμηση των «ελαστικών» σταθερών του εδάφους (E , ν)

Μέτρο ελαστικότητας αργίλων υπό αστράγγιστες συνθήκες (E_u) :

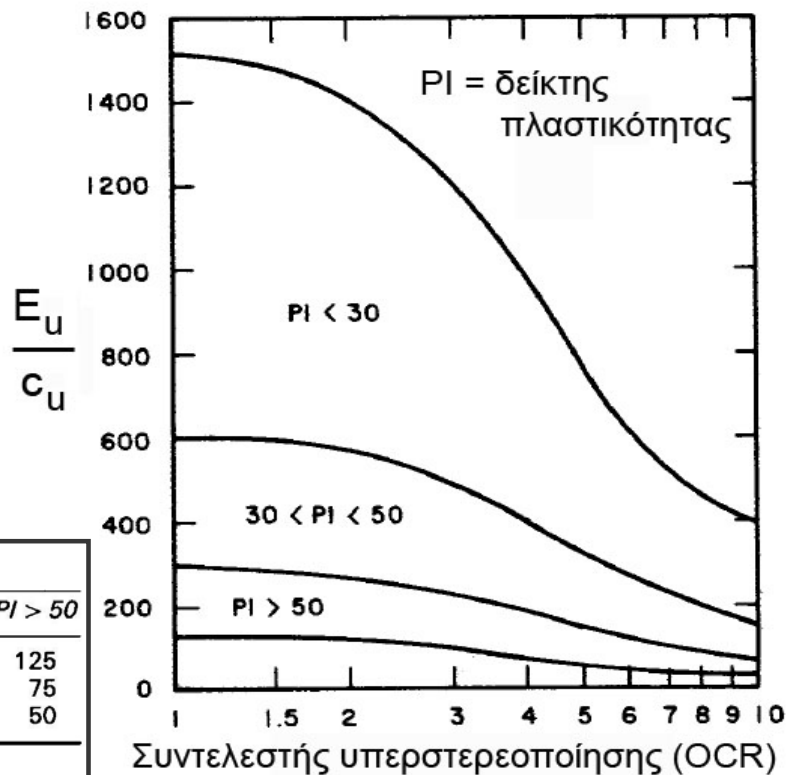
Τιμές του λόγου E_u / c_u :

E_u = «μέση» τιμή του μέτρου ελαστικότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες

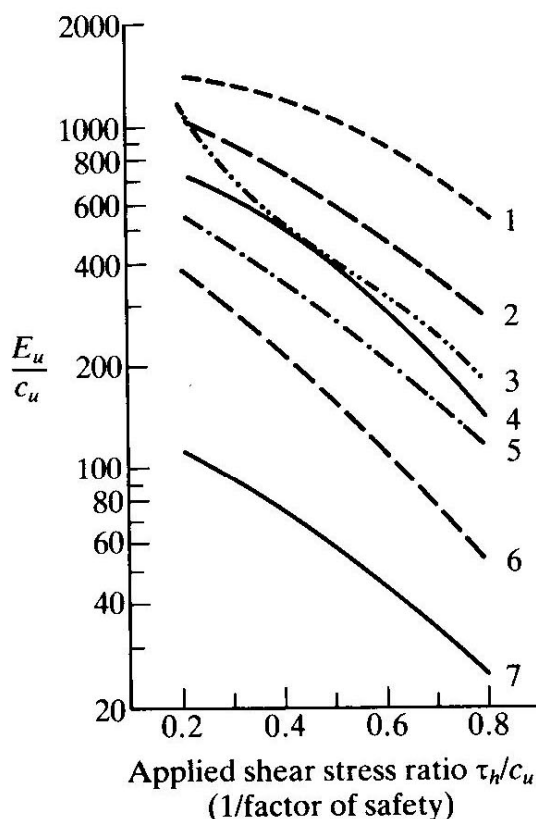
c_u = αστράγγιστη διατμητική αντοχή (= $\frac{1}{2}$ της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη)

PI = Plasticity Index OCR = Over-consolidation Ratio			
OCR	PI < 30	30 < PI < 50	PI > 50
< 3	600	300	125
3-5	400	200	75
> 5	150	75	50

^a After Duncan and Buchignani (1976) and U.S. Navy (1982).



Τιμές του λόγου E_u / c_u σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, για διάφορες τιμές της διατμητικής τάσης (τ_h) - Αποτελέσματα από δοκιμές απλής διάτμησης



No.	Description	c_u / σ'_{vc}
1 ⁽¹⁾	Portsmouth sensitive CL clay $S_f \geq 10$, LL = 35, $I_p = 15$	0.20
2 ⁽¹⁾	Boston CL clay LL = 41, $I_p = 22$	0.20
3 ⁽¹⁾	Bangkok CH clay LL = 65, $I_p = 41$	0.27
4 ⁽¹⁾	Maine organic CH - OH clay LL = 65, $I_p = 38$	0.285
5 ⁽²⁾	AGS CH clay LL = 71, $I_p = 40$	0.255
6 ⁽¹⁾	Atchafalaya CH clay LL = 95, $I_p = 75$	0.24
7 ⁽³⁾	Taylor River peat $w_n = 500\%$	0.46

(1) From Ladd and Edgers (1972)

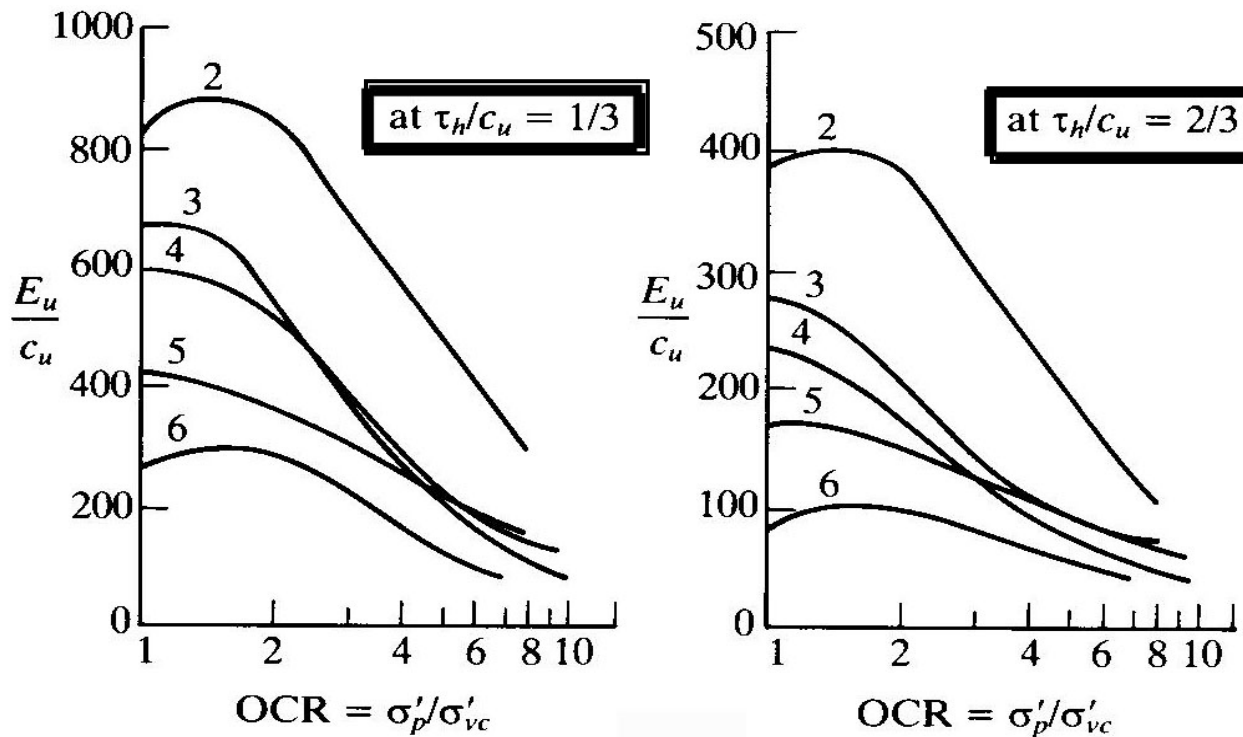
(2) MIT for Dames and Moore

(3) MIT for Haley and Aldrich

$$E_u = 3\tau_h / \gamma \quad \tau_h = \text{applied horizontal shear stress}$$

$$c_u = (\tau_h)_{\max} \quad \gamma = \text{shear strain}$$

Τιμές του λόγου E_u / c_u σε υπερ-στερεοποιημένες αργίλους ($OCR =$ λόγος υπερ-στερεοποίησης), για διάφορες τιμές της διατμητικής τάσης (τ_h) - Αποτελέσματα από δοκιμές απλής διάτμησης



$$E_u = 3\tau_h/\gamma$$

$$c_u = (\tau_h)_{\max}$$

τ_h = applied horizontal shear stress

γ = shear strain

Τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u) σε υπερ-στερεοποιημένες αργίλους ($OCR =$ λόγος υπερ-στερεοποίησης). Αποτελέσματα από δοκιμές απλής διάτμησης

