

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :

ΣΚΟΥΡΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΤΑΜΠΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΟΠΤΗΣ : ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους πολυαγαπημένους μας γονείς Δημήτριο και Βασιλική Σκούρα και Απόστολο και Ουρανία Ταμπακοπούλου, στον επόπτη καθηγητή μας κ. Σαραντόπουλο Ανδρέα και την κα. Όλγα Γαλάνη στην γραμματεία του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

Οι φοιτητές

Σκούρας Νικόλαος

Ταμπακόπουλος Παναγιώτης

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τις κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις που εμφανίζονται σε κατασκευές έργων υποδομής, γνωστές ως καθιζήσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα αστοχίας και λειτουργικότητας στις κατασκευές αυτές.

Πρωτίστως αναφέρονται οι κατηγορίες και τα αίτια των καθιζήσεων καθώς και οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν. Επιπλέον γίνεται αναφορά στη σπουδαιότητα της ανίχνευσης και παρακολούθησης του φαινομένου με σκοπό τον ακριβές προσδιορισμό και τη σωστή εκτίμηση των καθιζήσεων.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι τρόποι υπολογισμού των καθιζήσεων και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σχετικά με το τύπο του εδάφους, με την βοήθεια εμπειρικών σχέσεων και νομογραφημάτων και γίνεται η διάκριση των καθιζήσεων σε κατηγορίες ανάλογα με την περίπτωση.

Ακολουθούν αναφορές καθιζήσεων που έχουν συμβεί κατά καιρούς στον ελλαδικό χώρο εξηγώντας τα αίτια που οδηγούν στη συχνή εμφάνιση του φαινομένου στη χώρα μας.

Τέλος περιγράφονται οι εδαφικές υποχωρήσεις που αρχικά εμφανίζονται σε υπόγεια ανοίγματα μέσα στο έδαφος και στη συνέχεια προχωρούν μέχρι την επιφάνεια του εδάφους προκαλώντας βυθίσματα και προβλήματα στις κατασκευές.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	
Περίληψη.....	
Εισαγωγή.....	1

Κεφάλαιο 1^ο

Καθιζήσεις

1.1 Ορισμός καθιζησης.....	2
1.2 Κατηγορίες και αίτια καθιζήσεων.....	3
1.3 Μέθοδοι ανίχνευσης και υπολογισμού των καθιζήσεων.....	7
1.4 Επιπτώσεις – συνέπειες καθιζήσεων	12

Κεφάλαιο 2^ο

Εδαφικές παράμετροι

2.1 Φυσικές ιδιότητες εδαφών.....	13
2.1.1 Δείκτης πόρων e – πορώδες n	14
2.1.2 Περιεκτικότητα σε νερό % (υγρασία).....	14
2.2 Μηχανικές ιδιότητες εδαφών.....	14
2.2.1 Πλαστικότητα.....	15
2.2.2 Συνεκτικότητα.....	15
2.2.3 Διατμητική αντοχή τ	15
2.2.4 Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ	16

Κεφάλαιο 3^ο

Βασικές αρχές των καθιζήσεων

3.1 Καθίζηση εδαφικής στρώσης.....	17
------------------------------------	----

3.2 Παραδοχή ελαστικού εδάφους.....	19
3.2.1 Μέτρο ελαστικότητας E.....	19
3.2.2 Λόγος του Poisson ν	22
3.3 Μέθοδος Boussinesq για ελαστικά εδάφη.....	22

Κεφάλαιο 4^ο

Καθιζήσεις εδαφών

4.1 Καθίζηση ψαθυρών (αμμώδη) εδαφών.....	28
4.1.1 Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT).....	30
4.1.2 Δοκιμή διείσδυσης κώνου.....	32
4.1.3 Δοκιμή Πτερυγίου (FVT).....	35
4.1.4 Εμπειρική μέθοδος Schmertmann.....	36
4.2 Καθίζηση αργιλικών εδαφών.....	38
4.2.1 Άμεση (Ελαστική) Καθίζηση.....	40
4.2.1.1 Η μέθοδος Steinbrenner.....	42
4.2.1.2 Η μέθοδος Janbu – Bjerrum & Kjaernsli (1956).....	44
4.2.2 Πρωτογενής καθίζηση λόγω στερεοποίησης.....	45
4.2.2.1 Το φαινόμενο της κύριας στερεοποίησης.....	46
4.2.2.2 Θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης Terzaghi.....	49
4.2.2.3 Δοκιμή Οιδήμετρου του Terzaghi.....	50
4.2.2.4 Υπολογισμός καθίζησης σε κανονικά στερεοποιημένη κ υπερστερεοποιημένη άργιλο.....	56
4.2.2.5 Λόγος υπερστερεοποίησης OCR.....	57
4.2.2.6 Δείκτες συμπιεστότητας C_c και C_r	57
4.2.2.6.1 Δείκτης συμπιεστότητας C_c	57
4.2.2.6.2 Δείκτης συμπιεστότητας C_r	60
4.2.2.7 Δείκτης διόγκωσης C_s	61
4.2.2.8 Συντελεστής στερεοποίησης C_v	62

4.2.2.8.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του συντελεστή στερεοποίησης C_v	63
4.2.2.8.2 Η μέθοδος του λογάριθμου χρόνου (μέθοδος Casagrande).....	64
4.2.2.8.3 Η μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας χρόνου.....	65
4.2.2.9 Βαθμός στερεοποίησης $U(T_v)$	67
4.2.3 Δευτερογενής καθίζηση λόγω ερπυσμού.....	71
4.2.3.1 Δείκτης δευτερογενούς στερεοποίησης (συμπύεσης).....	74

Κεφάλαιο 5^ο

Αναφορές καθιζήσεων στον Ελλαδικό χώρο

5.1 Καθιζήσεις στο Ροπωτό Τρικάλων (23/02/2010).....	75
5.2 Καθίζηση στους Μουζακέους Ιωαννίνων (28/11/2010).....	77
5.3 Καθιζήσεις στο ορεινό της Ζαχάρως (08/02/2011).....	78
5.4 Καθιζήσεις στην εθνική οδό Σκάλα Λακωνίας (07/04/2011).....	78
5.5 Καθίζηση στην εθνική οδό Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας (10/03/2013).....	80
5.6 Καθίζηση στη Τσακώνα Αρκαδίας (07/02/2014).....	80
5.7 Καθίζηση στο δρόμο Μεγαλόπολης – Ακόβου (14/03/2014).....	81
5.8 Καθίζηση σε τμήμα της επαρχιακής οδού Πύργου – Οινόης (25/03/2104).....	82

Εισαγωγή

Η καθίζηση είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται στα τεχνικά έργα, το οποίο εμφανίζεται ιδιαίτερα και στον ελλαδικό χώρο και μπορεί να προκαλέσει μεγάλα προβλήματα στις κατασκευές.

Η κατασκευή ενός τεχνικού έργου προκαλεί την αύξηση των τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Στην αρχή, η επιφάνεια υποχωρεί περίπου γραμμικά, κάτω από την επίδραση του φορτίου, σε συνάρτηση και με τις τάσεις που αναπτύσσονται.

Οι καθιζήσεις αποτελούν συνάρτηση τόσο των αναπτυσσόμενων τάσεων, λόγω της επιβαλόμενης φόρτισης, όσο και των εδαφικών παραμέτρων. Η διαδικασία για τον υπολογισμό των καθιζήσεων αφορά τον προσδιορισμό των τάσεων στο έδαφος και στην συνέχεια (σύμφωνα και με τα εδαφικά χαρακτηριστικά) χρήση της κατάλληλης μεθοδολογίας προσδιορισμού των τιμών της καθίζησης.

Με βάση τα παραπάνω ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται οι καθιζήσεις, καθώς και το μέγεθος τους, είναι διαφορετικός στα αμμώδη εδάφη σε σχέση με τα αργιλικά.

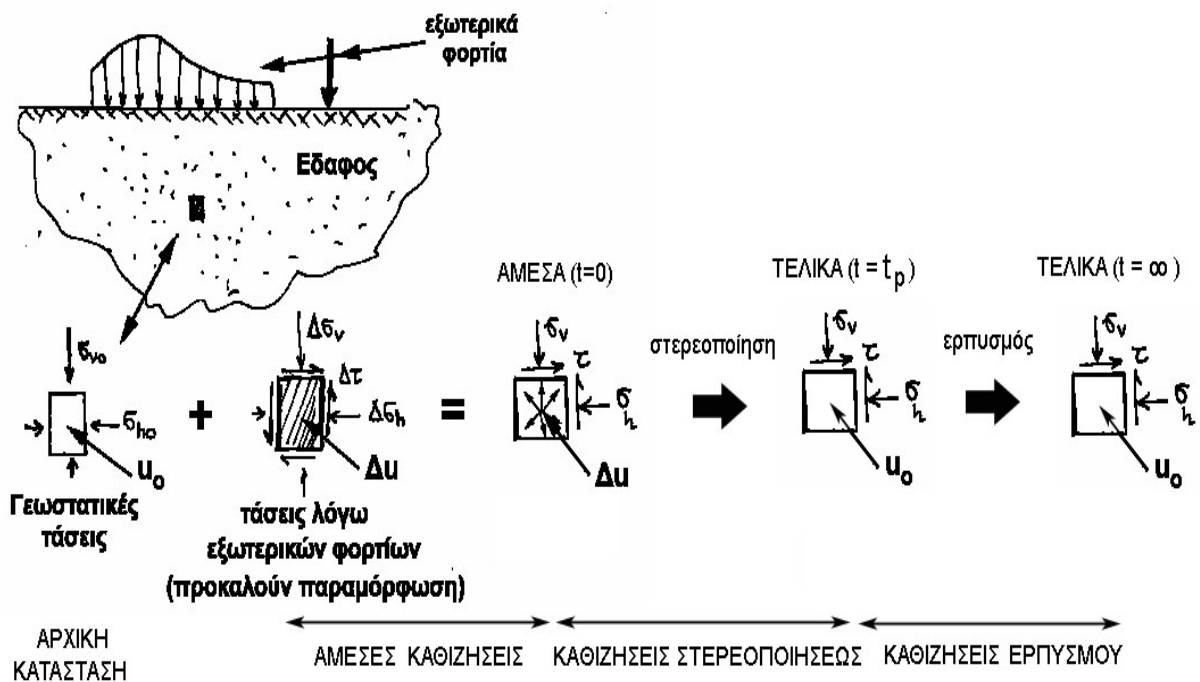
Κεφάλαιο 1^ο

Καθιζήσεις

1.1 Ορισμός Καθίζησης

Η καθίζηση ορίζεται ως το γεωλογικό φαινόμενο κατά το οποίο ένα τμήμα εδαφικής μάζας του στερεού φλοιού της γης μετατοπίζεται κατακόρυφα προς τα κάτω, ως προς μία επιφάνεια αναφοράς, όπως είναι η μέση στάθμη της θάλασσας.

Στα τεχνικά έργα η καθίζηση μπορεί να θεωρηθεί ως η υποχώρηση ή παραμόρφωση του εδάφους, που προκαλείται από το βάρος ενός τεχνικού έργου, που βρίσκεται πάνω σε αυτό. Είναι δηλαδή η συμπίεση του εδάφους, όταν το υπερκείμενο έργο υπερβεί την αντοχή του. Η υπερβολική καθίζηση προκαλεί την ρηγμάτωση ή ακόμη και την καταστροφή των κατασκευών.



Σχήμα 1.1 Η καθίζηση του εδάφους και οι συνιστώσες της

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι καθιζήσεις που οφείλονται στις πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) και τις υπερπίεσεις των πόρων (Δu) που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω της επιβολής φορτίων στην επιφάνεια του.

1.2 Κατηγορίες και αίτια καθιζήσεων

Τα είδη των καθιζήσεων ανάλογα με τους γεωλογικούς και γεωτεχνικούς παράγοντες, κατηγοριοποιούνται σε:

- *Γενικές ή ολικές καθιζήσεις.*
- *Διαφορικές καθιζήσεις.*

Γενικές ή ολικές καθιζήσεις, είναι εκείνες στις οποίες το έδαφος υποχωρεί ομοιόμορφα και «συμπαράσύρει» ομοιόμορφα και το υπερκείμενο έργο. Σε αυτή την περίπτωση, οι ρωγμές που δημιουργούνται, είναι συνήθως λίγες και μικρές.

Στις *διαφορικές καθιζήσεις*, το έδαφος υποχωρεί ανομοιόμορφα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνήθως πολλές και μεγάλες ρωγμές, με διαφορετική συνήθως κλίση και κατεύθυνση, προκαλώντας αύξηση των ροπών στα σημεία πακτώσεως του φορέα με δυνατή συνέπεια ακόμη και τη καταστροφή της κατασκευής. Τα άκαμπτα στοιχεία των κατασκευών και ειδικότερα οι τοίχοι, που δεν μπορούν να παρακολουθήσουν τις διαφορικές καθιζήσεις, είναι τα πρώτα που παρουσιάζουν ρηγματώσεις.

Η διαφορική καθίζηση παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από την γενική ή ολική καθίζηση. Εκφράζεται με τον λόγο των κατακόρυφων μετατοπίσεων προς την οριζόντια απόσταση ή σαν την διαφορά των καθιζήσεων μεταξύ δύο συνεχόμενων σημείων εδράσεως ενός έργου. Το μέγεθος της διαφορικής καθίζησης εξαρτάται από την ακαμψία του έργου και από τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Η τιμή της διαφορικής καθίζησης έχει σημασία για κάθε σημείο της κατασκευής και εξαρτάται από το ρυθμό εκτέλεσης του έργου και από τα φαινόμενα του ερπυσμού. Είναι πρακτικά αδύνατο να αποφύγουμε τις διαφορικές καθιζήσεις και πολύ δύσκολο να τις υπολογίσουμε με ακρίβεια.

Οι διαφορικές καθιζήσεις οφείλονται στα εξής αίτια:

α) Στην ανομοιογένεια του εδάφους και ειδικότερα στην ύπαρξη ασυνεχειών όπως είναι η παρουσία παλιού υπονόμου, τάφρου ή υπόγειου λατομείου.

β) Στην ανομοιόμορφη φόρτιση του εδάφους εξαιτίας της ειδικής μορφής της κατασκευής.

γ) Στο γεγονός ότι, σύμφωνα με τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου του Boussinesq, τα κεντρικά σημεία της φορτιζόμενης ζώνης βυθίζονται περισσότερο από τα περιφερειακά.

δ) Στην επίδραση των φορτίων, στατικών ή δυναμικών των παρακείμενων κατασκευών.

Οι καθιζήσεις μπορούν επίσης, να ταξινομηθούν ανάλογα και με τα αίτια που τις προκαλούν. Έτσι, διακρίνονται στις:

- *Φυσικές καθιζήσεις.*
- *Καθιζήσεις που προκαλούνται από τον άνθρωπο.*

Στην πρώτη περίπτωση, πιθανές αιτίες τέτοιου είδους καθιζήσεων μπορεί να είναι οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών, η ηφαιστειακή δραστηριότητα, οι σεισμικές δονήσεις και τέλος, η κατάρρευση υπόγειων στοών. Οι φυσικές καθιζήσεις παρατηρούνται πιο έντονα σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη σεισμική δραστηριότητα.

Όσον αφορά τις καθιζήσεις που οφείλονται στην ανθρώπινη δράση, εμφανίζονται κυρίως, λόγω της επιβολής μεγάλων δυναμικών ή στατικών φορτίσεων στην επιφάνεια του εδάφους μιας περιοχής, όπως είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος και η κατασκευή τεχνικών έργων (κτίρια, φράγματα, γέφυρες).

Ειδικότερα σε κατασκευές τεχνικών έργων, όπου παρατηρείται το εν λόγω φαινόμενο, οι καθιζήσεις μπορούν να διακριθούν επίσης σε:

- *Ενεργές καθιζήσεις.*
- *Παθητικές καθιζήσεις.*

Οι ενεργές καθιζήσεις οφείλονται στα φορτία της ίδιας της κατασκευής, ενώ οι παθητικές σε επιρροές που δεν έχουν σχέση με αυτήν.

Πιο συγκεκριμένα, οι *ενεργές καθιζήσεις* μπορεί να οφείλονται:

α) Στην ελαστική συμπίεση που προκαλείται από τα στατικά φορτία της κατασκευής.

β) Σε παραμένουσες παραμορφώσεις που προκαλούν τα στατικά ή δυναμικά φορτία της κατασκευής. Προέρχονται κυρίως από την συμπίεση ενός βράχου χαλαρής συναρμογής, από το κλείσιμο των ασυνεχειών ή από την έκθλιψη των υλικών πλήρωσης που περιέχονται στις ασυνέχειες και την διείδυση τους σε παρακείμενα ανοικτά ρήγματα ή όταν η δυνατότητα έκθλιψης τους δεν υπάρχει από την στερεοποίηση των υλικών πλήρωσης.

γ) Σε ερπυστικά φαινόμενα που προκαλούν τα φορτία της κατασκευής.

δ) Σε ολισθητικές κινήσεις κατά μήκος παρακείμενων γεωλογικών ασυνεχειών.

Οι παθητικές καθιζήσεις μπορεί να οφείλονται:

α) Σε ελαστικές παραμορφώσεις οι οποίες προκαλούνται από την εφαρμογή φορτίων στη γειτονική περιοχή. Αποφορτίσεις της γειτονικής περιοχής μπορεί να οδηγήσουν σε ανυψώσεις.

β) Σε παραμένουσες παραμορφώσεις εξαιτίας μεταβολών στη γειτονική περιοχή.

γ) Σε ερπυστικές ιδιοκινήσεις, ιδιαίτερα όταν η κατασκευή είναι θεμελιωμένη σε πρηνή.

δ) Σε ολισθητικές κινήσεις που δεν οφείλονται στη κατασκευή αλλά σε διαβρωτικά φαινόμενα του βραχώδους υπόβαθρου.

ε) Στις επιδράσεις δυναμικών φορτίων, για παράδειγμα κυκλοφοριακές δονήσεις, σεισμοί, ανατινάξεις σε κοντινά λατομεία.

στ) Στην είσοδο του νερού σε υλικά πλήρωσης με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση των παραμέτρων αντοχής των συνεχειών και ολισθητικές κινήσεις.

ζ) Σε μεταβολές όγκου, όπως για παράδειγμα εξαιτίας του ανυδρίτη σε γύψο ή εξαιτίας απορρόφησης ή απομάκρυνσης νερού από αργιλικά πετρώματα ή από υλικά πλήρωσης.

η) Στις διακυμάνσεις της στάθμης του φρέατιου ορίζοντα όπου οι αυξομειώσεις του ενεργού βάρους του βράχου που προκαλούν οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε παθητικές καθιζήσεις.

θ) Στις επιδράσεις του παγετού οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν παθητικές ανυψώσεις ή παθητικές καθιζήσεις.

ι) Σε επιδράσεις από παρακείμενα υπόγεια μεταλλεία.

κ) Στην διαλυτότητα του πετρώματος, για παράδειγμα τα καρστικά πετρώματα.

Μία επιπλέον κατηγοριοποίηση των καθιζήσεων είναι όσον αφορά τον χρόνο εμφάνισης και την συνολική διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Έτσι τις διακρίνουμε σε:

1. Άμεσες ή ελαστικές καθιζήσεις: Συμβαίνουν σε όλα τα ξηρά, υγρά ή κορεσμένα εδάφη που έχουν μεγάλη διαπερατότητα και παρατηρείται αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου. Οφείλονται στην ελαστική παραμόρφωση λόγω της σταδιακής αύξησης της τάσης των πόρων, χωρίς

την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας. Είναι αποτέλεσμα των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται και πραγματοποιείται για σταθερό όγκο, χωρίς την αποστράγγιση του νερού των πόρων. Το μέγεθος τους είναι συνήθως μικρό και αποτελεί την ολική καθίζηση σε ψαθυρά εδάφη και κορεσμένες ιλύες και αργίλους. Υπολογίζονται με σχέσεις από τη θεωρία ελαστικότητας.

2. Πρωτογενείς καθιζήσεις ή καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης: Συμβαίνουν στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη με μικρή διαπερατότητα σε αρκετό χρόνο μετά την επιβολή της φόρτισης και πραγματοποιείται βαθμιαία μετά το τέλος της αρχικής καθίζησης. Οφείλονται στην μεταβολή του δείκτη πόρων με την απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού, δηλαδή την στερεοποίηση. Η παρακολούθηση του φαινομένου γίνεται με τη μέτρηση της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων. Λόγω της μικρής διαπερατότητας των εδαφών αυτών, ο εκτοπισμός του νερού είναι μακροχρόνιος όπως μακροχρόνια είναι και η εξέλιξη των εν λόγω καθιζήσεων. Το φαινόμενο τελειώνει όταν η πίεση του νερού των πόρων εξισωθεί με τις υπάρχουσες οριακές υδραυλικές συνθήκες. Υπολογίζονται με βάση τη θεωρία στερεοποίησης.
3. Δευτερογενείς καθιζήσεις ή καθιζήσεις λόγω ερπυσμού. Συμβαίνουν στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη μετά το πέρας της στερεοποίησης και δεν έχει σχέση με τη μεταβολή της πίεσης των πόρων. Οφείλονται στην συνεχή αύξηση των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου υπό την επίδραση σταθερής τάσης, λόγω του φαινομένου του ερπυσμού στα εδάφη. Τα αίτια και ο μηχανισμός ανάπτυξης της δευτερογενούς καθίζησης ποικίλλει στα διάφορα εδάφη και οι καθιζήσεις αυτές μπορούν να εξελίσσονται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Μια επιπλέον αιτία των καθιζήσεων που αξίζει να σημειωθεί, ανάλογα και με το είδος του υπεδάφους, είναι οι καθιζήσεις που συμβαίνουν εξαιτίας του φαινομένου της *θιξοτροπίας*. Κατά το εν λόγω φαινόμενο, η κοκκώδης σύσταση και η παρουσία μεγάλου ποσοστού αργίλου στο υπέδαφος, προκαλούν διόγκωση της εδαφικής μάζας εξαιτίας της απορρόφησης νερού κατά τους χειμερινούς μήνες και απόμακρυνση του νερού και της περιεχόμενης υγρασίας κατά τους θερινούς μήνες. Οι εναλλαγές αυτές προκαλούν τη μετατροπή της αργίλου σε λεπτόκοκκο υλικό και αυξομειώσεις του όγκου της, με αποτέλεσμα την αποσάρθρωση του εδάφους θεμελίωσης και την εμφάνιση καθιζήσεων.

Άλλες αιτίες καθίζησης είναι η υδροσυμπύκνωση, η συρρίκνωση λόγω ξήρανσης, η αφυδάτωση οργανικών εδαφών και η αιολική διάβρωση.

1.3 Μέθοδοι ανίχνευσης και υπολογισμού των καθιζήσεων

Για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των επιφανειακών μετακινήσεων σε μία περιοχή ενδιαφέροντος, έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές μέθοδοι οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια:

1. Γεωτεχνικές μέθοδοι.

Στις γεωτεχνικές μεθόδους χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα γεωτεχνικά όργανα προκειμένου να διεξάγουν συμπεράσματα για την κινηματική συμπεριφορά των εδαφών και των τεχνικών έργων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και για την κατανόηση των γεωτεχνικών προβλημάτων κατά το σχεδιασμό και τη κατασκευή υπογείων έργων και έργων υποδομής. Είναι άμεσης χρήσης και υψηλής ακρίβειας (της τάξεως του δέκατου του χιλιοστού) και μπορούν να λαμβάνονται σε συνεχή βάση, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας της ηλεκτρονικής, στην οποία βασίζεται η λειτουργία των σύγχρονων οργάνων μέτρησης.

Ενδεικτικά, ορισμένα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται στις γεωτεχνικές μεθόδους, είναι τα παρακάτω:

- Το πιεζόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πίεσης του νερού.



Εικόνα 1.1 Πιεζόμετρο τύπου Casagrande

- Το κλισιόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης του εδάφους.



Εικόνα 1.2 Κλισιόμετρο

- Το κλινόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση των στροφών μιας κατασκευής.
- Το μηκυνσιόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση των μεταβολών του μήκους μεταξύ δύο σημείων.



Εικόνα 1.3 Μηκυνσιόμετρο

Η αξιοπιστία των γεωτεχνικών οργανομετρήσεων εξαρτάται φυσικά από την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας και συντήρησης των γεωτεχνικών οργάνων.

2. Γεωδαιτικές μέθοδοι.

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα περιλαμβάνουν κατά περίπτωση την ίδρυση και τη μέτρηση των οριζόντιων, κατακόρυφων ή τρισδιάστατων τοπικών γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου. Οι γεωδαιτικές μετρήσεις έχουν ακρίβεια της τάξης λίγων χιλιοστών και απαιτούν επεξεργασία για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τα οποία εν συνεχεία ελέγχονται. Ο προσδιορισμός της μεταβολής των συντεταγμένων στο χώρο, σε σημεία ελέγχου στο έδαφος ή σε κατασκευές τεχνικών έργων, είναι δυνατός με *επίγειες* ή *δορυφορικές* γεωδαιτικές μεθόδους.

➤ Επίγειες μέθοδοι: Στις επίγειες μεθόδους, μπορεί να γίνει ίδρυση τρισδιάστατων, οριζοντιογραφικών ή κατακόρυφου ελέγχου δικτύων στο σώμα της κατασκευής ή και στην ευρύτερη περιοχή. Είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση με σύγχρονους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, μόνιμα τοποθετημένων σημείων στο κύριο σώμα της κατασκευής, ενώ μπορεί να γίνει σάρωση της επιφάνειας με γαιωδαιτικούς σταθμούς που μετρούν μήκη χωρίς τη χρήση κάποιου ανακλαστήρα ή σαρωτών επιφάνειας (laser scanner). Συνήθως τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι:

- *Ειδικά βάθρα*, τα οποία φέρουν στην κεφαλή τους κατάλληλο κοχλία στον οποίο προσαρμόζεται κάθε φορά ο απαιτούμενος εξοπλισμός.



Εικόνα 1.4 Ειδικό βάθρο με προσαρμοσμένο κοχλία

- *Πλακέτες με προεξοχικό κοχλία, οι οποίες πακτώνονται στο σώμα της κατασκευής ή σε άλλη σταθερή θέση (π.χ τοίχοι αντιστήριξης)*



Εικόνα 1.5 Πλακέτα με προεξοχικό κοχλία

- *Ειδικές βάσεις πάκτωσης στο έδαφος και φορητοί στύλοι στήριξης των οργάνων.*



Εικόνα 1.6 Βάση πάκτωσης με φορητό στύλο στήριξης οργάνου

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια στην επιλογή της θέσης των κορυφών των επίγειων γαιωδεντικών δικτύων. Συγκεκριμένα, τα κυριότερα κριτήρια επιλογής τους, είναι:

- Κατάλληλες θέσεις ώστε να καλύπτουν και να εξασφαλίζουν την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς των κατασκευών και της ευρύτερης περιοχής.

- Εύκολη πρόσβαση ώστε να μπορεί να μεταφέρεται χωρίς δυσκολία ο γαιωδαιτικός εξοπλισμός.
 - Αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των κορυφών ώστε να μπορούν να πραγματοποιούνται οι απαραίτητες σκοπεύσεις.
 - Το σταθερό σημείο του δικτύου πρέπει να επιλέγεται σε τέτοια θέση, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία της κινηματικής συμπεριφοράς του, σε σχέση με τα υπόλοιπα.
- Δορυφορικές μέθοδοι: Στις δορυφορικές μεθόδους, οι γεωδαιτικές μετρήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας δέκτες GPS, μέσω του Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System), για τον προσδιορισμό των διανυσμάτων στο χώρο μεταξύ των κορυφών του τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου. Η σήμανση των σημείων αυτών μπορεί να γίνει με κατασκευές αντίστοιχες με τα επίγεια δίκτυα και είναι ανεξάρτητα από την αμοιβαία ορατότητα μεταξύ τους.



Εικόνα 1.7 Μόνιμοι σταθμοί GPS σε Θεσσαλονίκη και Αττική

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται και στην επιλογή της θέσης των κορυφών των δορυφορικού γεωδαιτικού δικτύου. Συγκεκριμένα, τα κυριότερα κριτήρια επιλογής τους, είναι να βρίσκονται σε χώρο με ανοικτό ορίζοντα γύρω τους ώστε να φαίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της ουράνιας σφαίρας και να μην επιλέγονται θέσεις κοντά σε φυσικά εμπόδια, τεχνητές κατασκευές, δέντρα κτλ.

1.4 Επιπτώσεις – συνέπειες καθιζήσεων

Στα τεχνικά έργα, παρατηρείται συνήθως, παραμόρφωση του συστήματος θεμελίωσης, κλίση ή ρωγμές στις κατασκευές και κατακόρυφες βυθίσεις. Επίσης, τα οδικά δίκτυα, τα φράγματα, τα δίκτυα υποδομής και γενικότερα, κάθε ανθρώπινη κατασκευή επηρεάζεται άμεσα από τις καθιζήσεις με την εμφάνιση ρωγμών ή ακόμη και με την ολοκληρωτική αστοχία τους.

Ως δευτερογενείς επιπτώσεις των καθιζήσεων, αναφέρεται η κατάκλυση του χώρου από νερά βροχόπτωσης ή από τα νερά που προέρχονται από την αποκάλυψη του υδροφόρου ορίζοντα και η εμφάνιση περιμετρικών ζωνών αστοχίας λόγω της διάρρηξης από τις εφελκυστικές τάσεις στα όρια. Επιπλέον, καταγράφεται μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών, αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού του υπόγειου υδροφορέα και τέλος, ελλοχεύει ο κίνδυνος πρόκλησης πλημμύρων σε αστικές περιοχές.