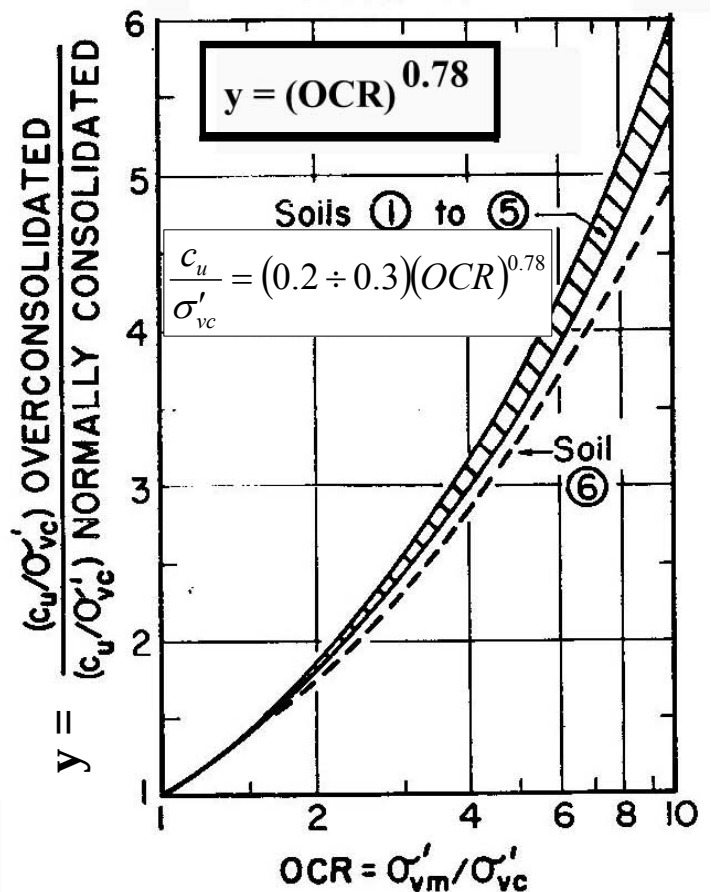
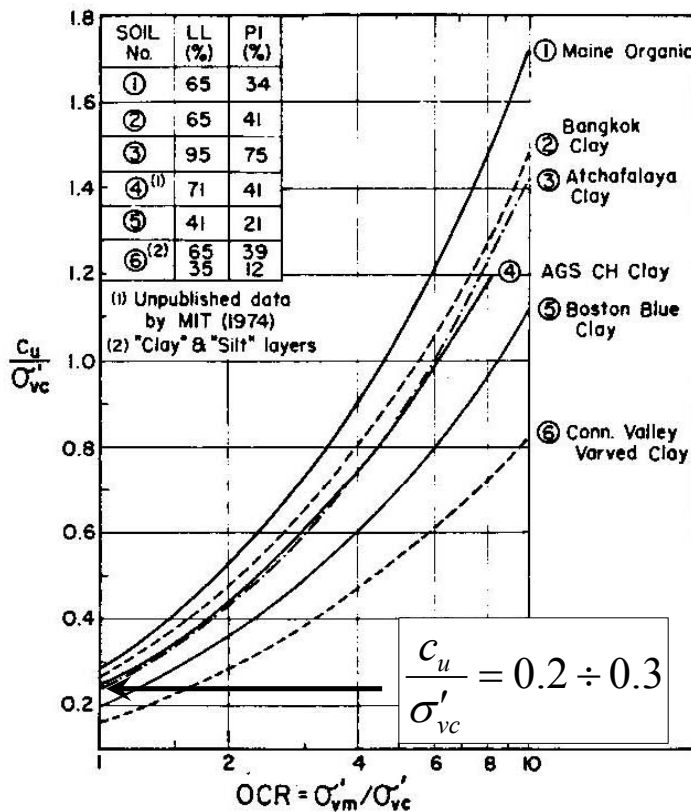


Fig25 - Results EKUDSS Tests
after Ladd et al, 1977

Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας (E) με την αντίσταση αιχμής ($R_p = q_c$) της δοκιμής Διείδωσης Κώνου (CPT)

(κατά Sanglerat)

$$E = \alpha R_p$$

Για άμμους : $E = E'$ (στραγγισμένο)

Για αργίλους : $E = E_u$ (αστράγγιστο)

CL	Χαμηλής πλαστικότητας άργιλος	
	$R_p < 0,7 \text{ MPa}$	$4 < \alpha < 6,5$
	$0,7 < R_p < 2,0 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 4$
	$R_p > 2,0 \text{ MPa}$	$1,3 < \alpha < 2,2$
ML	Χαμηλής πλαστικότητας ιλύς	
	$R_p < 2,0 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 6$
	$R_p > 2,0 \text{ MPa}$	$1 < \alpha < 3$
CH	Υψηλής πλαστικότητας άργιλος	
MH	Υψηλής πλαστικότητας ιλύς	
	$R_p < 2,0 \text{ MPa}$	$2,5 < \alpha < 5$
OL	Οργανική ιλύς	
	$R_p < 1,2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 8$
	$R_p > 1,2 \text{ MPa}$	$0,5 < \alpha < 4$
T-OH	Τύρφη και άργιλος πολύ οργανική	
	$R_p < 0,7 \text{ MPa}$	$1,5 < \alpha < 1$
	$50 < w < 100\%$	$1 < \alpha < 1,5$
	$100 < w < 200\%$	$1 < \alpha < 1,5$
	$w > 200\%$	$0,4 < \alpha < 1$
Οργανογενής ασβεστόλιθος (κρητис-κιμωλία)		
	$R_p < 3,0 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 4$
	$R_p > 3,0 \text{ MPa}$	$1,5 < \alpha < 3$
Άμμος		
	$R_p < 10,0 \text{ MPa}$	$\alpha = 2$
Πυκνό αμμοχάλικο		
	$R_p > 10,0 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 3$

$$\alpha = E_s / R_p \text{ (Sanglerat, 1977)}$$

όπου:

$R_p = q_c$

: αντίσταση αιχμής ολλανδικού κώνου κατά τη δοκιμή στατικής πεντρομέτρησης με ταχύτητα 2cm/sec

$E_s = \Delta H/H$

: μέτρο συμπίεσης εδάφους

Σχήμα 8. Συσχέτιση $q_c - E_s$

Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας άμμων με την αντίσταση αιχμής (q_c) της δοκιμής Διείδωσης Κώνου (CPT) - (κατά Baldi)

E_{50} : για διατμ. τάση = 50% της αντοχής , E_{25} : για διατμ. τάση = 25% της αντοχής

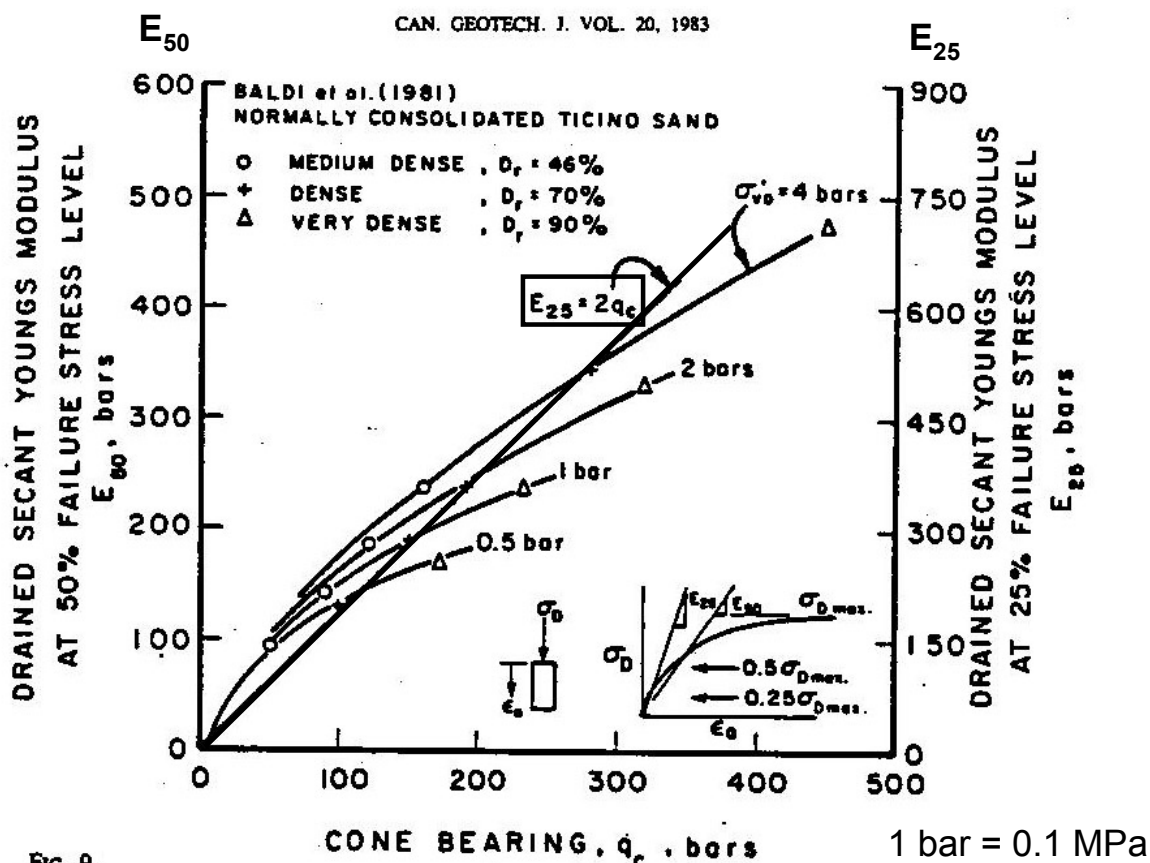


Fig. 9.

Relationship between cone bearing and drained Young's modulus for normally consolidated, uncemented, quartz

Τυπικές τιμές του στραγγισμένου μέτρου ελαστικότητας ($E = E'$) για διάφορα είδη εδαφών

Table 2-6 Typical range of values for the static stress-strain modulus E_s for selected soils
Field values depend on stress history, water content, density, etc. From Bowles

Soil	E_s	
	ksf	Mpa
Clay		
Very soft	50-250	2-15
Soft	100-500	5-25
Medium	300-1000	15-50
Hard	1000-2000	50-100
Sandy	500-5000	25-250
Glacial till		
Loose	200-3200	10-153
Dense	3000-15 000	144-720
Very dense	10 000-30 000	478-1440
Loess	300-1200	14-57
Sand		
Silty	150-450	7-21
Loose	200-500	10-24
Dense	1000-1700	48-81
Sand and gravel		
Loose	1000-3000	48-144
Dense	2000-4000	96-192
Shale	3000-300 000	144-14 400
Silt	40-400	2-20

Τυπικές τιμές του στραγγισμένου μέτρου ελαστικότητας (E) για διάφορα εδάφη

Table 5-5 Equations for stress-strain modulus E_s by several test methods
 E_s in kPa for SPT and units of q_c for CPT; divide kPa by 50 to obtain ksf

	SPT	CPT
Sand	$E_s = 500(N + 15)$ $E_{s,\dagger} = 18\,000 + 750N$ $E_s = (15\,200 \text{ to } 22\,000) \ln N$	$E_s^* = 2 \text{ to } 4q_c$ $E_{s,\dagger} = 2(1 + D_r^2)q_c$
Clayey sand	$E_s = 320(N + 15)$	$E_s = 3 \text{ to } 6q_c$
Silty sand	$E_s = 300(N + 6)$	$E_s = 1 \text{ to } 2q_c$
Gravelly sand	$E_s = 1200(N + 6)$	
Soft clay		$E_s = 6 \text{ to } 8q_c$
Using the undrained shear strength s_u in unit of s_u		
Clay	$I_p > 30$, or organic $I_p < 30$, or stiff $1 < \text{OCR} < 2$ $\text{OCR} > 2$	$E_s = 100 \text{ to } 500s_u$ $E_s = 500 \text{ to } 1500s_u$ $E_s = 800 \text{ to } 1200s_u$ $E_s = 1500 \text{ to } 2000s_u$

* Schmertmann (1970) used $2q_c$; in 1974 used 2.5 to $3.5q_c$ [Mitchell and Gardner (1975)].

† Vesic (1970).

‡ From D'Appolonia et al. (1970) (author's equation from Fig. 44).

from Bowles

Τυπικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας (E σε MPa) μή-συνεκτικών εδαφών με βάση τα αποτελέσματα της επιτόπου Δοκιμής Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Κατά Tassios & Anagnostopoulos (1974) : $E = \alpha + C(N \pm 6)$
(E σε MPa)

N	α
$N < 15$	$\alpha = 0$
$N > 15$	$\alpha = 40$

Είδος εδάφους	C
Ιλυώδης άμμος	3
Λεπτόκοκκη άμμος	3.5
Μεσόκοκκη άμμος	4.5
Χονδρόκοκκη άμμος	7
Χαλικώδης άμμος	10
Αμμώδεις χάλικες	12

Κατά Papadopoulos & Anagnostopoulos (1987) : $E = C_1 + C_2 N$
(E σε MPa)

Είδος εδάφους	C_1	C_2
Αμμώδης ιλύς	3.2	0.49
Ιλυώδης άμμος	2.6	0.69
Λεπτόκοκκη άμμος	7.5	0.80

Υπολογισμός μεγέθους καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner :

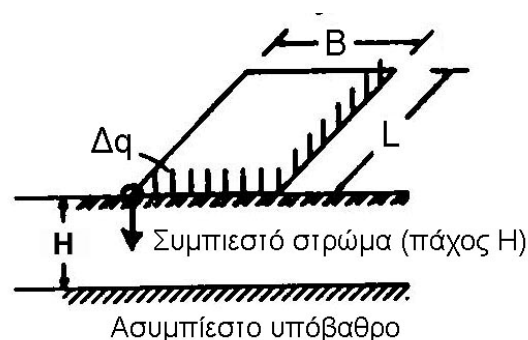
Καθίζηση (ρ) της γωνίας εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου (δηλ. ομοιόμορφης πίεσης $= \Delta q$), πλάτους B και μήκους L ($\geq B$) σε βάθος D από την επιφάνεια. Το συμπιεστό στρώμα έχει πάχος H και «ελαστικές» σταθερές (E, ν).

$$\rho = \Delta q \cdot B \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D$$

Προσοχή : $\Delta q = q - q_0$ (q_0 = αρχική πίεση)

I_D = συντελεστής βάθους. Για επιφανειακή θεμελίωση ($D=0$) : $I_D = 1$

F_1, F_2 = συντελεστές σχήματος. Εξαρτώνται από τις τιμές των L/B και H/B (βλέπε επόμενα)



Εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner :

1. Συνολική καθίζηση (άμεση + στερεοποίηση) υπό στραγγισμένες συνθήκες, με χρήση των ελαστικών παραμέτρων : $E = E'$ και $\nu = \nu'$ (στραγγισμένες τιμές)
2. Άμεση καθίζηση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ελαστικές παραμέτρους : $E = E_u$ και $\nu = 0.50$

Υπολογισμός μεγέθους καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner : ρ = καθίζηση της γωνίας του πεδίου

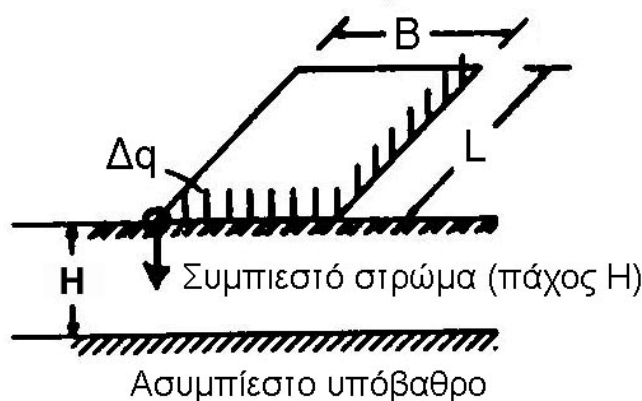
$$\rho = \Delta q B \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D$$

Οι συντελεστές επιρροής F_1 και F_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[M \ln \left(\frac{(1 + \sqrt{M^2 + 1}) \sqrt{M^2 + N^2}}{M (1 + \sqrt{M^2 + N^2 + 1})} \right) + \ln \left(\frac{(M + \sqrt{M^2 + 1}) \sqrt{1 + N^2}}{M + \sqrt{M^2 + N^2 + 1}} \right) \right]$$

$$F_2 = \frac{N}{2\pi} \arctan \left(\frac{M}{N \sqrt{M^2 + N^2 + 1}} \right)$$

όπου : $M = \frac{L}{B}$ $N = \frac{H}{B}$

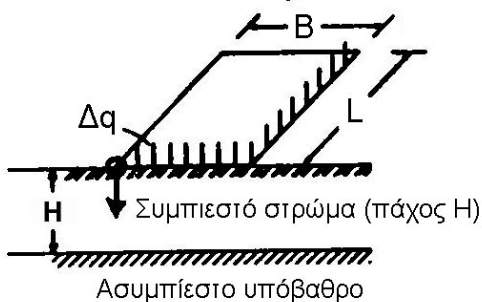


Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

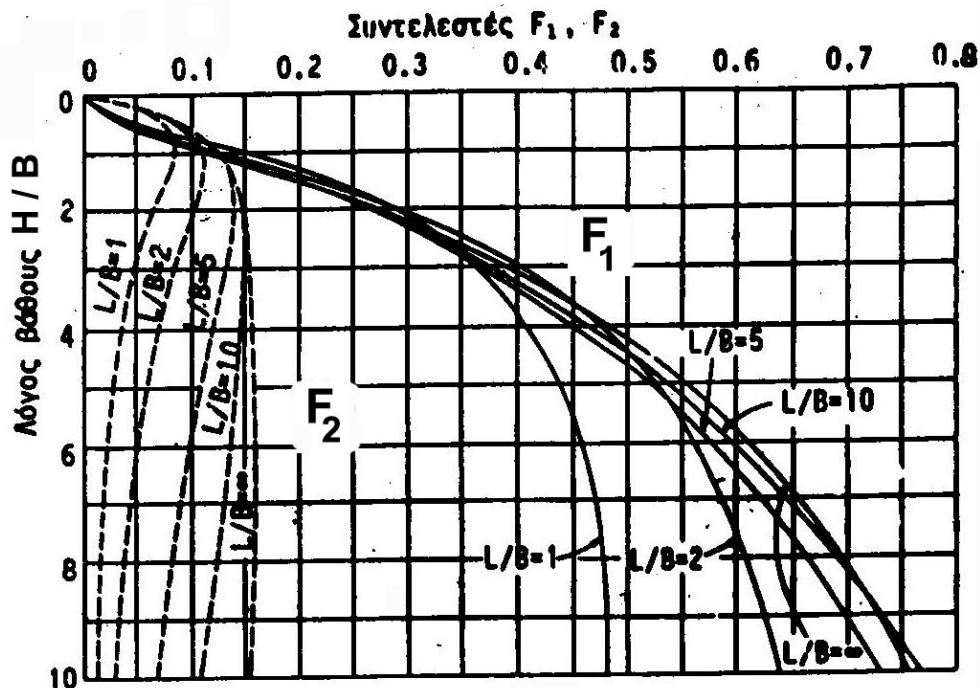
1. Μέθοδος Steinbrenner :

$$\rho = \Delta q B \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D$$

Πινακοποιημένες τιμές των συντελεστών F_1 και F_2



ρ = καθίζηση της γωνίας του πεδίου



Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner - Συσχέτιση των ρ_i και ρ σε κορεσμένες αργίλους :

$$\rho = \text{καθίζηση της γωνίας του πεδίου} : \quad \rho = \Delta q B \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D$$

1. Εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner στην άμεση καθίζηση (ρ_i) της γωνίας πεδίου :

$$E = E_u \text{ και } \nu = 0.50 : \quad \rho_i = \Delta q B \frac{0.75}{E_u} F_1 I_D \Rightarrow \rho_i = \Delta q B \frac{(1+\nu')}{E'} F_1 I_D$$

2. Εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner στη συνολική καθίζηση (ρ) της γωνίας πεδίου :

$$\rho = \Delta q B \frac{1-\nu'^2}{E'} \left(F_1 + \frac{1-2\nu'}{1-\nu'} F_2 \right) I_D$$

$$\text{Συσχέτιση των } \rho_i \text{ και } \rho : \quad \frac{\rho_i}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{1}{(1-\nu') + (1-2\nu') \frac{F_2}{F_1}}$$

$$\text{Για } \nu' = 1/3 : \quad \frac{\rho_i}{\rho} = \frac{3}{4 + 2 \frac{F_2}{F_1}} \Rightarrow \frac{1}{2} \leq \frac{\rho_i}{\rho} \leq \frac{3}{4} \quad (\text{επειδή : } 0 < F_2/F_1 < 1)$$

Συνεπώς : κατά Steinbrenner, η άμεση καθίζηση ισούται με το 50-75% της συνολικής.
Εύλογο συμπέρασμα για φορτίσεις αρκετά μακριά από την αστοχία (αλλιώς $\rho \gg \rho_i$)