Οι επιπτώσεις των καθιζήσεων θεωρούνται αρκετά σοβαρές και επικίνδυνες καθώς μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές με ανυπολόγιστο κοινωνικό κόστος και να καταστραφούν οι υποδομές μιας περιοχής με μεγάλη οικονομική δαπάνη για την επισκευή τους. Έτσι η διαχρονική παρακολούθηση του φαινομένου, για την αποτροπή των παραπάνω κινδύνων, κρίνεται αναγκαία και εστιάζεται στον κατάλληλο σχεδιασμό και εφαρμογή των έργων υποδομής και την επέκταση των οικισμών σε περιοχές που δεν κινδυνεύουν από καθιζήσεις.

Κεφάλαιο 2^ο

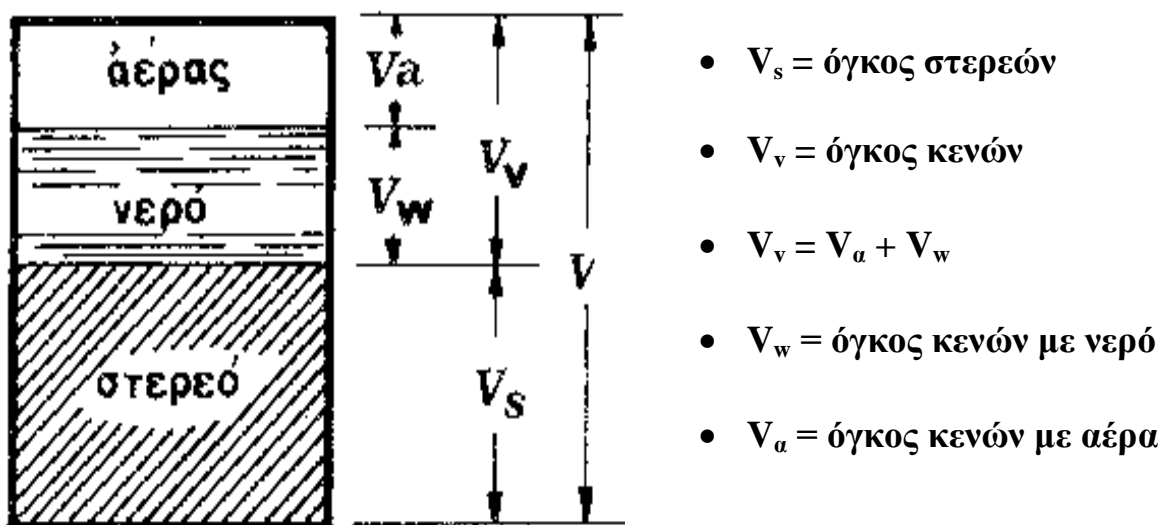
Εδαφικές παράμετροι

Οι εδαφικές παράμετροι διαχωρίζονται στις **φυσικές** και **μηχανικές** ιδιότητες των εδαφών. Οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες είναι ο *δείκτης πόρων*, οποίος συνδέεται με το *ολικό πορώδες* n , καθώς και η *υγρασία* του εδάφους ενώ οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες είναι η *πλαστικότητα*, η *συνεκτικότητα*, η *διατμητική αντοχή* τ και η *γωνία εσωτερικής τριβής* ϕ .

2.1 Φυσικές ιδιότητες εδαφών

Οι φυσικές ιδιότητες των εδαφών αναφέρονται στα μεγέθη που απαιτούνται για την αναγνώριση και τη ταξινόμηση και είναι απαραίτητα για τον πλήρη χαρακτηρισμό του εδάφους.

Το έδαφος είναι φυσικό υλικό που αποτελείται από τρεις φάσεις. Την *στερεά*, την *υγρή* και την *αέρια*. Επομένως ο αριθμός των φυσικών ιδιοτήτων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του είναι μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για τα άλλα υλικά (μέταλλο, ξύλο, σκυρόδεμα κ.λ.π.), που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές έργων υποδομής. Η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι επίσης απαραίτητη, όταν το έδαφος χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό (φράγματα, επιχώματα οδοποιίας κ.α.).



Σχήμα 2.1 Οι τρεις φάσεις του εδάφους

2.1.1 Δείκτης πόρων e – πορώδες n

- Ο δείκτης πόρων e ορίζεται ως ο λόγος του όγκου κενών προς τον όγκο στερεών. Επειδή θεωρείται ότι οι κόκκοι δεν παραμορφώνονται, η μεταβολή του δείκτη πόρων χαρακτηρίζει την παραμόρφωση του εδάφους.

- $e = \frac{V_v}{V_s}$

- $V_s = V - V_v$

- Το πορώδες n ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο κενών και στερεών.

- $n = \frac{V_v}{V_v + V_s}$

2.1.2 Περιεκτικότητα σε νερό % (υγρασία)

Η υγρασία ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του νερού προς το βάρος των στερεών συστατικών.

- $w = \frac{W_w}{W_s} (\%)$

2.2 Μηχανικές ιδιότητες εδαφών

Οι μηχανικές ιδιότητες δε συνδέονται άμεσα με τις φυσικές τους ιδιότητες. Υπάρχουν όμως εμπειρικές σχέσεις και νομογραφήματα που επιτρέπουν τον προσεγγιστικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους από τις φυσικές ιδιότητες.

2.2.1 Πλαστικότητα

Η *πλαστικότητα* είναι η ιδιότητα του εδάφους να παραμορφώνεται, όταν δέχεται την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων και κατά πόσο διατηρεί την παραμόρφωση αυτή, όταν οι δυνάμεις πάψουν να ενεργούν.

2.2.2 Συνεκτικότητα

Η *συνεκτικότητα* είναι η ιδιότητα του εδάφους που σχετίζεται με τη *συνοχή* (δυνάμεις μεταξύ ομοειδών μορίων) και τη *συνάφεια* (δυνάμεις μεταξύ ετεροειδών μορίων).

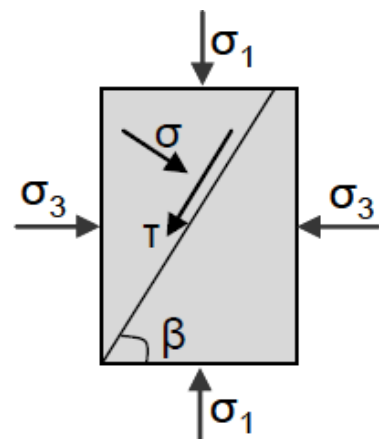
Ο βαθμός συνοχής εξαρτάται από τον αριθμό των μορίων και σχετίζεται με την *ειδική επιφάνεια*. Η ειδική επιφάνεια (επιφάνεια υλικού ανά μονάδα βάρους) εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος των κόκκων και το είδος των αργιλικών ορυκτών.

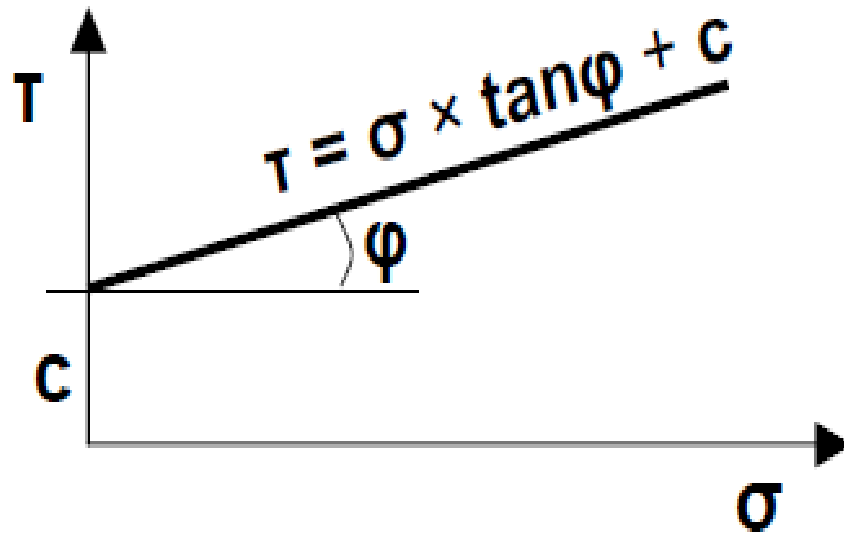
2.2.3 Διατμητική αντοχή τ

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών τα εδάφη αστοχούν διατμητικά. Η αντοχή (αντίσταση) που προβάλλει το έδαφος στη διάτμηση είναι λοιπόν η *διατμητική αντοχή τ* και οφείλεται στην αντίσταση (τριβή) από την μετακίνηση των κόκκων του εδάφους και στην αντίσταση των δυνάμεων συνοχής που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Η αντοχή αυτή ορίζεται από τη σχέση Coulomb:

$$\tau = \sigma * \tan\varphi + c, \quad \text{όπου:}$$

- τ , η διατμητική αντοχή
- σ , η ορθή τάση
- φ , η γωνία τριβής του εδάφους
- c , η συνοχή του εδάφους





Σχήμα 2.2 Διάγραμμα διατμητικών - ορθών τάσεων

2.2.4 Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ

Η γωνία τριβής ϕ , εκφράζει την αντίσταση στην ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Η γνώση της τιμής της γωνίας ϕ είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την μελέτη της αντοχής των εδαφών. Αποτελεί το μοναδικό μέγεθος που θεωρητικά χαρακτηρίζει την αντοχή των ψαθυρών εδαφών και είναι ένα από τα δύο μεγέθη που χαρακτηρίζουν την αντοχή των συνεκτικών εδαφών.

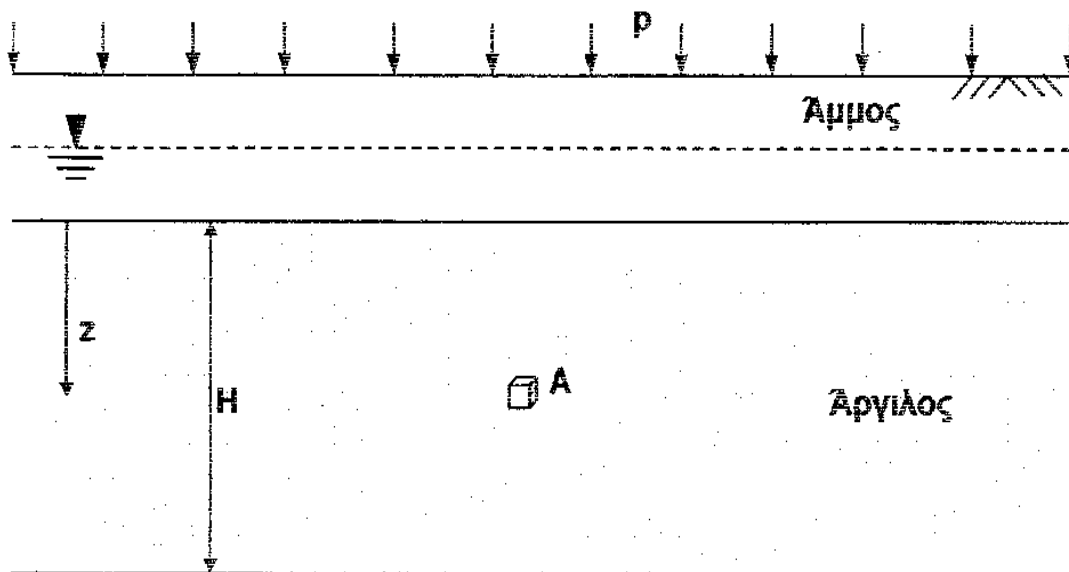
Κεφάλαιο 3^ο

Βασικές αρχές των καθιζήσεων

3.1 Καθίζηση εδαφικής στρώσης

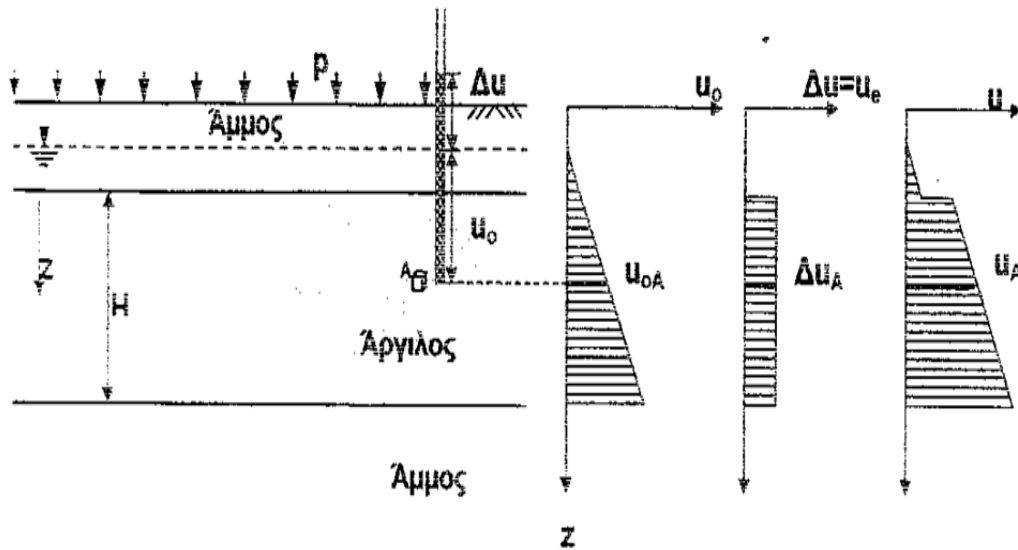
Ας θεωρήσουμε ότι μια κορεσμένη εδαφική στρώση δέχεται αύξηση της κατακόρυφης τάσης κατά $\Delta\sigma = p$. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα με την κατασκευή ενός τεχνικού έργου ή ενός επιχώματος.

Με την επιβολή του φορτίου οι στερεοί κόκκοι προσπαθούν να έρθουν πιο κοντά ο ένας στον άλλον. Αν η εδαφική στρώση έχει μεγάλη διαπερατότητα, όπως συμβαίνει στα αμμώδη και γενικά στα χονδρόκοκα εδάφη, αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου το νερό διαφεύγει από τους πόρους και η καθίζηση συμβαίνει άμεσα λόγω της μείωσης του όγκου της εδαφικής στρώσης.



Σχήμα 3.1 Εξωτερική επιβολή φορτίου σε εδαφική στρώση

Αν η εδαφική στρώση έχει μικρή διαπερατότητα το νερό δεν θα μπορέσει να διαφύγει και επειδή είναι πρακτικά ασυμπίεστο οι κόκκοι δεν μπορούν να πλησιάσουν ο ένας τον άλλον. Όλη την αύξηση της κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma$ την παραλαμβάνει το νερό των πόρων με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πίεση του πάνω από την υδροστατική κατά $\Delta u = \Delta\sigma = p$ (υπερπίεση του νερού των πόρων).



Σχήμα 3.2 Μεταβολή της υδροστατικής πίεσης αργίλου μετά από επιβολή φορτίου

Κάτω από την αύξηση αυτής της πίεσης έχουμε δημιουργία υδραυλικού φορτίου το οποίο προκαλεί ροή νερού προς τα άκρα του εδαφικού στρώματος. Η ροή αυτή καλείται *στράγγιση* και συνεχίζεται μέχρις ότου η πίεση του νερού των πόρων επανέλθει στην αρχική της τιμή. Η διαδικασία αυτή της επαναφοράς της πίεσης στην αρχική της τιμή συνήθως καλείται *εκτόνωση*.