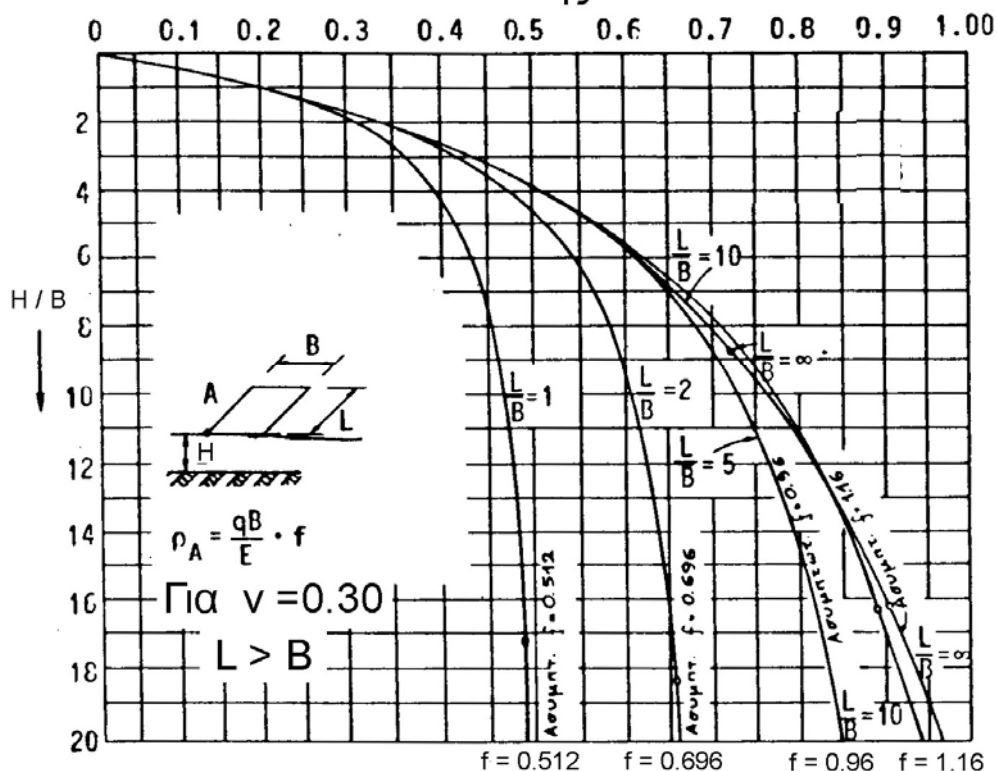
Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner για $\nu = 0.30$ (συνήθης τιμή για στραγγισμένες συνθήκες) :

$$\rho = \frac{\Delta q B}{E} f I_D$$

Πινακοποιημένες τιμές του συντελεστή “f”

Συντελεστής f



$$\Delta q = q - q_0$$

ρ = καθίζηση της
γωνίας του πεδίου

όπου :

$$f = 0.91 F_1 + 0.52 F_2$$

Εφαρμογή της μεθόδου
Steinbrenner υπό
στραγγισμένες συνθήκες, για:

$$E = E' \text{ και } \nu = \nu' = 0.30$$

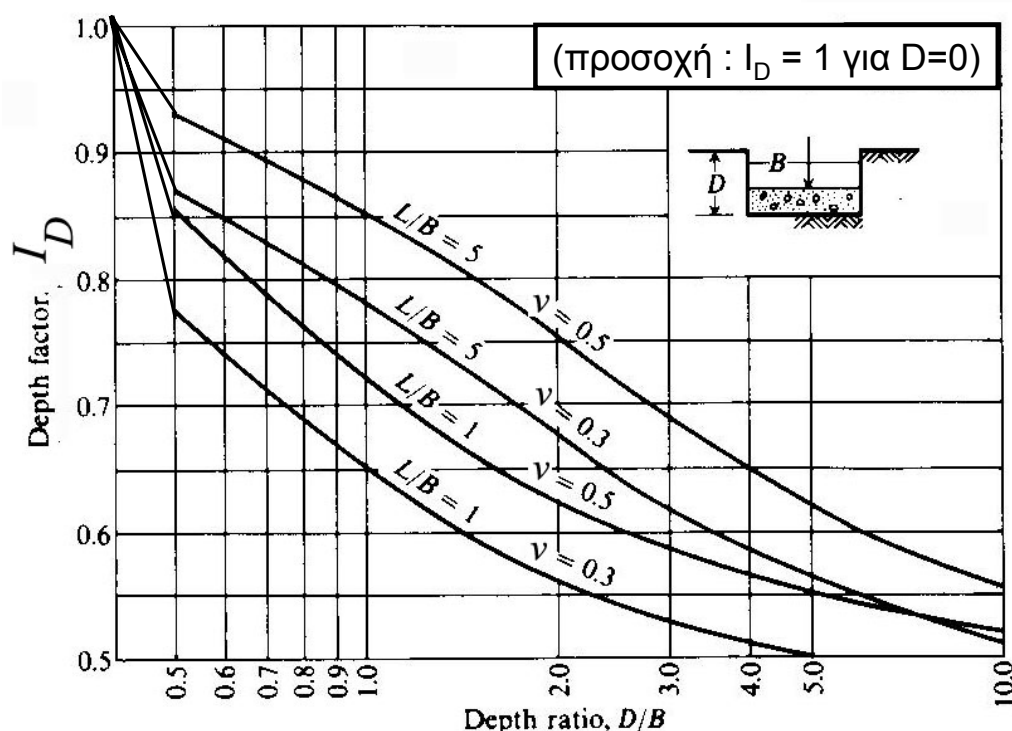
Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner :

$$\rho = \Delta q B \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D$$

Συντελεστής βάθους θεμελίωσης I_D :

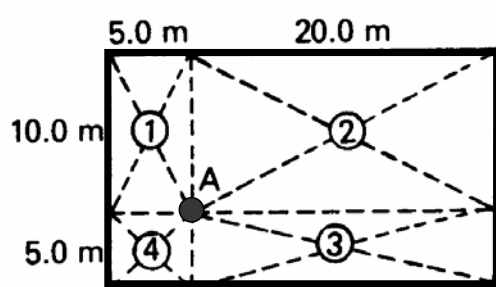
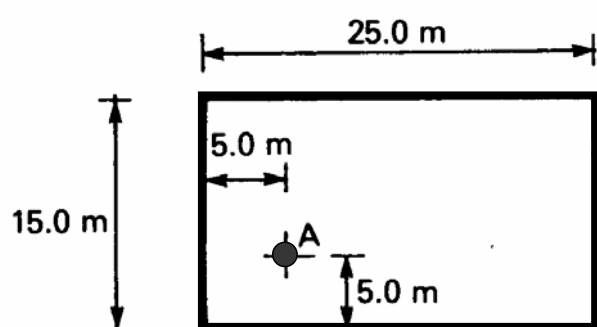
$$\rho = \frac{\Delta q B}{E} f I_D$$



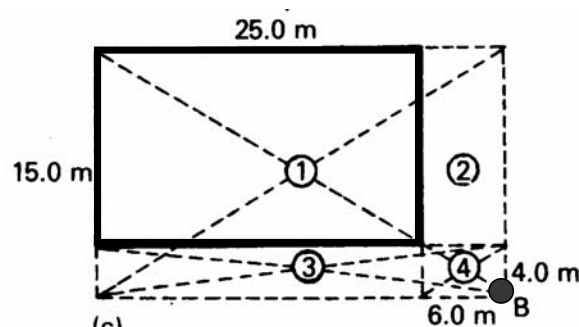
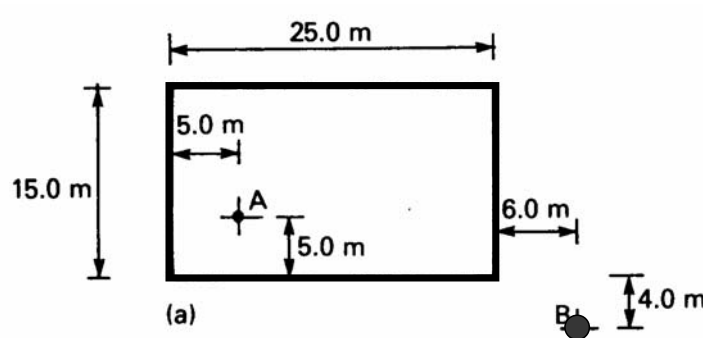
Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Μέθοδος Steinbrenner :

Επαλληλία τεσσάρων ορθογωνίων για τον υπολογισμό της καθίζησης σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας του εδάφους γύρω από ορθογωνικό πέδιλο :



$$A = (1) + (2) + (3) + (4)$$



$$B = (1) - (2) - (3) + (4)$$

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1. Απλοποιημένη μέθοδος Steinbrenner για εύκαμπτα και άκαμπτα θεμέλια διαφόρων σχημάτων σε ομοιογενές έδαφος μεγάλου βάθους :

Από την προηγούμενη σχέση του Steinbrenner, προκύπτει η παραπλεύρως απλοποιημένη σχέση για την καθίζηση σε διάφορα σημεία πεδίων :

$$\rho = \Delta q B \frac{1 - \nu^2}{E} I_s I_D$$

Τιμές του συντελεστή I_s

το I_D υπολογίζεται όπως προηγουμένως

Παρατήρηση :

Εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner:

Στραγγισμένες συνθήκες:

$E = E'$ και $\nu = \nu'$

Αστράγγιστες συνθήκες:

$E = E_u$ και $\nu = 0.50$

Σχήμα πεδίου	ΚΕΝΤΡΟ	ΑΚΡΟ ή ΓΩΝΙΑ	ΜΕΣΟΝ ΠΛΕΥΡΑ Β	ΜΕΣΟΝ ΠΛΕΥΡΑ L
Εύκαμπτος κύκλος	1.00	0.64	0.64	0.64
Άκαμπτος κύκλος	0.79	0.79		
Εύκαμπτο τετράγωνο	1.12	0.56	0.76	0.76
Άκαμπτο τετράγωνο	0.99	0.99		
Εύκαμπτο ορθογώνιο L / B				
1.5	1.36	0.67	0.89	0.97
2	1.52	0.76	0.98	1.12
3	1.78	0.88	1.11	1.35
5	2.10	1.05	1.27	1.68
10	2.53	1.26	1.49	2.12
100	4.00	2.00	2.20	3.60
1000	5.47	2.75	2.94	5.03
10000	6.90	3.50	3.70	6.50

Παρατήρηση 1 : Από τον προηγούμενο πίνακα προκύπτει η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση μεταξύ της καθίζησης (ρ_c) του κέντρου εύκαμπτης θεμελίωσης και της ενιαίας καθίζησης (ρ_a) όμοιας άκαμπτης θεμελίωσης με την ίδια φόρτιση :

$$\rho_a = \left(\frac{2}{3} \div \frac{3}{4} \right) \rho_c$$

ρ_a = καθίζηση άκαμπτου πεδίου

ρ_c = καθίζηση κέντρου εύκαμπτου πεδίου (Steinbrenner)

($2/3 \div 3/4$) : τιμή αναλόγως του σχήματος του θεμελίου

Παρατήρηση 2 : Η απλοποιημένη σχέση Steinbrenner χρησιμεύει και στην εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους από μετρήσεις της συμπίεσης κατά την επιτόπου δοκιμή φόρτισης πλάκας. Κατά τη δοκιμή αυτή, φορτίζεται μιά άκαμπτη κυκλική ή ορθογωνική πλάκα (διαστάσεως B) που τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους ($D=0 \Rightarrow I_D=1$) και μετράται η καθίζηση (ρ) που αντιστοιχεί στην εφαρμογή πίεσης (Δq). Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση :

$$E = \frac{\Delta q}{\rho} (1 - \nu^2) B I_s$$

όπου : $I_s = 0.99$ (για άκαμπτο τετραγωνικό πέδιλο-πλάκα) και $I_s = 0.79$ (για άκαμπτο κυκλικό πέδιλο-πλάκα)

και :

Για άμμους : $\nu = 1/3$. Η υπολογιζόμενη τιμή του E είναι : $E = E'$

Για κορεσμένες αργίλους : $\nu = \nu_u = 0.5$. Η υπολογιζόμενη τιμή του E είναι : $E = E_u$

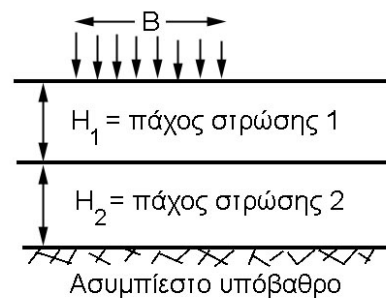
Εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner σε πολύστρωτο έδαφος :

Στρώση 1 : πάχος H_1 , ιδιότητες E_1, ν_1

Στρώση 2 : πάχος H_2 , ιδιότητες E_2, ν_2

....

Στρώση n : πάχος H_n , ιδιότητες E_n, ν_n



Καθίζηση (ρ) κάτω από τη γωνία του πεδίου :

$$\rho = [\rho_{n,n} - \rho_{(n-1),n}] + [\rho_{(n-1),(n-1)} - \rho_{(n-2),(n-1)}] + \dots + [\rho_{2,2} - \rho_{1,2}] + \rho_{1,1}$$

όπου :

$\rho_{i,j}$ = καθίζηση της γωνίας πεδίου επί εδαφικού στρώματος πάχους :

$z_i = (H_1 + H_2 + \dots + H_i)$ με ιδιότητες E_j, ν_j

Παράδειγμα δίστρωτου σχηματισμού : $\rho = [\rho_{2,2} - \rho_{1,2}] + \rho_{1,1}$

όπου :

$\rho_{2,2}$ = καθίζηση επί εδαφικού στρώματος πάχους $(H_1 + H_2)$ με ιδιότητες E_2, ν_2

$\rho_{1,2}$ = καθίζηση επί εδαφικού στρώματος πάχους (H_1) με ιδιότητες E_2, ν_2

$\rho_{1,1}$ = καθίζηση επί εδαφικού στρώματος πάχους (H_1) με ιδιότητες E_1, ν_1

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

1α. Μέθοδος Miloníc (1970) για εύκαμπτα κυκλικά θεμέλια :

Καθίζηση (ρ) σε ακτινική απόσταση (r) από το κέντρο εύκαμπτου κυκλικού πεδίου (δηλ. ομοιόμορφης πίεσης = Δq), ακτίνας R στην επιφάνεια του εδάφους. Το συμπίεστο στρώμα έχει πάχος H και «ελαστικές» σταθερές (E, ν).

$$\rho = \Delta q \frac{2}{E} R I_\rho$$

Παρατηρήσεις :

- Η καθίζηση (ρ_a) άκαμπτου κυκλικού θεμελίου, μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση :

$$\rho_a = \left(\frac{2}{3} \div \frac{3}{4} \right) \rho_c$$

όπου (ρ_c) είναι η καθίζηση του κέντρου του ισοδύναμου εύκαμπτου θεμελίου.

- Σε πολύστρωτο έδαφος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέθοδος επαλληλίας όπως για ορθογωνικά πέδιλα (Steinbrenner)

ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ I_ρ
ΓΙΑ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΚΥΚΛΙΚΟ ΘΕΜΕΛΙΟ ΑΚΤΙΝΑΣ R

ν	H/R	r/R					
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.15	1	0.464	0.458	0.441	0.408	0.348	0.208
	2	0.684	0.674	0.645	0.593	0.509	0.348
	4	0.811	0.800	0.768	0.710	0.619	0.463
	6	0.839	0.827	0.794	0.736	0.646	0.501
0.30	1	0.397	0.392	0.379	0.351	0.301	0.173
	2	0.613	0.604	0.578	0.531	0.456	0.305
	4	0.740	0.732	0.703	0.651	0.568	0.420
	6	0.770	0.762	0.733	0.681	0.597	0.458
0.45	1	0.278	0.276	0.267	0.250	0.213	0.109
	2	0.489	0.482	0.461	0.422	0.361	0.229
	4	0.612	0.608	0.585	0.541	0.472	0.340
	6	0.637	0.635	0.612	0.568	0.499	0.374

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

2. Μέθοδος Kany (DIN 4019) για την καθίζηση (ρ) άκαμπτου ορθογωνικού πεδίου ($B \times L$) σε έδαφος με λόγο Poisson $\nu \approx 0$:

Η καθίζηση ενός άκαμπτου ορθογωνικού πεδίου διαστάσεων $B \times L$, θεωρείται ίση με την καθίζηση του χαρακτηριστικού σημείου «C» ενός ισοδύναμου «εύκαμπτου» πεδίου, οπότε :

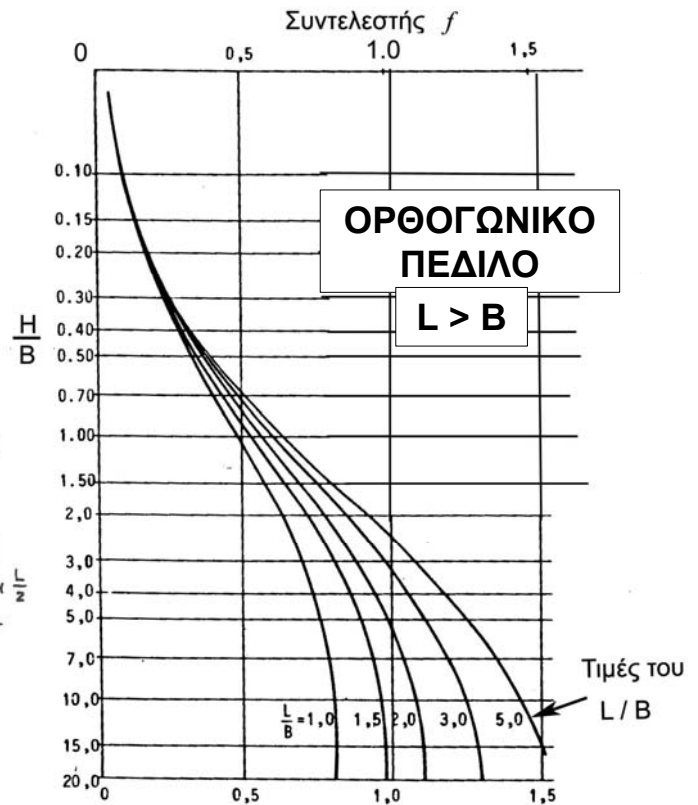
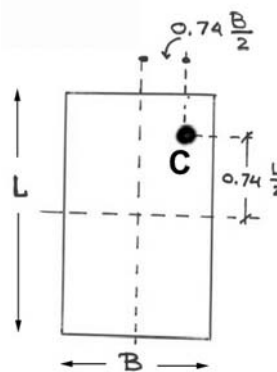
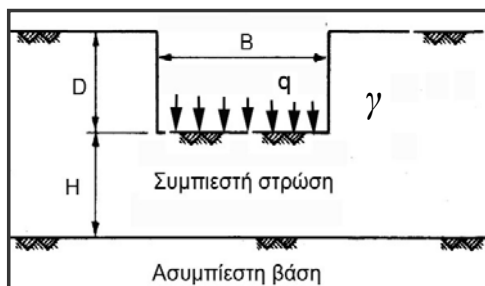
$$\rho = f \frac{\Delta q B}{E_s}$$

$$\Delta q = q - q_0 = q - \gamma D$$

E_s = μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης

$$E_s = \frac{(1 - \nu')}{(1 + \nu')(1 - 2\nu')} E'$$

E' , ν' = τιμές των στραγγισμένων ελαστικών παραμέτρων E , ν



Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

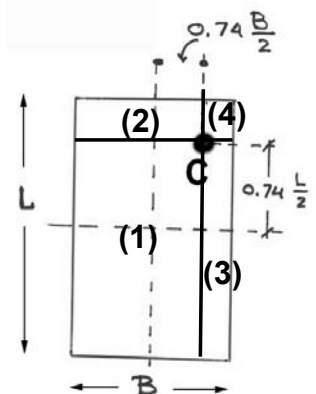
Συσχέτιση των μεθόδων Steinbrenner και Kany για ορθογωνικά πέδιλα

Εφόσον η μέθοδος Kany υπολογίζει την καθίζηση ενός «άκαμπτου» πεδίου μέσω της καθιζήσης του χαρακτηριστικού σημείου «C» του αντίστοιχου εύκαμπτου πεδίου, οι δύο μέθοδοι μπορούν να συγκριθούν :

1.1 Μέθοδος Kany (για πέδιλα στην επιφάνεια του εδάφους) :

$$\rho = \frac{q B}{E_s} f$$

Εφαρμογή για : $L/B=2$ και $H/B=3 \Rightarrow f = 0.85 \Rightarrow \rho = \frac{q B}{E_s} 0.85$



1.2 Μέθοδος Steinbrenner για $\nu = 0.30$ (ισοδύναμη σχέση μέσω του E_s για πέδιλα στην επιφάνεια του εδάφους) :

$$\rho = q B \frac{(1 - \nu)}{E_s} \left(\frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} F_1 + F_2 \right)$$

και για $\nu=0.30$: $\rho = \frac{q B}{E_s} (1.225 F_1 + 0.70 F_2)$

Υπολογισμός της καθιζήσης του σημείου «C» ενός εύκαμπτου πεδίου με $L/B=2$ και $H/B=3$, ως άθροισμα των καθιζήσεων της γωνίας των τεσσάρων τμημάτων του πεδίου :

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Συσχέτιση των μεθόδων Steinbrenner και Kany για ορθογωνικά πέδιλα

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 1 : } L' &= 0.87 L = 1.74 B, \quad B' = 0.87 B \Rightarrow L'/B' = 2, \quad H/B' = 3.45 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.44, F_2 = 0.075 \Rightarrow 1.225 F_1 + 0.70 F_2 = 0.592 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 2 : } L' &= 0.87 B, \quad B' = 0.13 L = 0.26 B \Rightarrow L'/B' = 3.35, \quad H/B' = 11.5 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.68, F_2 = 0.05 \Rightarrow 1.225 F_1 + 0.70 F_2 = 0.868 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 3 : } L' &= 0.87 L = 1.74 B, \quad B' = 0.13 B \Rightarrow L'/B' = 13.4, \quad H/B' = 23 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.76, F_2 = 0.12 \Rightarrow 1.225 F_1 + 0.70 F_2 = 1.015 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 4 : } L' &= 0.13 L = 0.26 B, \quad B' = 0.13 B \Rightarrow L'/B' = 2, \quad H/B' = 23 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.67, F_2 = 0.03 \Rightarrow 1.225 F_1 + 0.70 F_2 = 0.842 \end{aligned}$$