Όταν η στράγγιση βρίσκεται σε εξέλιξη και το νερό διαφεύγει, οι στερεοί κόκκοι μπορούν πλέον να κινηθούν κοντύτερα ο ένας στον άλλον με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι δυνάμεις μεταξύ τους. Οι δυνάμεις μεταξύ των κόκκων εκφράζονται με την *ενεργό τάση* σ' .

Η *ενεργός τάση*, σε ένα σημείο του εδάφους κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, είναι ίση με τη διαφορά της ολικής τάσης σ (όπως θα υπολογίζονταν εάν δεν υπήρχε νερό) και την πίεση του νερού των πόρων u .

$$\sigma' = \sigma - u$$

Επομένως έχουμε προοδευτική αύξηση της ενεργού τάσης με ταυτόχρονη μείωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων. Όταν το φαινόμενο της στράγγισης θα έχει τελειώσει και η υπερπίεση θα έχει μηδενιστεί ($\Delta u = 0$), οι στερεοί κόκκοι θα έχουν παραλάβει επιπλέον την αύξηση του φορτίου $\Delta \sigma' = p$, οπότε η ενεργός τάση θα ισούται πλέον με την αρχική της τιμή συν την αύξηση της κατακόρυφης τάσης $\Delta \sigma$. Η διαδικασία αυτή της αποστράγγισης είναι αργή, συνοδεύεται από τη μείωση του πάχους της εδαφικής στρώσης δηλαδή από την καθίζηση και καλείται *στερεοποίηση*.

Οι καθιζήσεις του εδάφους οφείλονται στην ενεργό τάση και όχι στην ολική τάση.

3.2 Παραδοχή ελαστικού εδάφους

Υπάρχουν περιπτώσεις που δεχόμαστε ότι το έδαφος συμπεριφέρεται, για ότι αφορά τις καθιζήσεις, σαν ελαστικό σώμα και έχει την ικανότητα να παραμορφώνεται ευθέως προς την τάση που ασκείται πάνω σε αυτό. Οι παραδοχές της ελαστικής θεωρίας είναι ότι το υλικό θεμελίωσης είναι ισότροπο και ομογενές.

Οι ελαστικές ιδιότητες των εδαφών αυτών εκφράζονται από δύο συντελεστές ελαστικότητας, το *Μέτρο Ελαστικότητας* E και τον *Λόγο του Poisson* ν , οι οποίοι χαρακτηρίζουν τη φυσική κατάσταση και τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

➤ Το μέτρο ελαστικότητας: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

- σ , η τάση.
- ε , η αντίστοιχη παραμόρφωση κατά την διεύθυνση της τάσης.

➤ Ο λόγος του Poisson: $\nu = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon}$

- ε_e , η εγκάρσια παραμόρφωση (κάθετα προς την διεύθυνση της τάσης).
- ε , η αξονική παραμόρφωση (παράλληλη με τη διεύθυνση της τάσης).

3.2.1 Μέτρο ελαστικότητας E

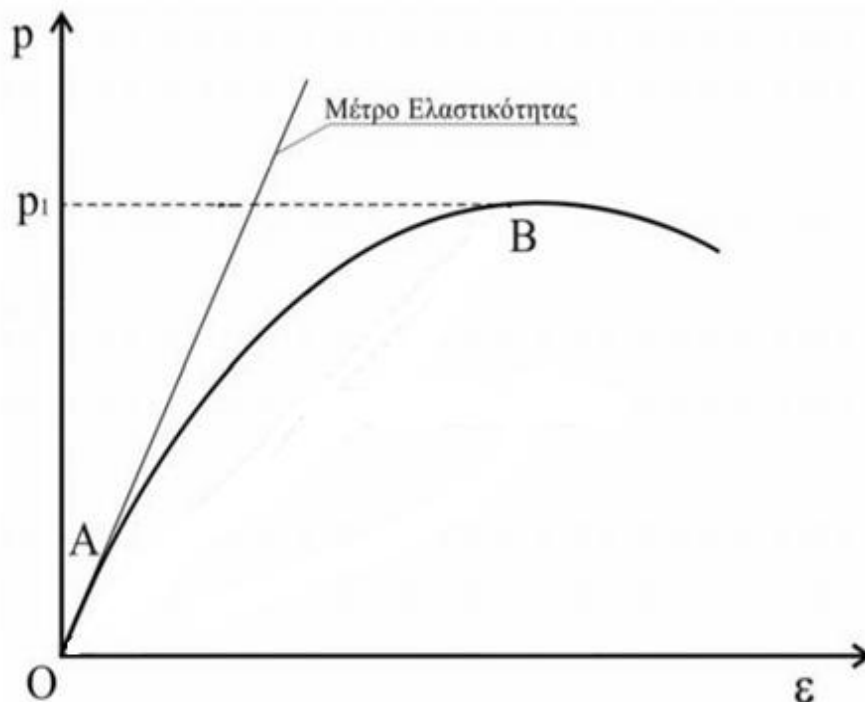
Το *Μέτρο Ελαστικότητας* E , αποτελεί έναν από τους συντελεστές της ελαστικής παραμόρφωσης του εδάφους. Εξ ορισμού το μέτρο ελαστικότητας, ενός ισότροπου ομοιογενούς υλικού, δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα, την μορφή και την σκληρότητα των κόκκων.

Κατά την επιβολή συνήθων μεγεθών φορτίων και για το σύνολο σχεδόν όλων των εδαφών, οι παραμορφώσεις αυτών είναι ελαστοπλαστικές και όχι απολύτως ελαστικές.

Το μέτρο ελαστικότητας E μπορεί να προσδιορισθεί γραφικά από την κλίση της εφαπτόμενης στη καμπύλη φόρτισης – παραμόρφωσης, εντός της ελαστικής περιοχής (από την κλίση της εφαπτόμενης OA).



Σχήμα 3.3 Γραφική παράσταση του μέτρου ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας E έχει σταθερή τιμή προς όλες τις διευθύνσεις μόνο στα ισότροπα εδαφικά υλικά. Όταν η τιμή του E είναι μεγάλη, η παραμόρφωση που θα προκληθεί θα είναι μικρή (για δεδομένη τιμή τάσης) και το εδαφικό υλικό θα παρουσιαστεί με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Επειδή η πειραματική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων του εδάφους δεν είναι γραμμική, λόγω ότι τα εδάφη ως φυσικά υλικά αναπτύσσουν μη γραμμική συμπεριφορά και επειδή ούτε μετά την αποφόρτιση το σώμα επανέρχεται στην αρχική του θέση, το έδαφος δεν είναι ελαστικό και δεν είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός του E .

Είναι πιο απλό να γίνεται ο υπολογισμός του E με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων. Τέτοιες σχέσεις συνδέουν την τιμή του E με διάφορα μεγέθη που προσδιορίζονται επί τόπου με τη δοκιμή της πλάκας φορτίσεως, το ολλανδικό πενετρόμετρο, το πρεσσιόμετρο ή με άλλους τρόπους.



Εικόνα 3.1 Δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας

Χαρακτηριστικές τιμές του E σε Kg / cm^2 είναι:

Χαλαρή άμμος	100 – 250
Πυκνή άμμος	500 – 1000
Αμμοχάλικο	1000 – 3000
Μαλακή άργιλος	30 – 90
Σκληρή άργιλος	100 – 250

3.2.2 Λόγος του Poisson ν

Ο Λόγος του Poisson καλείται ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης προς την αξονική, στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων και δίνεται από την σχέση:

$$\nu = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon}$$

Η τιμή του λόγου του Poisson είναι ακόμα πιο δύσκολο να προσδιοριστεί και συνήθως δεν χρειάζεται για τους συνήθεις υπολογισμούς κατασκευών από σκυρόδεμα. Για αυτό το λόγο ορίζεται περισσότερο ή λιγότερο αυθαίρετα.

Όταν δεν υπάρχει μεταβολή όγκου για ένα κορεσμένο έδαφος, χωρίς στερεοποίηση και για την κρίσιμη κατάσταση, έχουμε $\nu = 0,50$. Για τις άλλες περιπτώσεις λαμβάνουμε μια μέση τιμή για $\nu = 0,30$.

Κατηγορία εδάφους	Λόγος του Poisson ν
Κορεσμένη άργιλος	0,4 – 0,5
Μη κορεσμένη άργιλος	0,1 – 0,3
Αμμώδης άργιλος	0,2 – 0,3
Πυκνή άμμος	0,2 – 0,4
Βράχος	0,1 – 0,4 (ανάλογα το είδος του βράχου)

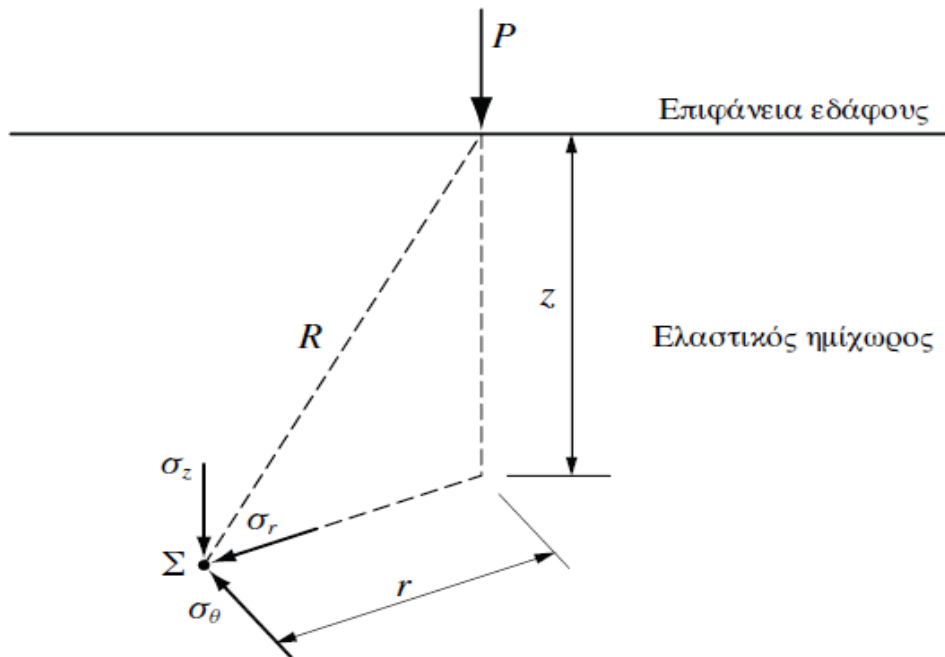
Πίνακας 3.1 Τιμές του Λόγου του Poisson για κατηγορίες εδάφους

3.3 Μέθοδος Boussinesq για ελαστικά εδάφη

Η ιδέα της προσέγγισης του εδάφους ως ένα εξιδανικευμένο ελαστικό μέσο αποδίδεται στον Boussinesq. Εν έτει 1885 η θεωρία του Boussinesq έδωσε την πρώτη ολοκληρωμένη λύση στη μελέτη των κατακόρυφων μετατοπίσεων υπό σημειακή και κατανεμημένη φόρτιση σε ελαστικά μέσα.

Ο Boussinesq ερεύνησε την απόκριση ενός ημιάπειρου, ομοιογενούς, ισότροπου και γραμμικά ελαστικού συνεχούς μέσου που υπόκειται στη δράση

ενός συγκεντρωμένου φορτίου που ασκείται κάθετα στην οριακή επιφάνεια του. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ελαστικότητας κατέληξε σε αναλυτικές σχέσεις για τις τάσεις, τις παραμορφώσεις και τις μετακινήσεις σε τυχαίο σημείο του ελαστικού ημιχώρου.



Σχήμα 3.4 Οι τάσεις στον ελαστικό ημιχώρο

Η αρχική αυτή προσέγγιση αντιμετωπίζει το έδαφος και στις τρεις διαστάσεις του. Αργότερα όμως, οι διάφορες λύσεις που παρουσιάστηκαν επικεντρώθηκαν στην εύρεση της κατανομής των κατακόρυφων βυθίσεων στην επιφάνεια επαφής μεταξύ της πλάκας και ελαστικού ημιχώρου, περιορίζοντας έτσι το πρόβλημα στις δύο διαστάσεις.

Ο Boussinesq διερεύνησε την εντατική, παραμορφωσιακή και μετακινησιακή κατάσταση που αναπτύσσεται εντός ενός ελαστικού ημιχώρου λόγω ενός κατακόρυφου συγκεντρωμένου φορτίου που ασκείται στην οριακή επιφάνεια του. Για τον ελαστικό αυτό ημιχώρο έγινε η παραδοχή ότι αποτελείται από ένα ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό υλικό.

Ο Boussinesq χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της θεωρίας της ελαστικότητας, κατέληξε στις ακόλουθες σχέσεις για την κατανομή των τάσεων εντός του ελαστικού ημιχώρου:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5}$$

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

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

$$\tau_{rz} = \frac{3Prz^2}{2\pi R^5}$$

- $R^2 = r^2 + z^2$
- ν , ο λόγος του Poisson του υλικού του ελαστικού ημιχώρου.

Μέσω του γραμμικού νόμου του Hooke, από τις ανωτέρω τάσεις υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις στο τυχαίο σημείο και με κατάλληλη άθροιση αυτών προέκυψαν οι ακόλουθες σχέσεις για τη κατακόρυφη και την οριζόντια μετακίνηση του τυχαίου σημείου του ελαστικού ημιχώρου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει μόνο η κατακόρυφη μετατόπιση.

Στην περίπτωση ενός σημειακού φορτίου P οι σχέσεις που προκύπτουν είναι:

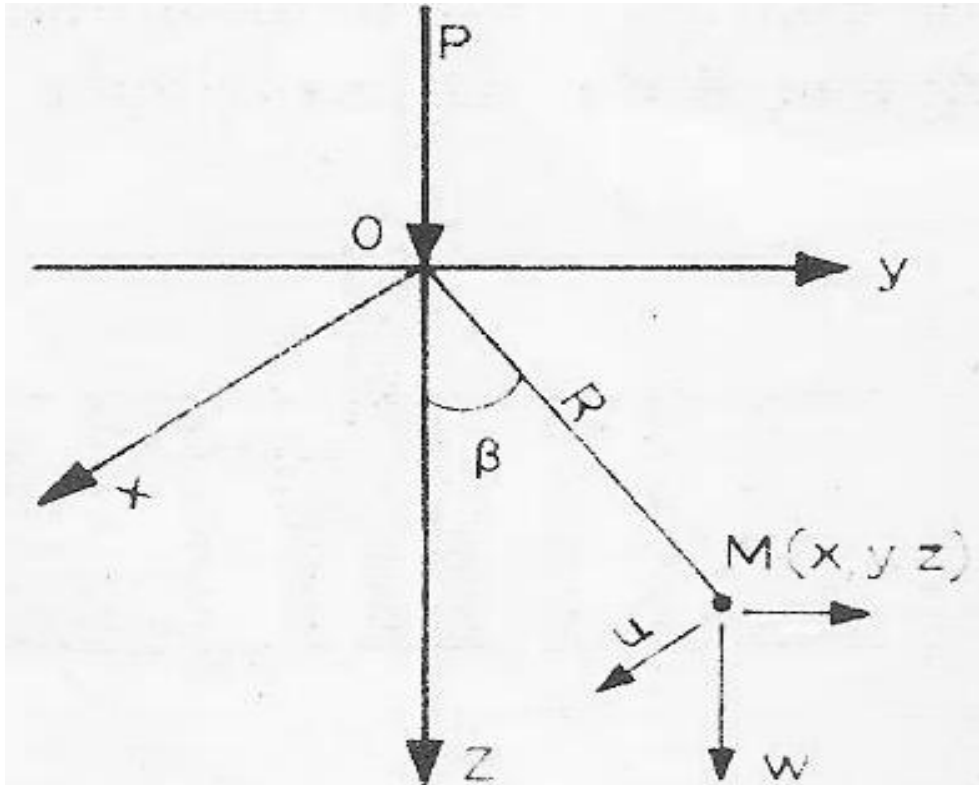
$$u = P \frac{1+\nu}{2\pi E} \left[\frac{xz}{R^3} - \frac{(1-2\nu)x}{R(R+z)} \right]$$

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

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

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του ελαστικού ημιχώρου.

Στο σημείο εφαρμογής οι μετατοπίσεις παίρνουν την ακαθόριστη τιμή $\frac{0}{0}$ και οι σχέσεις δεν μπορούν χρησιμοποιηθούν με την παραπάνω μορφή.



Σχήμα 3.5 Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις σημειακής φόρτισης P

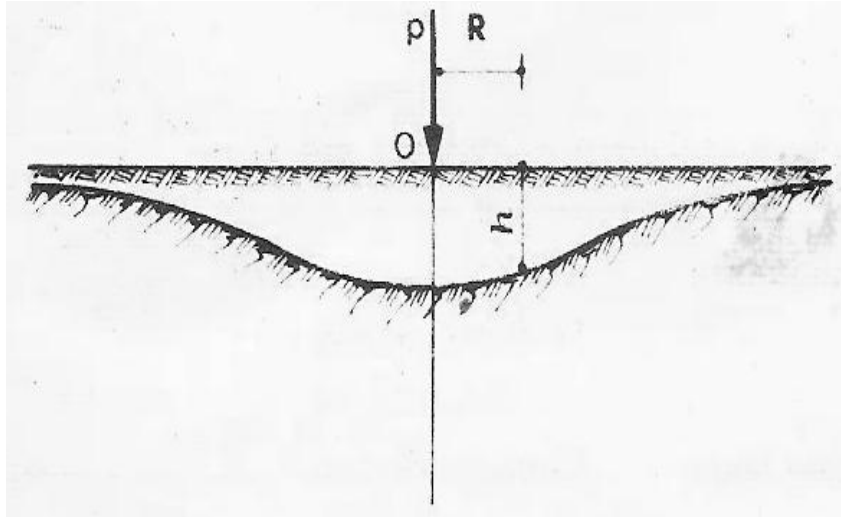
Αν χρησιμοποιηθεί σαν μεταβλητή η γωνία β του τριγώνου (ZOM) η τελευταία εξίσωση γράφεται:

$$W = \frac{P}{4\pi GR} \sin\beta(2 - 2\nu + \cos^2\beta), \quad \text{με} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Η καθίζηση της ελεύθερης επιφάνειας που αντιστοιχεί σε γωνία $\beta = \frac{\pi}{2}$ δίνεται από την σχέση:

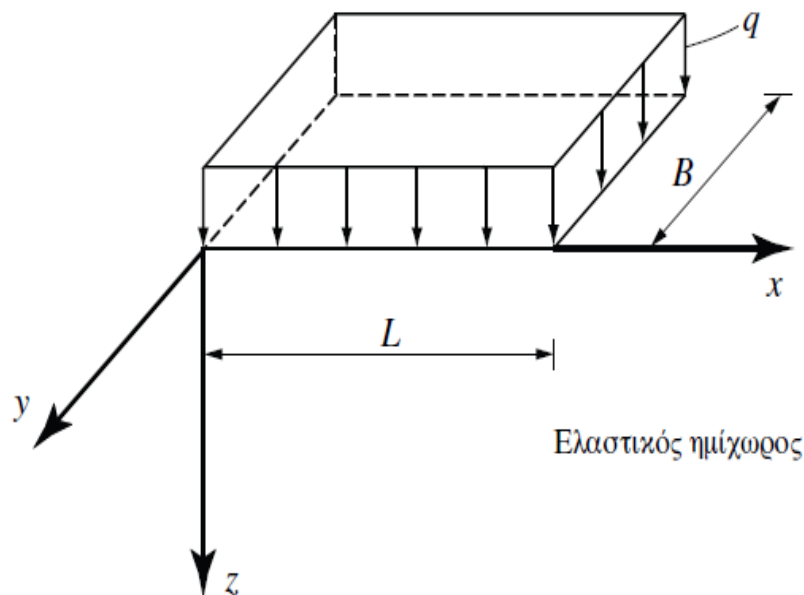
$$w = \frac{1 - \nu}{2\pi GR}$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ένα σημειακό φορτίο προκαλεί καθιζήσεις του εδάφους σε όλη την επιφάνεια. Αλλά πέρα από μία απόσταση η καθίζηση είναι αμελητέα.



Σχήμα 3.6 Καθίζηση σε βάθος h μετά από επιβολή σημειακής φόρτισης P

Στην περίπτωση μιας ομοιόμορφα φορτισμένης επιφάνειας η καθίζηση είναι σταθερή σε όλη την την επιφάνεια φόρτισης. Η μέγιστη καθίζηση παρατηρείται στο κέντρο της διατομής.



Σχήμα 3.7 Ο ελαστικός ημίχωρος σε περίπτωση ομοιόμορφης φόρτισης

Η καθίζηση συνεπώς, σύμφωνα με τη θεωρία του Boussinesq είναι ανάλογη της πίεσης και αντιστρόφως ανάλογη με το μέτρο ελαστικότητας. Αποτελεί μια μαθηματική θεωρία που δίνει ικανοποιητικές τιμές, με εύχρηστους τύπους και νομογραφήματα.

Κεφάλαιο 4^ο

Καθιζήσεις εδαφών

Τα εδάφη διακρίνονται σε **συνεκτικά** και **μη συνεκτικά**. Τα μη συνεκτικά εδάφη χαρακτηρίζονται από την απουσία ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων τους, ενώ αντίθετα στα συνεκτικά εδάφη μεταξύ των εδαφικών κόκκων αναπτύσσονται δυνάμεις συνοχής. Στα συνεκτικά εδάφη ανήκουν τα *αργιλικά εδάφη* ενώ στα μη συνεκτικά τα *ψαθυρά (αμμώδη) εδάφη*.

Ανάλογα με την κάθε περίπτωση εφαρμογής, η εκτίμηση των καθιζήσεων εντάσσεται σε δύο κυρίως κατηγορίες:

1. *Άμεσης εκτίμησης των καθιζήσεων*. Όπως είναι η εμπειρική μέθοδος Meyerhof (1965), η εμπειρική μέθοδος Terzaghi – Peck (1967), η εμπειρική μέθοδος Peck – Hanson – Thornburn (1974) και η εμπειρική μέθοδος Burland – Burbigde (1984), μέθοδοι που βασίζονται στη δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT).
2. *Εκτίμηση των καθιζήσεων με τύπους ελαστικής μορφής*. Όπου οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας E , προσδιορίζονται από τη δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT), τη δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT) ή από εργαστηριακές δοκιμές όπως είναι η εμπειρική μέθοδος Schultze – Manzenbach (1961), η εμπειρική μέθοδος Schmertmann (1970), η εμπειρική μέθοδος Tassios – Anagnostopoulos (1974) και η εμπειρική μέθοδος Anagnostopoulos και Papadopoulos (1987).

Η απλή σχέση που χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό των καθιζήσεων ορθογωνικών ή κυκλικών θεμελίων τα οποία εδράζονται πάνω σε ομοιόμορφο ψαθυρό ή συνεκτικό έδαφος, είναι η εξής:

$$\Delta H_e = \frac{PB(I - \nu^2)}{E_s} I$$

- ΔH_e , η άμεση καθίζηση
- P , η ομοιόμορφη τάση που ασκείται στο έδαφος
- B , η μικρότερη διάσταση του θεμελίου

- E_s , το μέτρο συμπίεσης του εδάφους
- ν , ο λόγος Poisson
- I , συντελεστής εξαρτώμενος από τα γεωμετρικά δεδομένα

**Γεωμετρικά δεδομένα:* Όπως το σχήμα της κάτοψης του θεμελίου, η θέση του σημείου που υπολογίζεται η καθίζηση και το πάχος συμπιεστού εδάφους.

4.1 Καθίζηση ψαθυρών (αμμώδη) εδαφών

Τα ψαθυρά εδάφη (μη συνεκτικά) είναι χονδρόκοκα με ογκώδεις κόκκους μεγέθους λίθου ή χαλικιού ή άμμου και είναι περίπου στρογγυλοί ή γωνιώδεις. Έχουν χαμηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο (ειδική επιφάνεια) και παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα. Οι κόκκοι συγκρατούνται μεταξύ τους με δυνάμεις βαρύτητας και η αντοχή τους εξαρτάται από την εσωτερική τριβή των κόκκων, χαρακτηριστικά από την γωνία ϕ . Η μηχανική τους συμπεριφορά δεν εξαρτάται από την παρουσία νερού στο έδαφος και παρουσιάζουν άμεσες (ελαστικές) καθιζήσεις.

Η καθίζηση των ψαθυρών εδαφών είναι περιορισμένη και πραγματοποιείται μέσα σε λίγο χρονικό διάστημα, αμέσως μετά και κατά τη διάρκεια εφαρμογής των φορτίων, λόγω της μεγάλης διαπερατότητας των εδαφών αυτών. Πρακτικά ολοκληρώνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου και περνά κατά το πλείστο απαράτηρητη.

Στα ψαθυρά εδάφη, η άμεση καθίζηση είναι και μόνη που παρατηρείται γιατί τα εδάφη αυτά δεν συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού, έχουν χαμηλό δείκτη πόρων και είναι σχετικά ασυμπίεστα. Οι καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης και οι ερπυστικές καθιζήσεις στα εδάφη αυτά συνήθως αποτελούν αμελητέο ποσοστό. Αυτό συμβαίνει γιατί η καθίζηση λόγω στερεοποίησης ενσωματώνεται στην άμεση καθίζηση εξαιτίας της γρήγορης αποτόνωσης των υπερπίεσεων πόρων στα εδάφη αυτά και οι ερπυστικές καθιζήσεις είναι σχεδόν αμελητέες.



Εικόνα 4.1 Αμμώδες έδαφος

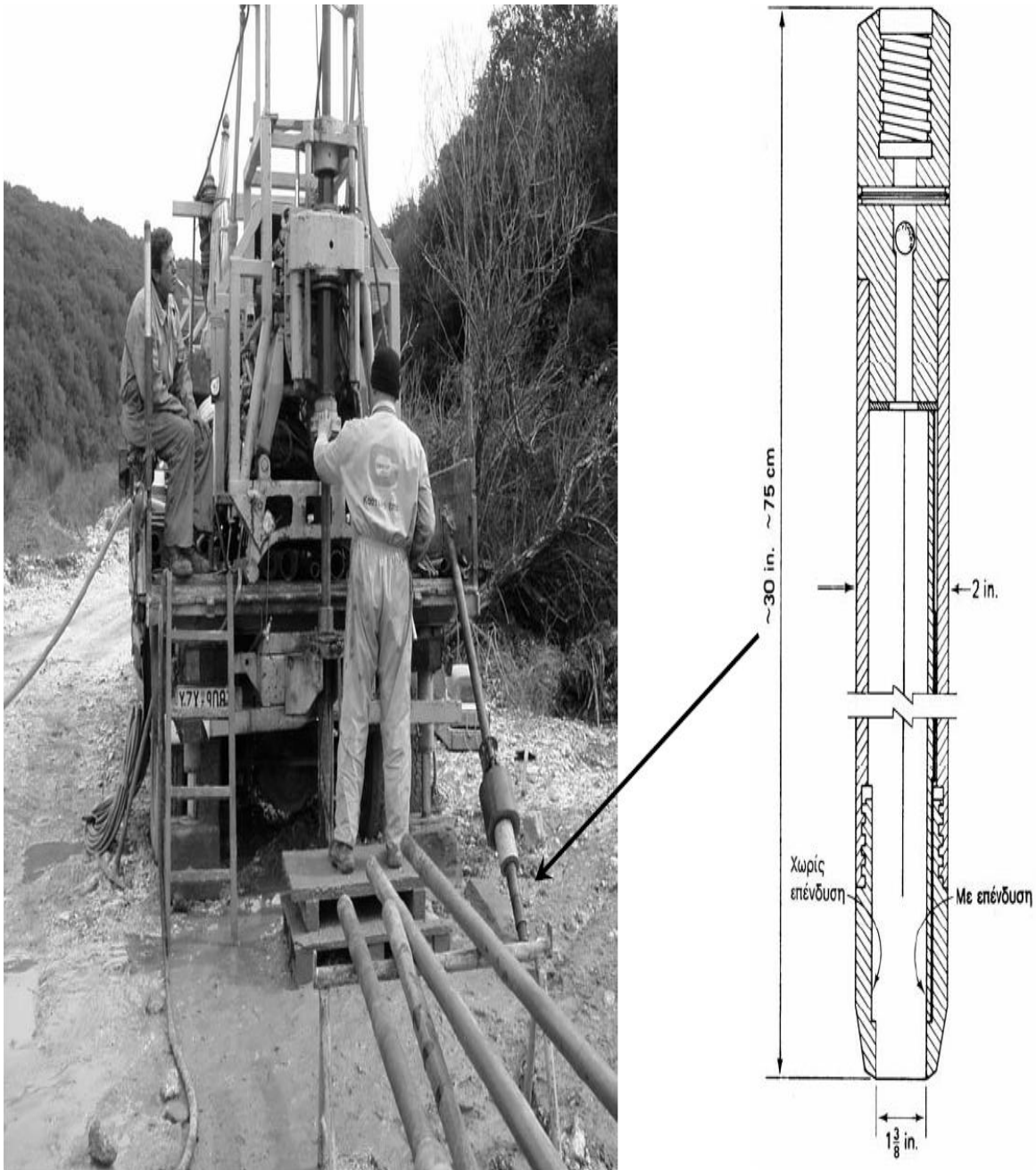
Οι άμεσες καθιζήσεις στα μη συνεκτικά εδάφη οφείλονται στην αναδιάταξη των εδαφικών κόκκων, λόγω της επιβολής των φορτίων, με παράλληλη μείωση του πορώδους. Συνήθως έχουν μικρό μέγεθος, σε σύγκριση με τις καθιζήσεις σε αργιλικά εδάφη και είναι πρακτικώς ανελαστικές (με την αφαίρεση της φόρτισης ένα πολύ μικρό ποσοστό του εδάφους επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση). Επηρεάζονται από την έντονα μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών αυτών και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται από την επιβαλλόμενη φόρτιση (αυξάνεται με την συμπίεση). Συνεπώς οι σχέσεις ελαστικότητας έχουν αρκετά περιορισμένη εφαρμογή.