Συνεπώς :

$$\rho = (q/E_s) \{ (0.87 B) \times 0.592 + (0.26 B) \times 0.868 + (0.13 B) \times 1.015 + (0.13 B) \times 0.842 \} \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{q B}{E_s} 0.982$$

Αρα, σύγκριση για $\nu = 0.30$:

$$\text{Steinbrenner : } \rho = \frac{q B}{E_s} 0.982$$

$$\text{Kany : } \rho = \frac{q B}{E_s} 0.85$$

Όχι καλή
συσχέτιση

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Συσχέτιση των μεθόδων Steinbrenner και Kany για ορθογωνικά πέδιλα

1.3 Μέθοδος Steinbrenner για $\nu = 0$ (ισοδύναμη σχέση μέσω του E_s για πέδιλα στην επιφάνεια του εδάφους) :

$$\rho = q B \frac{(1-\nu)}{E_s} \left(\frac{1-\nu}{1-2\nu} F_1 + F_2 \right)$$

$$\text{και για } \nu = 0 : \quad \rho = \frac{q B}{E_s} (F_1 + F_2)$$

Υπολογισμός της καθίζησης του σημείου C ενός εύκαμπτου πεδίου με $L=2B$ και $H/B=3$, ως άθροισμα των καθιζήσεων της γωνίας των τεσσάρων τμημάτων του πεδίου :

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 1 : } L' &= 0.87 L = 1.74 B, \quad B' = 0.87 B \Rightarrow L'/B' = 2, \quad H/B' = 3.45 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.44, F_2 = 0.075 \Rightarrow F_1 + F_2 = 0.515 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 2 : } L' &= 0.87 B, \quad B' = 0.13 L = 0.26 B \Rightarrow L'/B' = 3.35, \quad H/B' = 11.5 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.68, F_2 = 0.05 \Rightarrow F_1 + F_2 = 0.73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 3 : } L' &= 0.87 L = 1.74 B, \quad B' = 0.13 B \Rightarrow L'/B' = 13.4, \quad H/B' = 23 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.76, F_2 = 0.12 \Rightarrow F_1 + F_2 = 0.88 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Τμήμα 4 : } L' &= 0.13 L = 0.26 B, \quad B' = 0.13 B \Rightarrow L'/B' = 2, \quad H/B' = 23 \Rightarrow \\ F_1 &= 0.67, F_2 = 0.03 \Rightarrow F_1 + F_2 = 0.70 \end{aligned}$$

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Συσχέτιση των μεθόδων Steinbrenner και Kany για ορθογωνικά πέδιλα

1.3 Μέθοδος Steinbrenner για $\nu = 0$ (ισοδύναμη σχέση μέσω του E_s για πέδιλα στην επιφάνεια του εδάφους) :

Συνεπώς :

$$\rho = (q/E_s) \{ (0.87 B) \times 0.515 + (0.26 B) \times 0.73 + (0.13 B) \times 0.88 + (0.13 B) \times 0.70 \} \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{q B}{E_s} 0.843$$

Αρα, σύγκριση για $\nu = 0$:

$$\text{Steinbrenner : } \rho = \frac{q B}{E_s} 0.843 \quad \text{Kany : } \rho = \frac{q B}{E_s} 0.85$$

Συνεπώς, η μέθοδος Kany δίνει καλή προσέγγιση της καθίζησης για φορτικές καταστάσεις του εδάφους όπου η παραδοχή $\nu = 0$ είναι εύλογη.

Δεδομένου ότι $\nu = 0$, ουσιαστικά σημαίνει μηδενική πλευρική παραμόρφωση του εδάφους, η περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει την καθίζηση λόγω στερεοποίησης του εδάφους κάτω από το πέδιλο «υπό συνθήκες συμπίεσμού», δηλαδή την καθίζηση (ρ_{c1}). Η καθίζηση αυτή σχολιάζεται στο Κεφάλαιο περί καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων σε αργιλικά εδάφη.

Υπολογισμός άμεσων καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

2. Μέθοδος Leonhardt (DIN 4019) για την καθίζηση (ρ) άκαμπτου κυκλικού πεδίου διαμέτρου $B = 2 R$, σε έδαφος με λόγο Poisson $\nu \approx 0$:

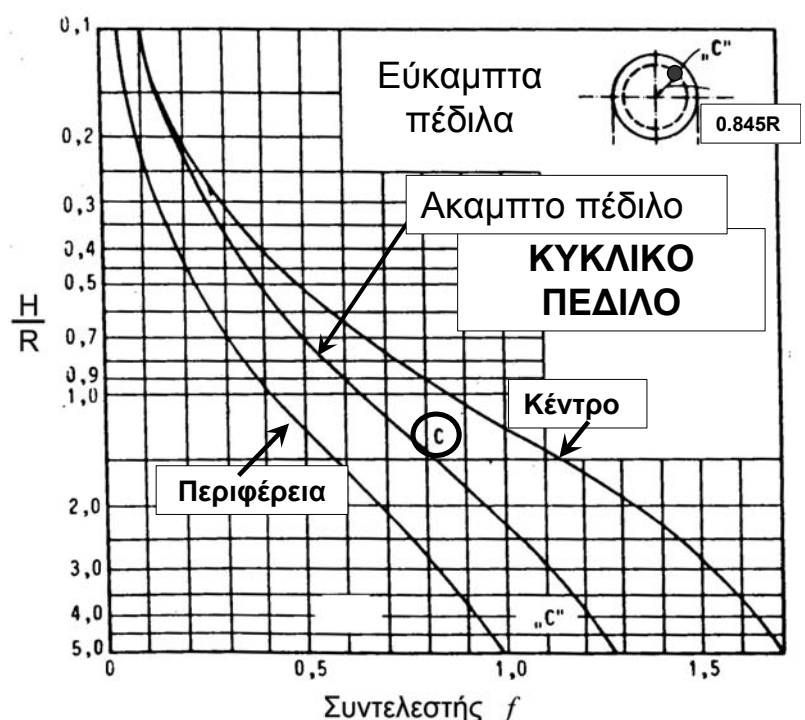
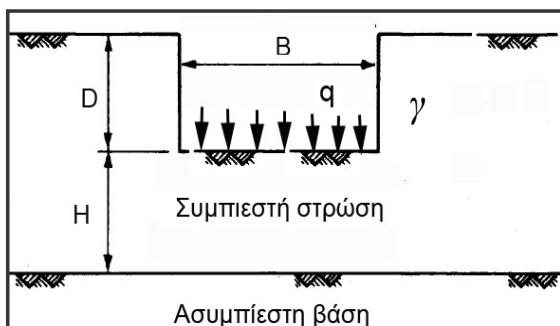
Η καθίζηση ενός άκαμπτου κυκλικού πεδίου διαμέτρου $B = 2R$, θεωρείται ίση με την καθίζηση του χαρακτηριστικού σημείου "C" ενός ισοδύναμου «εύκαμπτου» πεδίου, οπότε :

$$\rho = f \frac{\Delta q R}{E_s}$$

$$\Delta q = q - q_0 = q - \gamma D$$

E_s = μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης

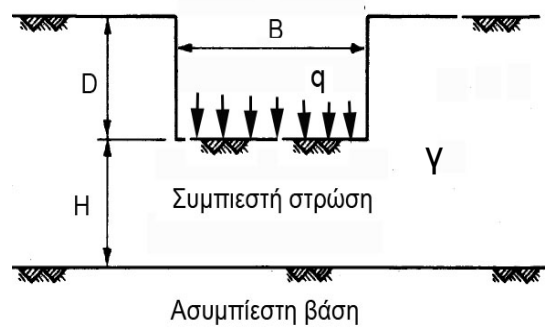
$$E_s = \frac{(1 - \nu')}{(1 + \nu')(1 - 2\nu')} E'$$



Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

3. Μέθοδος Janbu, Bjerrum & Kjaernsli (1959), όπως τροποποιήθηκε από τους Christian & Carrier (1978), για την άμεση καθίζηση άκαμπτων ορθογωνικών θεμελίων διαστάσεων $L \times B$ σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (αστράγγιστη φόρτιση) :

$$\rho_i = \mu_o \mu_1 \frac{\Delta q B}{E_u}$$



όπου :

ρ_i = άμεση καθίζηση άκαμπτου πεδίου

μ_o = συντελεστής βάθους (D) θεμελίωσης

μ_1 = συντελεστής πάχους (H) συμπίεστης στρώσης

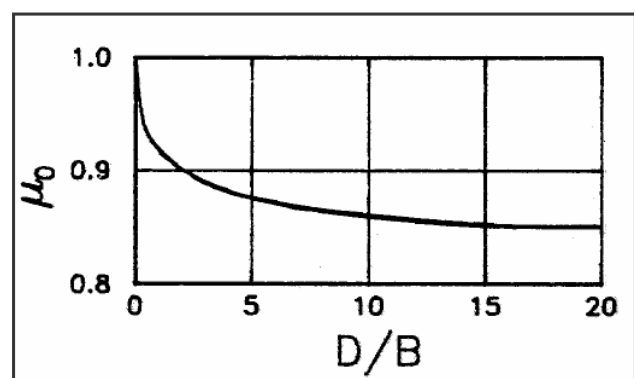
E_u = μέτρο ελαστικότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες

B = πλάτος πεδίου

L = μήκος πεδίου ($L \geq B$)

$\Delta q = q - q_o = q - \gamma D$

Τιμές του μ_o κατά Christian & Carrier (1978)