Η μελέτη της καθίζησης στα ψαθυρά εδάφη δεν είναι εύκολη γιατί τα εδάφη αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν ούτε ελαστικά ούτε ισότροπα ούτε και ομοιογενή. Συνήθως το πρόβλημα της καθίζησης αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων και μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για αυτά τα εδάφη και βασίζονται σε δεδομένα επί τόπου δοκιμών, όπως είναι η δοκιμή *Πρότυπης Διείσδυσης* (SPT), η δοκιμή *Διείσδυσης Κώνου* (CPT), η δοκιμή Πτερυγίου (FVT), η δοκιμή *Φόρτισης Πλάκας* κ.α.

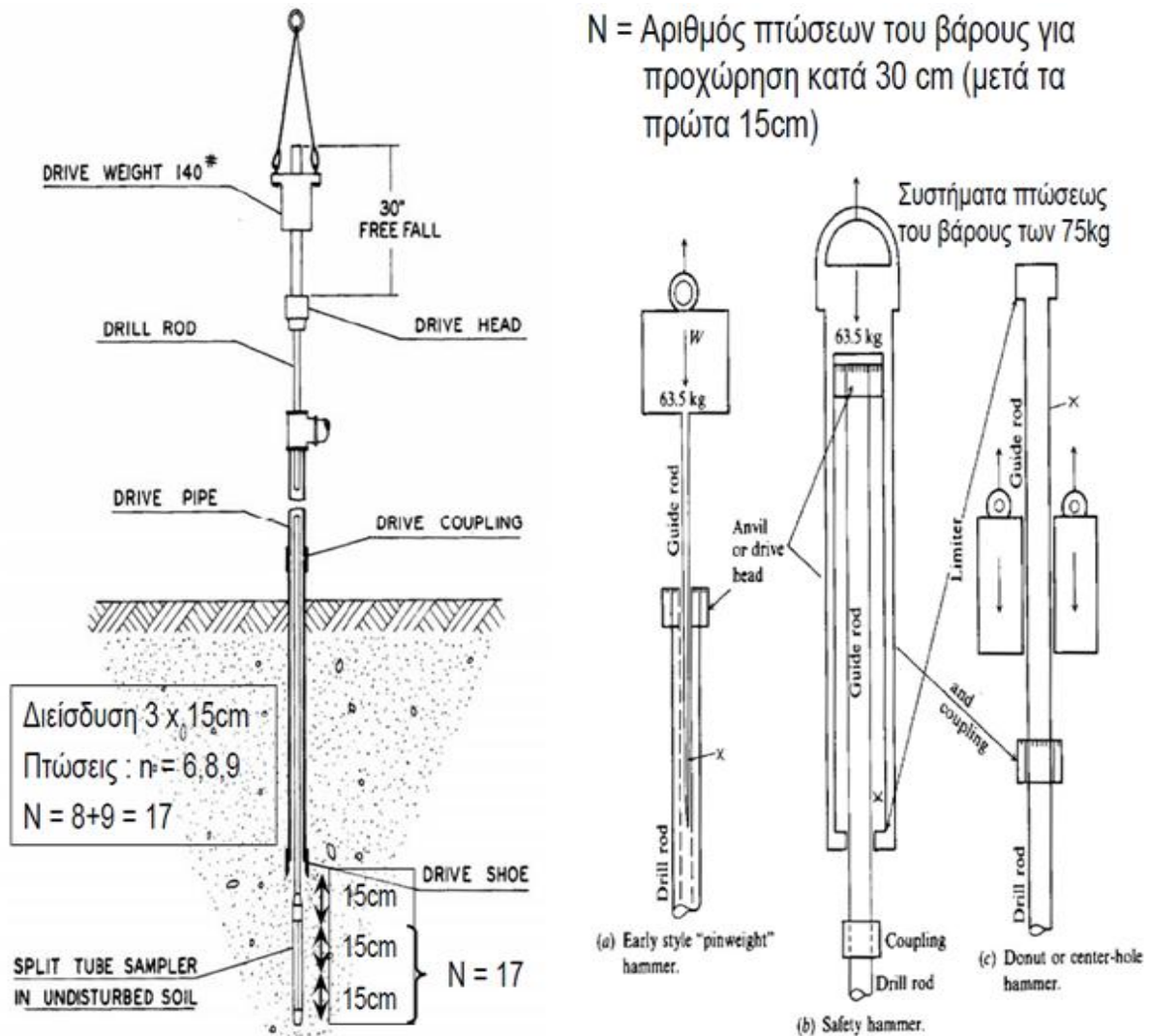
Από τα παραπάνω γίνεται σαφής η ιδιαιτερότητα του προβλήματος, για την αντιμετώπιση του οποίου έχουν προταθεί πολλές λύσεις, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους αλλά και αποκλίνουν σε σύγκριση με πραγματικές μετρήσεις.

4.1.1 Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Η δοκιμή *Πρότυπης Διείσδυσης* είναι μία από τις περισσότερο διαδεδομένες επί τόπου δοκιμές, όχι τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της, αλλά για την πολυετούς εφαρμογή της και των ποικίλων αποτελεσμάτων της με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (αντοχή, γωνία τριβής, συμπιεστότητα, σχετική πυκνότητα κλπ).



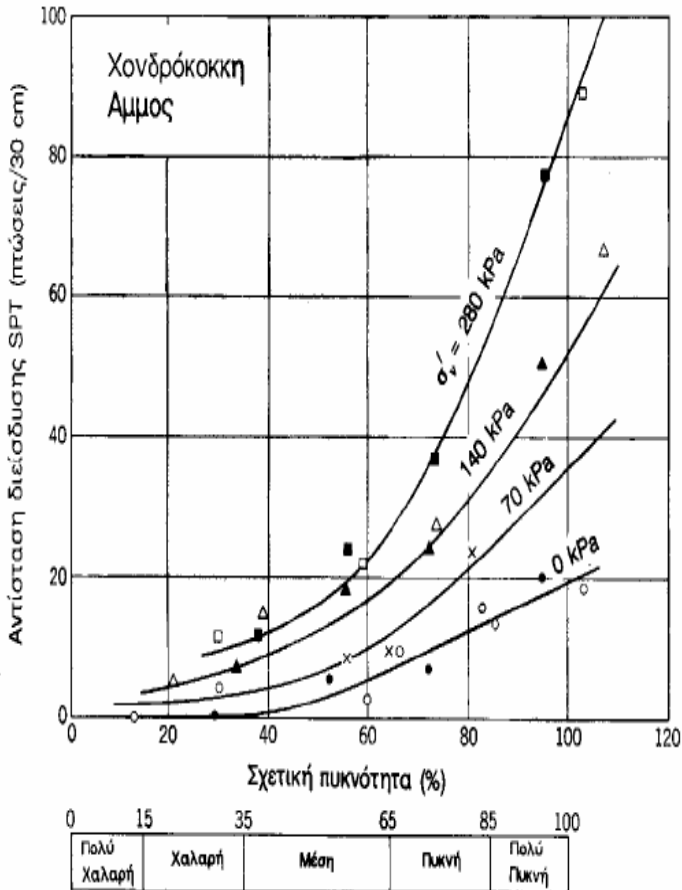
Εικόνα 4.2 Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)



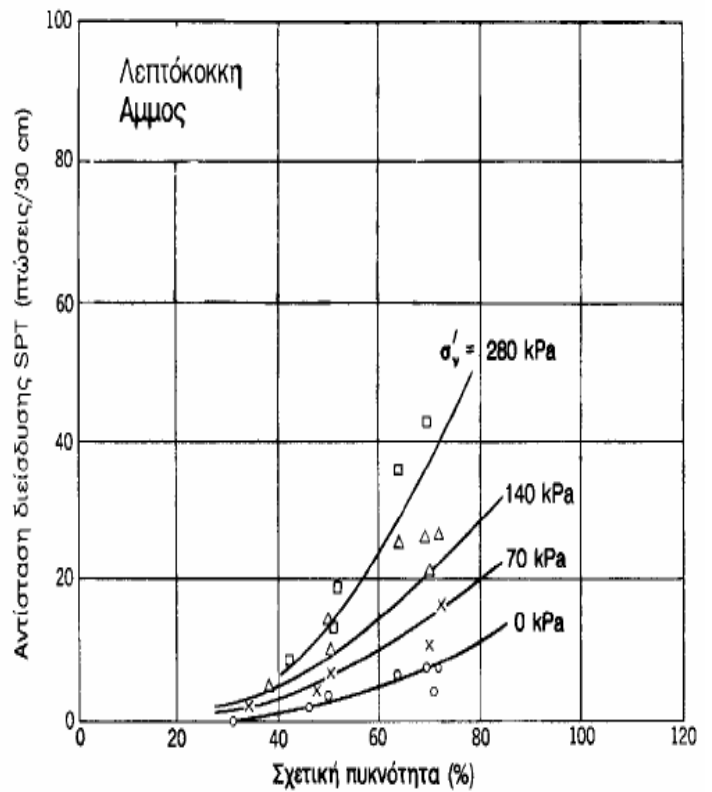
Σχήμα 4.1 Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στην προχώρηση του ειδικού διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi με πτώση βάρους 63.5 Kg από ύψος 76 cm. Κατά την δοκιμή μετράται ο αριθμός των πτώσεων N που απαιτείται για την προχώρηση του δειγματολήπτη κατά 30 cm, μετά από μία αρχική προχώρηση 15 cm για την οποία την οποία δεν λαμβάνεται υπόψιν ο αριθμός N των πτώσεων. Μετά το τέλος της δοκιμής, από το εσωτερικό του δειγματολήπτη ανακτάται το (διαταραγμένο) εδαφικό δείγμα.

Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης αναπτύχθηκε καταρχήν για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας των ψαθυρών εδαφών, στα οποία η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα δυσχερής. Σήμερα, η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται σε σχεδόν όλους τους τύπους εδαφών, κυρίως για την εκτίμηση της αντοχής τους.



(α)



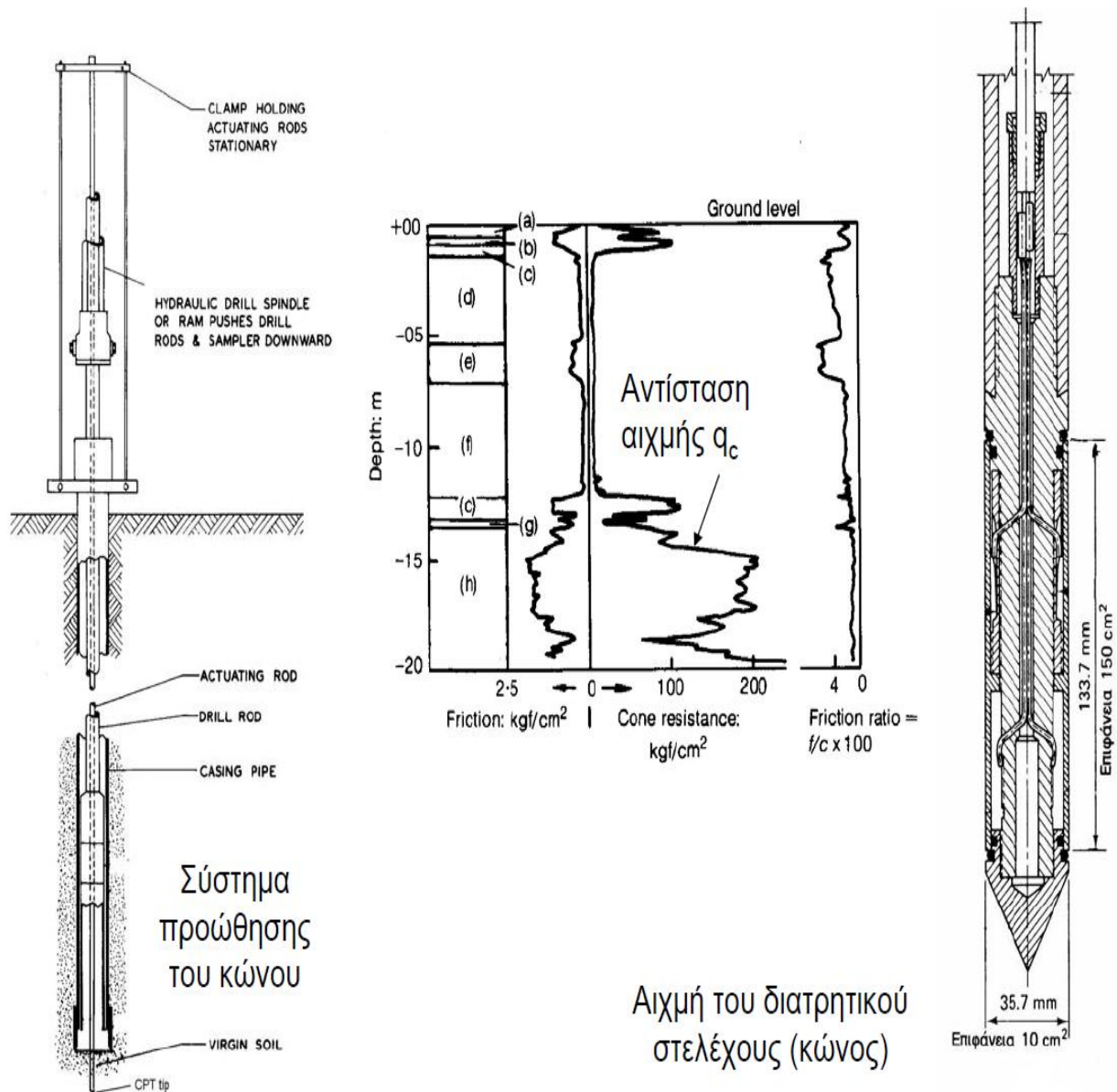
(β)

Σχήμα 4.2 Συσχετίσεις της αντίστασης διείσδυσης με τη σχετική πυκνότητα

Μερικές από τις εμπειρικές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής SPT με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους φαίνονται στα σχήματα. Το σχήμα (α) συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης με την σχετική πυκνότητα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων άμμων για διάφορα βάθη εκτέλεσης της δοκιμής, που εκφράζονται με την κατακόρυφο ενεργό τάση σ'_v . Το σχήμα (β) συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης με την γωνία τριβής των κοκκώδη εδαφών.

4.1.2 Δοκιμή διείσδυσης κώνου

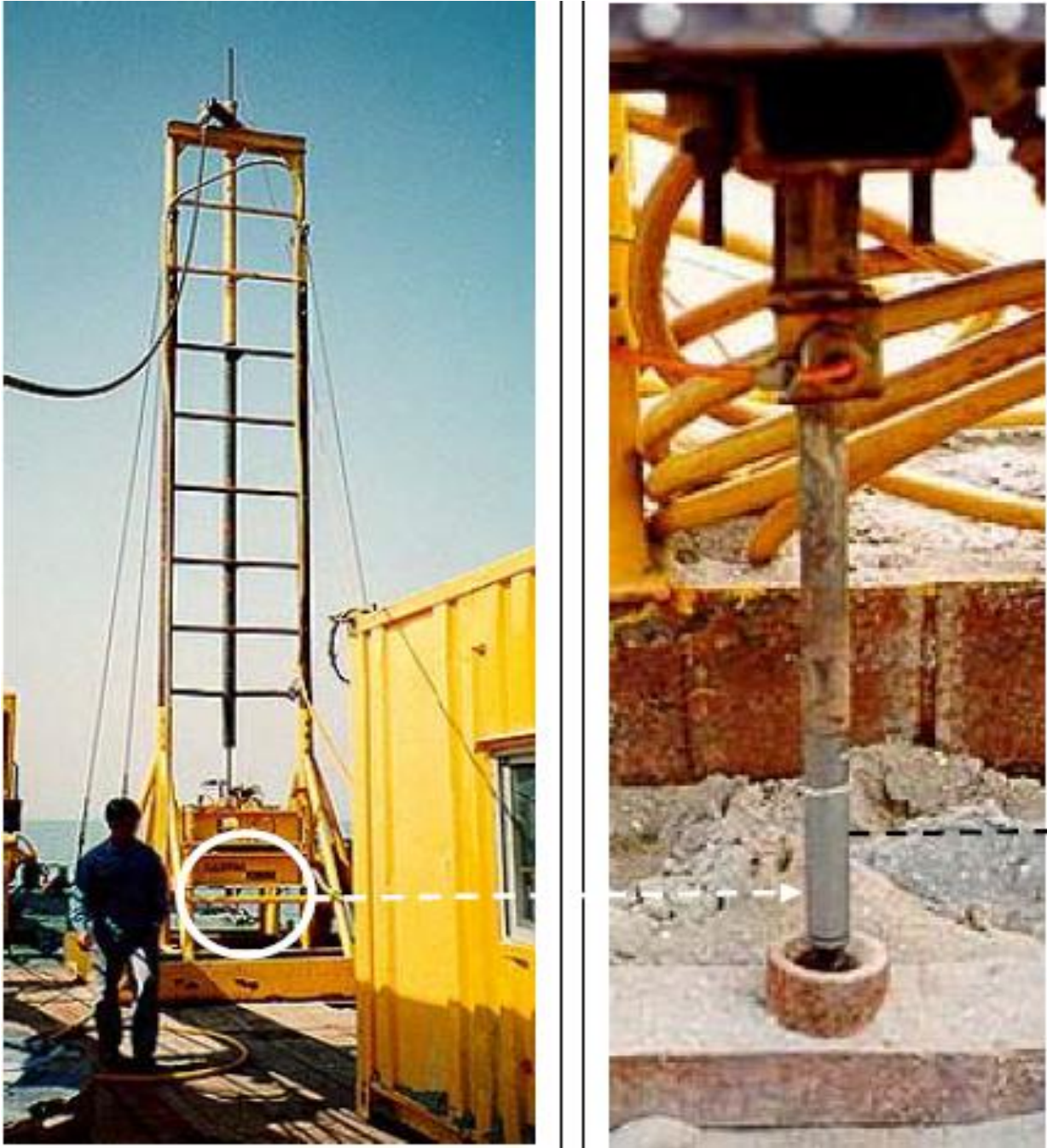
Η δοκιμή *Διείσδυσης Κώνου*, που ονομάζεται και δοκιμή *Ολλανδικού Πενετρόμετρου*, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μαλακών έως στιφρών αργίλων και της σχετικής πυκνότητας άμμων.



Σχήμα 4.3 Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου

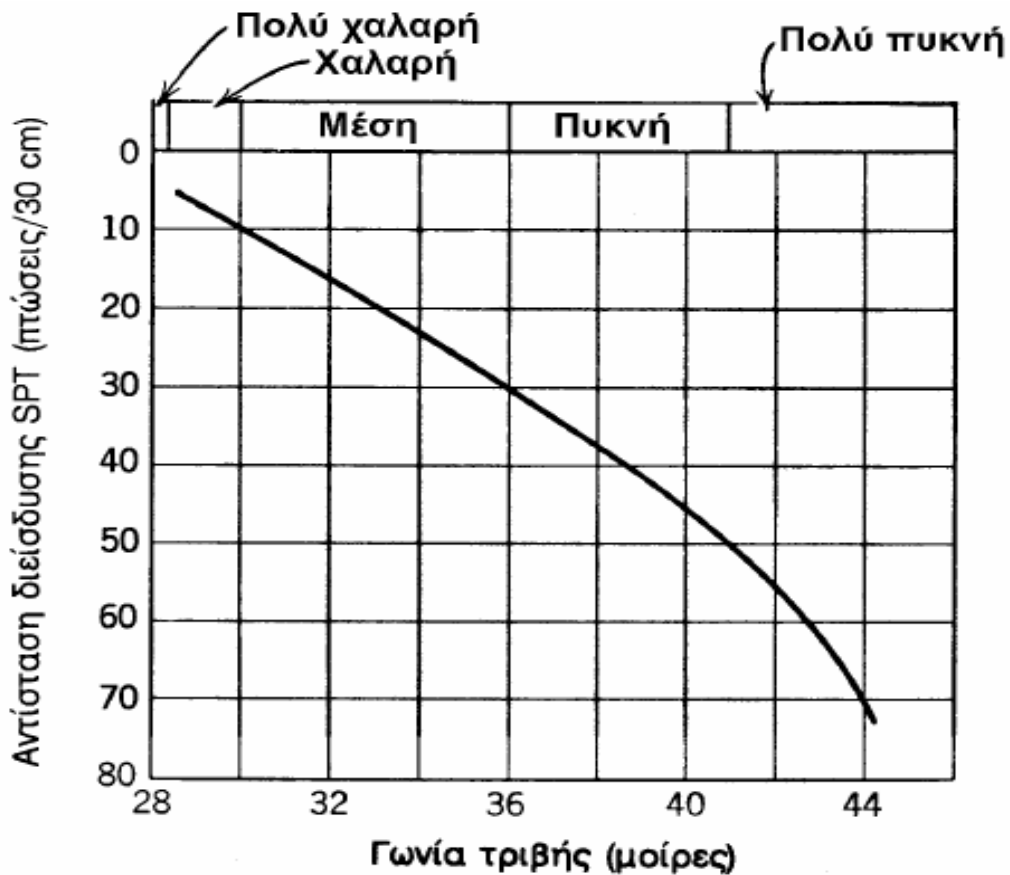
Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη συνεχή προχώρηση με ταχύτητα 1-2 m/min, ενός κώνου με αιχμή 60 μοιρών και διατομή 10 cm². Κατά τη διείσδυση του κώνου μετράται η αντίσταση στην προχώρηση της αιχμής και η αντίσταση (πλευρική τριβή) στην προχώρηση του πλευρικού μανδύα με επιφάνεια 100 cm².

Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου σήμερα εκτελείται με ηλεκτρικούς κώνους, όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται με ηλεκτρικούς μετατροπείς και καταγράφονται αυτομάτως αναλογικά ή ψηφιακά. Επίσης, τοποθετείται συχνά στην περιοχή της αιχμής και ένα πιεζόμετρο για την μέτρηση της πίεσης των πόρων που αναπτύσσεται κατά τη προχώρηση του κώνου.



Εικόνα 4.3 Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT)

Η δοκιμή εκτελείται χωρίς δειγματοληψία και συνεπώς η στρωματογραφία του πρέπει να συναχθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τις μετρήσεις της αντοχής αιχμής, της πλευρικής τριβής και της αναπτυσσόμενης πίεσης των πόρων σε συνδιασμό και με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά την πολυετή εφαρμογή της μεθόδου αυτής, καθώς και την βαθμονόμηση της με την εκτέλεση μερικών δοκιμών δίπλα σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στην περιοχή του έργου, συνάγεται η στρωματογραφία και η σχετική πυκνότητα των εδαφικών σχηματισμών.



Σχήμα 4.4 Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της δοκιμής είναι η ταχύτητα εκτέλεσης της και η συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος, ενώ κύριο μειονέκτημα της είναι η αδυναμία λήψης εδαφικών δειγμάτων. Επίσης η δοκιμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με χάλικες ή σκληρές αργίλους, λόγω δυσκολίας προώθησης του κώνου.

4.1.3 Δοκιμή Πτερυγίου (FVT)

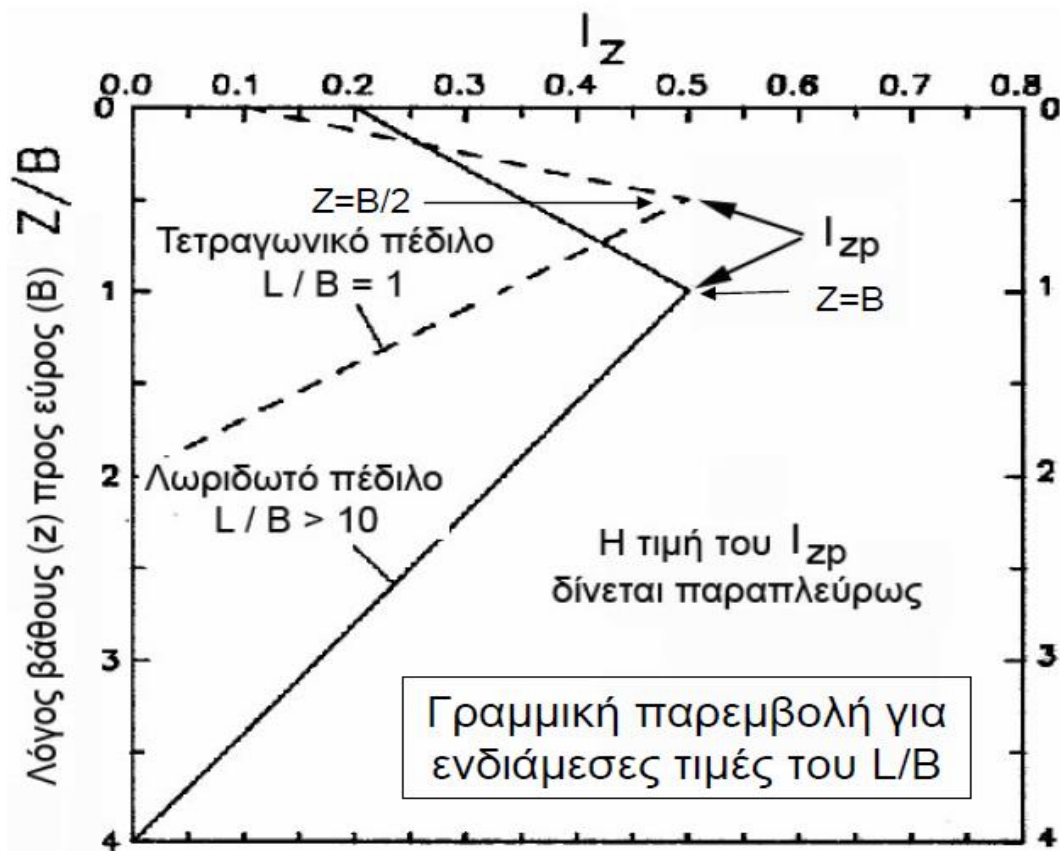
Η δοκιμή αυτή αναπτύχθηκε στις Σκανδιναβικές χώρες για την μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των μαλακών αργίλων. Κατά τη δοκιμή αυτή, η οποία εκτελείται σε συνδιασμό με δειγματοληπτική γεώτρηση, εισάγεται στο έδαφος, κάτω από τον πυθμένα της γεώτρησης, ένα σύστημα δύο κατακόρυφων μεταλλικών πλακών (πτερυγίων) σε σχήμα σταυρού. Κατά την περιστροφή του συστήματος μετράται η απαιτούμενη ροπή στρέψης σαν συνάρτηση της γωνίας στροφής καθώς και η μέγιστη ροπή στρέψης, που συσχετίζεται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής έχουν εφαρμοσθεί με την επιτυχία στην ανάλυση της ευστάθειας επιχωμάτων και εδαφικών πρανών. Έχει αναπτυχθεί επίσης και περύγιο μικρών διαστάσεων για την εκτέλεση της δοκιμής σε αδιατάρακτα εδαφικά δοκίμια στο εργαστήριο.

4.1.4 Εμπειρική μέθοδος Schmertmann

Στην περίπτωση όπου ο υπολογισμός των καθιζήσεων είναι απαραίτητος, η μέθοδος του Schmertmann (1970) θεωρείται σήμερα η πιο ακριβής, έστω και αν βασίζεται σε αρκετές προσεγγίσεις.

Η μέθοδος του Schmertmann για τον υπολογισμό των καθιζήσεων σε ψαθυρά εδάφη βασίζεται στην δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT). Σύμφωνα με την παρατήρηση του πάνω στη θεωρία της ελαστικότητας, η μέγιστη παραμόρφωση στην κατακόρυφη του κέντρου μιας ομοιόμορφα φορτισμένης επιφάνειας, δε συναντάται αμέσως κάτω από την επιφάνεια φορτίσεως, αλλά σε ένα ορισμένο βάθος. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο ότι η κατακόρυφη παραμόρφωση σε ένα τρισδιάστατο ελαστικό χώρο δεν οφείλεται μόνο στην κατακόρυφη τάση αλλά και στις διατμητικές τάσεις.