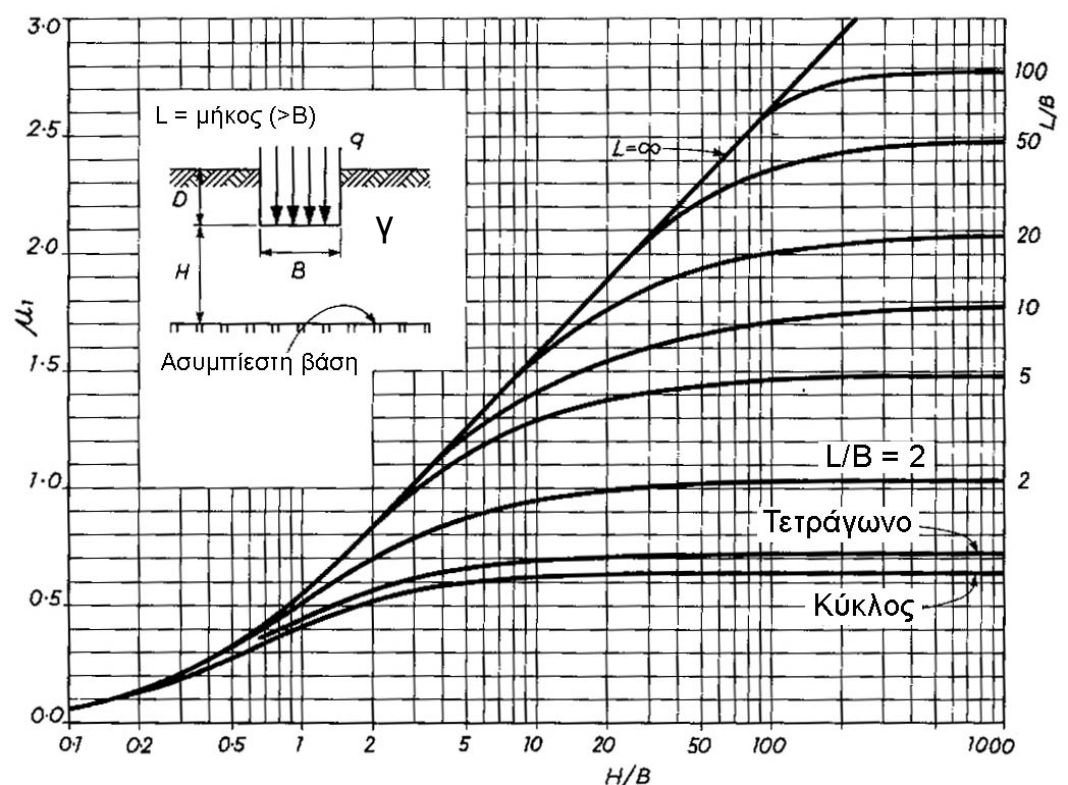
Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

3. Μέθοδος Janbu, Bjerrum & Kjaernsli για την άμεση καθίζηση άκαμπτων ορθογωνικών θεμελίων διαστάσεων $L \times B$ σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (αστράγγιστη φόρτιση) :

$$\rho_i = \mu_o \mu_1 \frac{\Delta q B}{E_u}$$

μ_1 = συντελεστής πάχους (H) συμπίεστης στρώσης

$\Delta q = q - q_o = q - \gamma D$



Τιμές του μ_1 κατά Christian & Carrier (1978)

Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Μέθοδος Butler (1975) : Καθίζηση κάτω από τη γωνία εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου διαστάσεων $L \times B$ ($L > B$) σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (αστράγγιστη φόρτιση) με γραμμικά αυξανόμενο αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας :

E_{uo} = αστράγγιστο μέτρο
ελαστικότητας στη στάθμη
έδρασης του πεδίου

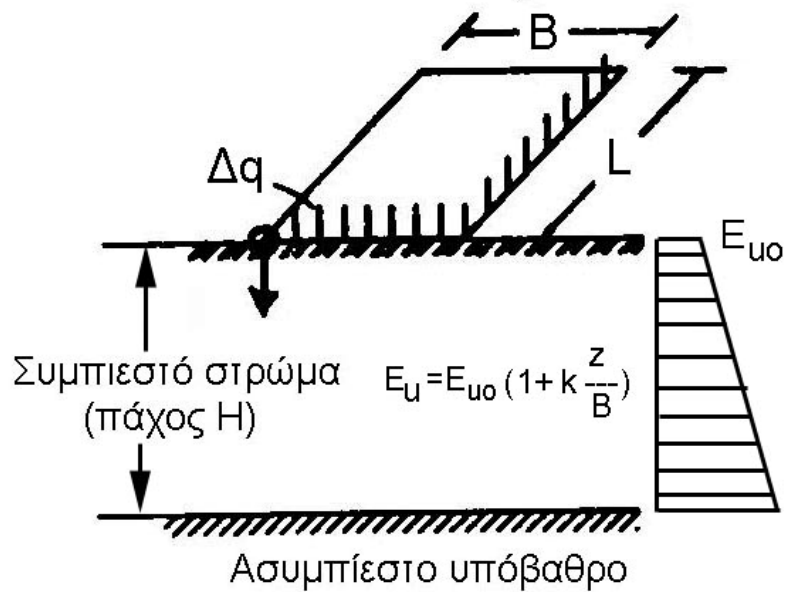
Γραμμική αύξηση του
αστράγγιστου μέτρου
ελαστικότητας με το βάθος (z)
κατά τη σχέση :

$$E_u = E_{uo} \left(1 + k \frac{z}{B} \right)$$

Καθίζηση της γωνίας του
πεδίου :

$$\rho_i = \frac{\Delta q B}{E_{uo}} I$$

$$\Delta q = q - q_o = q - \gamma D$$



Οι τιμές του συντελεστή επιρροής φαίνονται στα επόμενα σχήματα (για διάφορες τιμές του L/B)

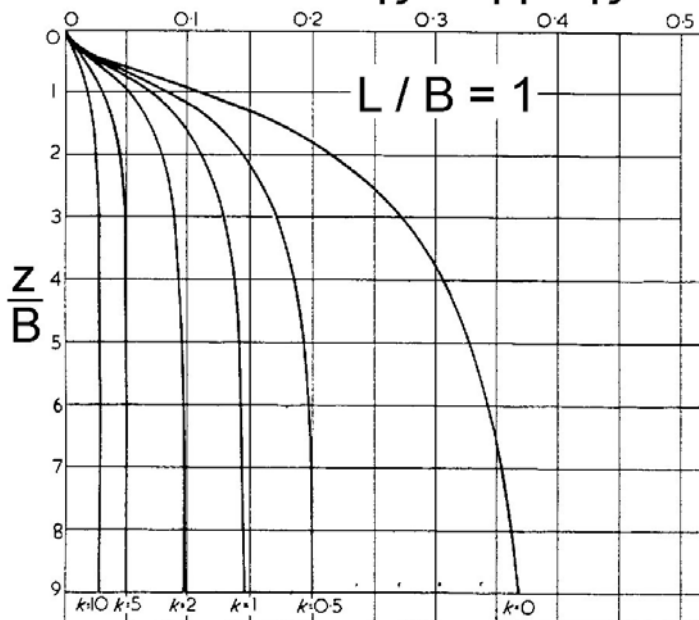
Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Μέθοδος Butler (1975) : Καθίζηση κάτω από τη γωνία εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου διαστάσεων $L \times B$ ($L > B$) σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (αστράγγιστη φόρτιση) με γραμμικά αυξανόμενο αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας :

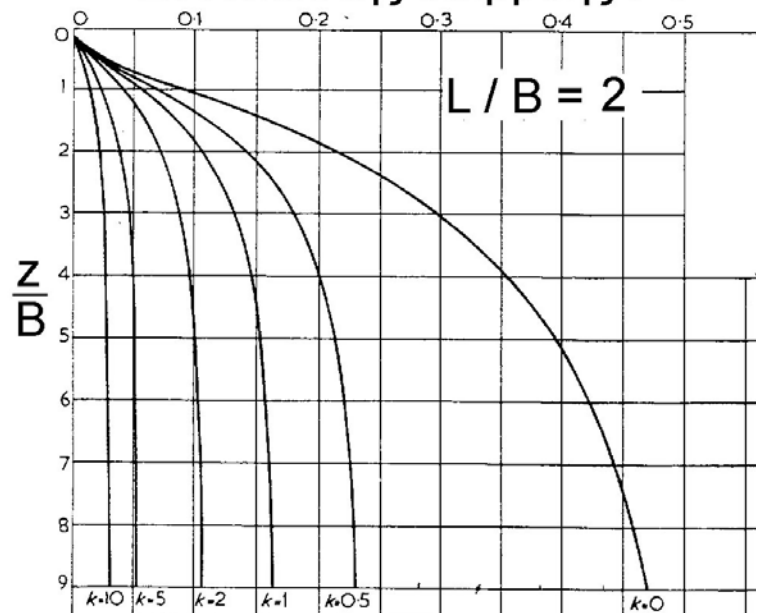
$$E_u = E_{uo} \left(1 + k \frac{z}{B} \right)$$

$$\rho_i = \frac{\Delta q B}{E_{uo}} I$$

Συντελεστής επιρροής : I



Συντελεστής επιρροής : I

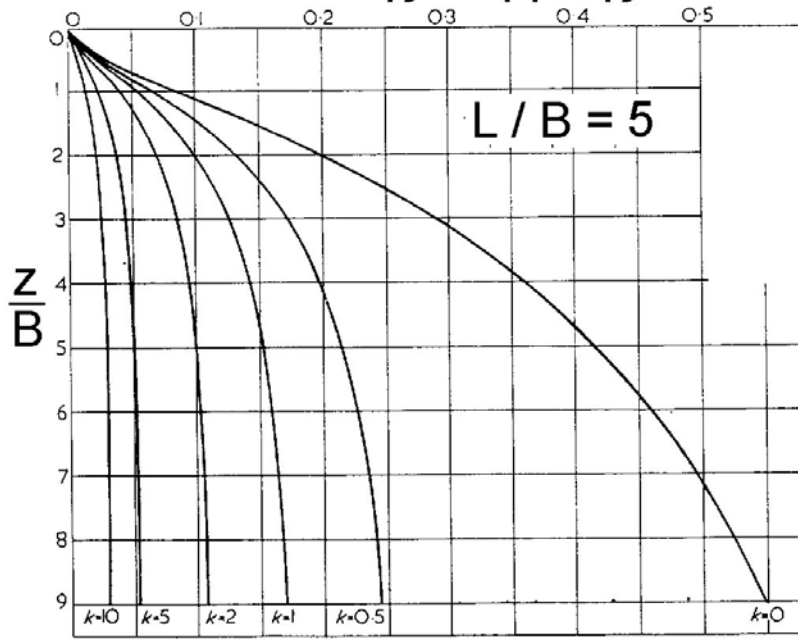


Υπολογισμός καθιζήσεων με σχέσεις «ελαστικής μορφής» :

Μέθοδος Butler (1975) : Καθίζηση κάτω από τη γωνία εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου διαστάσεων $L \times B$ ($L > B$) σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (αστράγγιστη φόρτιση) με γραμμικά αυξανόμενο αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας :

$$E_u = E_{uo} \left(1 + k \frac{z}{B} \right) \quad \rho_i = \frac{\Delta q B}{E_{uo}} I$$

Συντελεστής επιρροής : I



Παρατήρηση :

Με επαλληλία ορθογωνίων (όπως με τη μέθοδο Steinbrenner) μπορεί να υπολογισθεί η καθίζηση οποιουδήποτε σημείου εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου

Υπολογισμός καθιζήσεων πεδίων με σχέσεις «ελαστικής μορφής»

Σύνοψη μεθόδων υπολογισμού

1. Μέθοδοι Steinbrenner και Milovic :

$$\rho = \Delta q B \frac{1-\nu^2}{E} \left(F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2 \right) I_D \quad \rho = \Delta q \frac{2}{E} R I_\rho$$

Άμεση ή συνολική καθίζηση σε τυχόν σημείο εύκαμπτων ορθογωνικών / κυκλικών πεδίων

Άμεση (ρ_i) : Εφαρμογή σε κορεσμένες αργίλους με $E = E_u$ και $\nu = 0.50$.

Συνολική (ρ) : Εφαρμογή σε άμμους (υπό προϋποθέσεις) και αργίλους με E , ν .

Δίνονται και διορθωτικοί συντελεστές για την καθίζηση άκαμπτων πεδίων

2. Μέθοδοι Kany και Leonhardt :

$$\rho = f \frac{\Delta q B}{E_s} \quad \rho = f \frac{\Delta q R}{E_s} \quad E_s = \frac{(1-\nu')}{(1+\nu')(1-2\nu')} E'$$

Καθίζηση άκαμπτων ορθογωνικών / κυκλικών πεδίων υπό συνθήκες « $\nu = 0$ ».

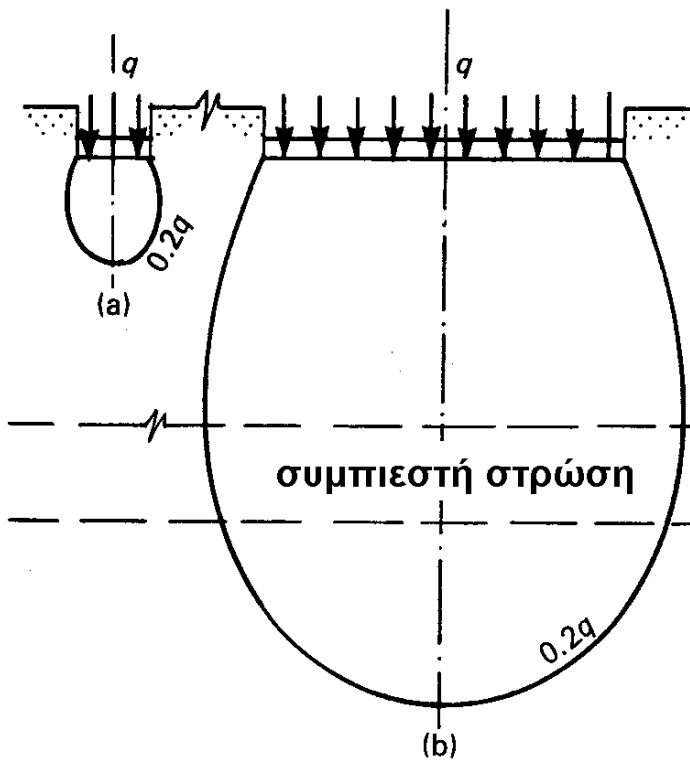
Μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει την καθίζηση του εδάφους κάτω από το πέδιλο «υπό συνθήκες συμπίεστρο». E_s = μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης.

3. Μέθοδοι Janbu και Butler :

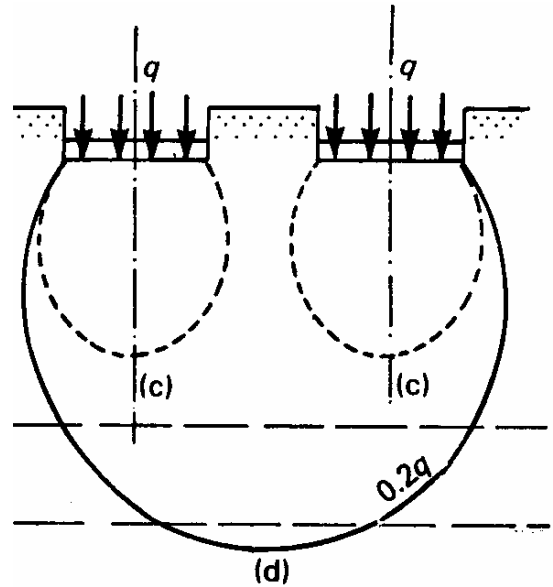
$$\rho_i = \mu_o \mu_1 \frac{\Delta q B}{E_u} \quad \rho_i = \frac{\Delta q B}{E_{uo}} I$$

Άμεση καθίζηση (υπό αστράγγιστες συνθήκες) άκαμπτων / εύκαμπτων ορθογωνικών πεδίων σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη (E_u = αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας)

ΠΡΟΣΟΧΗ : Επιρροή του εύρους της φορτιζόμενης επιφάνειας στο μέγεθος της καθίζησης στην περίπτωση ανομοιογενούς εδάφους



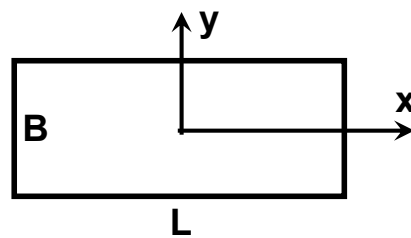
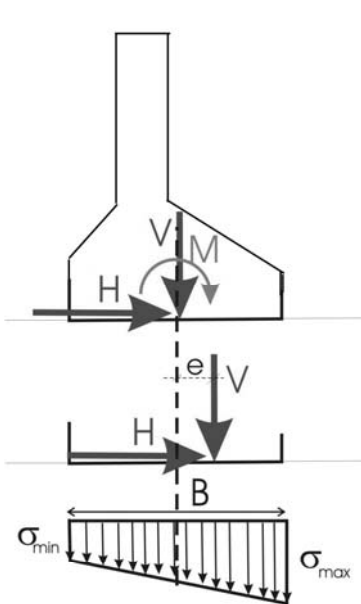
Τετραπλασιασμός του εύρους προκαλεί περισσότερο από τετραπλασιασμό της καθίζησης



Επαλληλία των δύο φορτίων προκαλεί περισσότερο από διπλασιασμό της καθίζησης

Παραμορφωσιμότητα άκαμπτων πεδίων σε ελαστικό έδαφος (κατά API)

Εάν ένα άκαμπτο ορθογωνικό πέδιλο διαστάσεων κατόψεως ($B, L > B$) φορτισθεί με εντατικά μεγέθη : V, H_x, H_y, M_x, M_y το κέντρο του θα μετακινηθεί κατά u_x, u_y και u_z και το πέδιλο θα στραφεί κατά θ_x, θ_y .



Με παραδοχή έδρασης του πεδίου επί ελαστικού εδάφους, οι αντίστοιχες δυσκαμψίες (δηλαδή οι σταθερές των ισοδύναμων ελατηρίων είναι :

Κατακόρυφο ελατήριο (κατά Steinbrenner) :

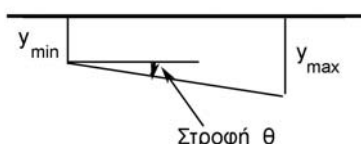
$$K_V = \frac{V}{u_z} = \frac{\Delta q B L}{\rho} = \frac{1}{(1 - \nu^2)} I_S I_D E L$$

Για τετραγωνικό πέδιλο εύρους B στην επιφάνεια ($I_D=1$) :

$$K_V = \frac{1}{(1 - \nu^2)} E B$$

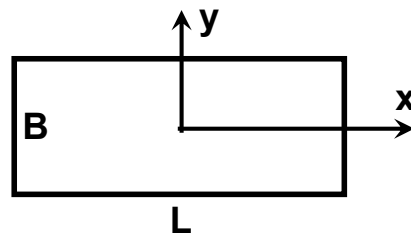
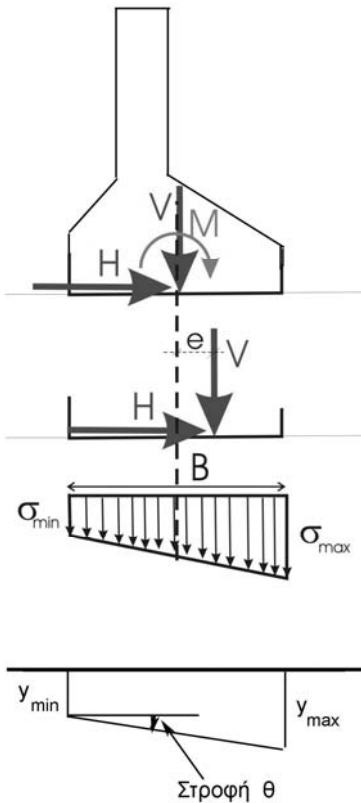
Οριζόντιο ελατήριο (κατά x και κατά y) :

$$K_H = \frac{H}{u} = \frac{9(1 - \nu)}{(1 + \nu)(7 - 8\nu)} E \sqrt{B L}$$



Παραμορφωσιμότητα άκαμπτων πεδίων σε ελαστικό έδαφος (κατά API)

Εάν ένα άκαμπτο ορθογωνικό πέδιλο διαστάσεων κατόψεως ($B, L > B$) φορτισθεί με εντατικά μεγέθη : V, H_x, H_y, M_x, M_y το κέντρο του θα μετακινηθεί κατά u_x, u_y και u_z και το πέδιλο θα στραφεί κατά θ_x, θ_y .



Με παραδοχή έδρασης του πεδίου επί ελαστικού εδάφους, οι αντίστοιχες δυσκαμψίες (δηλαδή οι σταθερές των ισοδύναμων ελατηρίων είναι :

Στροφικό ελατήριο (στροφή περί τον άξονα x) :

$$K_x = \frac{M_x}{\theta_x} = 0.078 \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(2.5 + 0.5 \frac{L}{B} \right) L B^2$$

και για λωριδωτό πέδιλο πλάτους B :

$$K_x = \frac{M_x / L}{\theta_x} = 0.194 \frac{E}{(1-\nu^2)} B^2$$

Στροφικό ελατήριο (στροφή περί τον άξονα y) :

$$K_y = \frac{M_y}{\theta_y} = 0.233 \frac{E}{(1-\nu^2)} L^{2.4} B^{0.6}$$