Σχήμα 4.5 Η τριγωνική κατανομή της μεθόδου Schmertmann

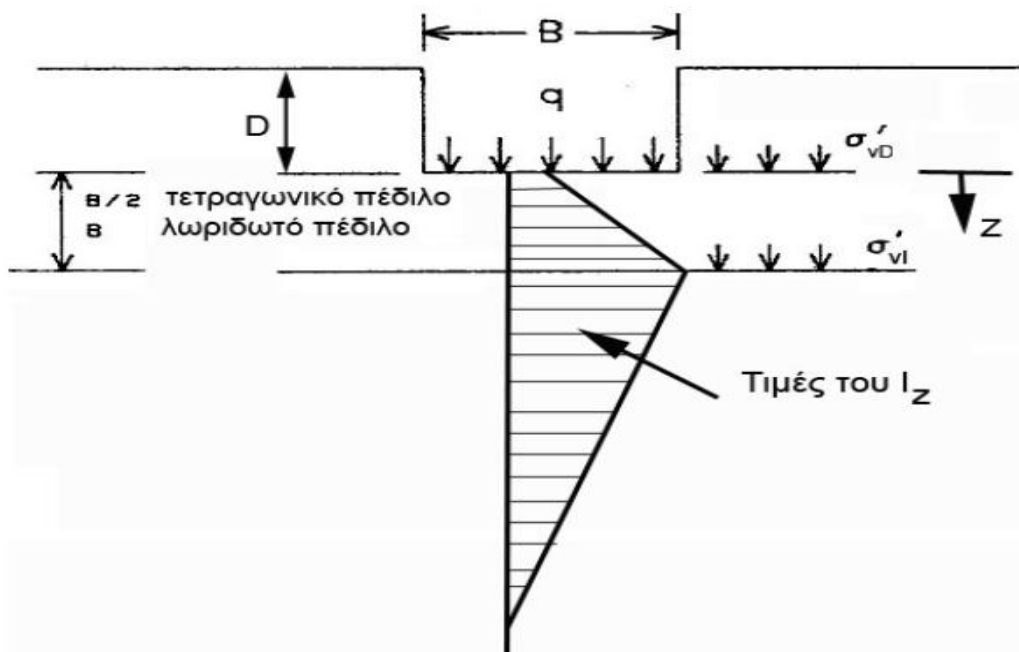
Σύμφωνα με τη μέθοδο του Schmertmann, η κατακόρυφη παραμόρφωση ε_z στο βάθος z , για την ομοιόμορφη φόρτιση p δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_z = \frac{p}{E} I_z$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας και I_z ο συντελεστής επιρροής του οποίου η τιμή δίνεται στο σχήμα. Οι ακριβείς τιμές του I_z εξαρτώνται από την τιμή του I_{zp} . Η μέγιστη τιμή του συντελεστή I_{zp} δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{zp} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{|q - \sigma'_{vD}|}{\sigma'_{vI}}}, \quad \text{όπου:}$$

- σ'_{vD} , η κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος της έδρασης.
- σ'_{vI} , η κατακόρυφη ενεργός τάση σε βάθος z κάτω από το βάθος έδρασης.



Σχήμα 4.6 Σχηματική κατανομή του συντελεστή I_z

Για κάθε ομοιογενή στρώση i το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_i = 2q_c$$

Η τιμή της καθίζησης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S_d = C_1 C_2 p \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_z}{E}\right)_i \Delta z_i$$

Οι παράμετροι C_1 και C_2 είναι συντελεστές διόρθωσης και ορίζονται ως εξής:

- $C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{\sigma_0}{p}\right) \geq 0,50$, όπου σ_0 η προυπάρχουσα τάση στο επίπεδο των θεμελίων.
 - $C_2 = 1 + 0,2 \log \frac{t}{0,1}$, όπου t ο χρόνος εκφραζόμενος σε έτη μετά την κατασκευή όπου υπολογίζεται η καθίζηση.
- Ο συντελεστής C_1 είναι μικρότερος από τη μονάδα ($C_1 < 1$) και λαμβάνει υπόψιν την προσυμπύεση του εδάφους από το ίδιο βάρος του εδάφους πάνω από το επίπεδο της θεμελίωσης.
- Ο συντελεστής C_2 είναι μεγαλύτερος από την μονάδα ($C_2 > 1$) και λαμβάνει υπόψιν μια σχετική στερεοποίηση του εδάφους.

Το γινόμενο αυτών των δύο συντελεστών δεν διαφέρει πολύ από την μονάδα και έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε πως $C_1 C_2 = 1$.

Η τριγωνική κατανομή της μεθόδου Schmertmann όμως είναι αμφισβητήσιμη και αποτελεί μια αρκετά προσεγγιστική μέθοδο και χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους απλοποίησης.

4.2 Καθίζηση αργιλικών εδαφών

Τα αργιλικά εδάφη (συνεκτικά), είναι λεπτόκοκκα με κρυσταλλικούς κόκκους μικρότερους από 0,002 mm και με σχήμα πλακοειδές ή ραβδοειδές. Έχουν υψηλή ειδική επιφάνεια και παρουσιάζουν μικρή διαπερατότητα. Οι κόκκοι συγκρατούνται μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις και η αντοχή τους εξαρτάται όχι μόνο από την εσωτερική τριβή αλλά κυρίως από την συνοχή c μεταξύ των κόκκων. Η μηχανική τους συμπεριφορά εξαρτάται από την παρουσία νερού και παρουσιάζουν μακροχρόνιες καθιζήσεις που οφείλονται στο φαινόμενο της στερεοποίησης.

Η παραμόρφωση ενός εδαφικού αργιλικού στρώματος, κάτω από την επίδραση της φόρτισης ενός τεχνικού έργου, εξαρτάται κυρίως από την εντατική

κατάσταση μέσα στο εδαφικό στρώμα και από την εντατική κατάσταση που προκαλεί η φόρτιση του τεχνικού έργου.



Εικόνα 4.4 Τομή αργιλικού εδάφους

Η διαδικασία ανάληψης του φορτίου από την εδαφική στρώση εξελίσσεται με αρκετά αργό ρυθμό και αυτό οφείλεται στο λόγο ότι η αναπτυσσόμενη υπερπίεση του νερού των πόρων αργεί πολύ να εκτονωθεί. Συνεπώς η καθίζηση στα συνεκτικά εδάφη πραγματοποιείται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.

Έχει διαπιστωθεί ότι σε κορεσμένες αργίλους, με την επιβολή της φόρτισης ενός τεχνικού έργου, προκαλείται η *άμεση καθίζηση*, στην συνέχεια λόγω της βαθμιαίας αποτόνωσης των υπερπίεσεων των πόρων εξελίσσονται οι *καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης* και στην συνέχεια, μετά την αποτόνωση, οι *ερπυστικές καθιζήσεις*.

Η άμεση καθίζηση που εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της κατασκευής οφείλεται κυρίως στη διατμητική παραμορφωσιμότητα της αργίλου και γίνεται ουσιαστικά υπό αστράγγιστες συνθήκες. Με την επιβολή των φορτίων της κατασκευής, η πίεση του νερού των πόρων αρχίζει να αυξάνεται και στη συνέχεια αποτονώνεται. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του όγκου του υπεδάφους και η κατασκευή υπόκειται σε περαιτέρω καθίζηση λόγω στερεοποίησης. Σε μερικές αργίλους όμως, η καθίζηση συνεχίζεται και

μετά το τέλος της στερεοποίησης και παρατηρείται μια μακράς διάρκειας καθίζηση, που συμβαίνει χωρίς την αποβολή νερού, λόγω της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους. Η καθίζηση αυτή εξελίσσεται υπό σταθερές ενεργές πιέσεις και μπορεί να συνεχιστεί για πάρα πολλά χρόνια.

Επομένως, η καθίζηση S των συνεκτικών εδαφών αποτελείται και από τις τρεις συνιστώσες της συνολικής καθίζησης:

$$S = S_d + S_c + S_s$$

Όπου:

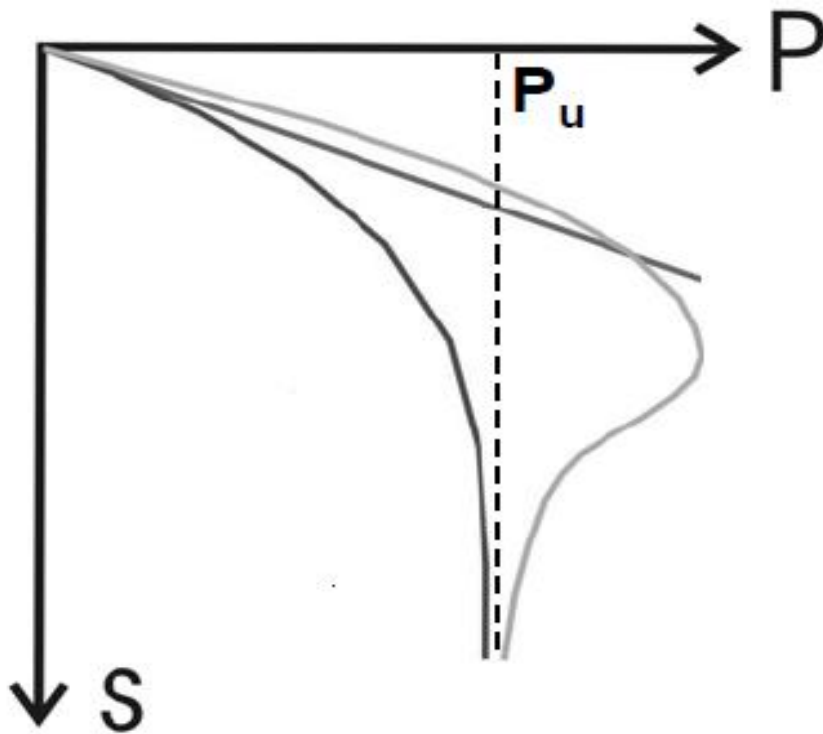
- *Η άμεση (ελαστική) καθίζηση S_d , που οφείλεται στην ελαστική παραμόρφωση του εδάφους και αναπτύσσεται άμεσα μετά την επιβολή της φόρτισης. Στα κορεσμένα αργιλικά εδάφη γίνεται χωρίς αποβολή νερού και αναιρείται όταν αφαιρεθεί η φόρτιση.*
- *Η πρωτογενής καθίζηση λόγω στερεοποίησης S_c , που οφείλεται στην μεταβολή του δείκτη πόρων, μετά την απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού, ύστερα από μεγάλη χρονική διάρκεια από την επιβολή της φόρτισης.*
- *Η δευτερογενής καθίζηση λόγω ερπυσμού S_s , που αναπτύσσεται μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης και οφείλεται στην ερπυστική συμπεριφορά του εδάφους.*

4.2.1 Άμεση (Ελαστική) Καθίζηση

Για τον υπολογισμό της άμεσης καθίζησης σε αργιλικά εδάφη διακρίνουμε δύο κύριες κατηγορίες φόρτισης:

1. *Για φόρτιση αρκετά μακριά από την κατάσταση αστοχίας (P_u), όπου η συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών είναι κατά προσέγγιση γραμμική (εκτός από τις υπερστερεοποιημένες αργίλους όπου η συμπεριφορά παραμένει γραμμική μέχρι αρκετά κοντά στην αστοχία). Ο υπολογισμός της άμεσης καθίζησης γίνεται με σχέσεις βασισμένες στη *Θεωρία της Ελαστικότητας* και για αστράγγιστες συνθήκες χωρίς την μεταβολή του όγκου ($\Delta V = 0$), όπως με την μέθοδο Steinbrenner, με τη μέθοδο Milovic (1970), η μέθοδος Janbu – Bjerrum & Kjaernsli (1956), η μέθοδος Butler (1975), θεωρώντας τις ελαστικές σταθερές $E = E_u$ και $\nu = \nu_u = 0.5$ στις αστράγγιστες τιμές τους.*

2. Για φόρτιση κοντά στην κατάσταση αστοχίας (P_u), η συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών είναι έντονα μη γραμμική (ειδικά σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους). Ο υπολογισμός της άμεσης καθίζησης γίνεται με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία).

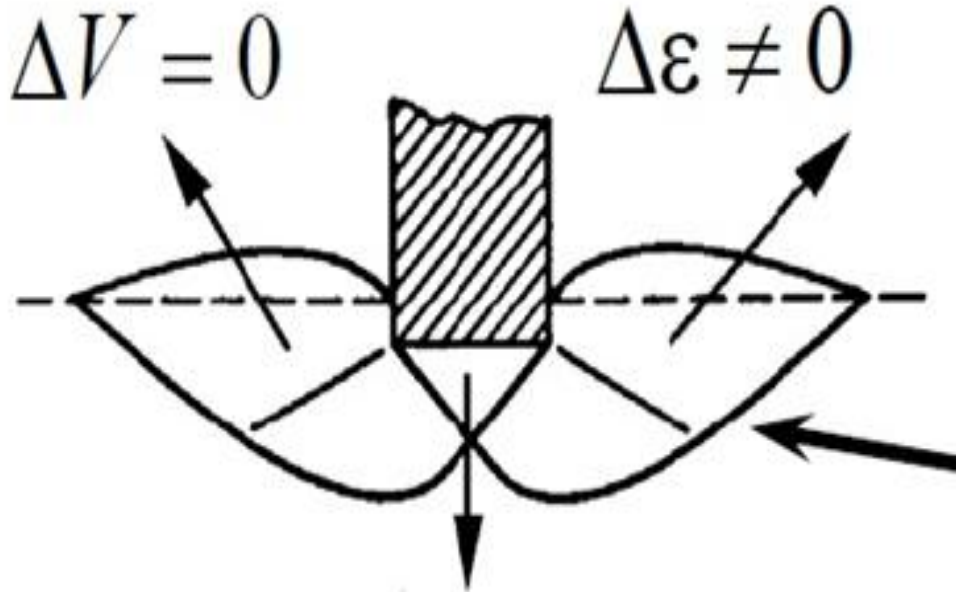


Σχήμα 4.7 Διάγραμμα αστοχίας P_u

Η σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας E (σε συνθήκες στράγγισης) και του E_u (υπό αστράγγιστες συνθήκες), δίνεται από την εξίσωση:

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

Στην περίπτωση των κορεσμένων αργιλικών εδαφών, επειδή δεν έχουμε αποβολή νερού και κατά συνέπεια μεταβολή και του όγκου, δε σημαίνει ότι το έδαφος δεν παραμορφώνεται.



Σχήμα 4.8 Οι διατμητικές παραμορφώσεις που δίνουν ελαστικές καθιζήσεις

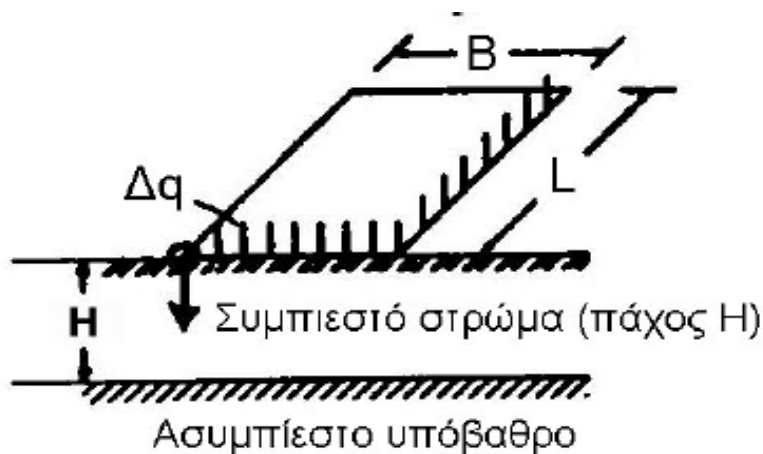
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, οι διατμητικές παραμορφώσεις υπό σταθερό όγκο που συμβαίνουν στο έδαφος, δημιουργούν τις άμεσες καθιζήσεις.

4.2.1.1 Η μέθοδος Steinbrenner

Για τον υπολογισμό της καθίζησης της γωνίας εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου πλάτους B και μήκους L , υπό την επίδραση ομοιόμορφης φόρτισης Δq σε συμπιεστή στρώση πάχους H , ο Steinbrenner διατύπωσε την εξίσωση:

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

- I_D , ο συντελεστής βάθους (για επιφανειακή θεμελίωση $I_D = 1$).
- F_1, F_2 , οι συντελεστές επιρροής του σχήματος (εξαρτώνται από τις τιμές των L/B και H/B).
- ν , ο λόγος Poisson.

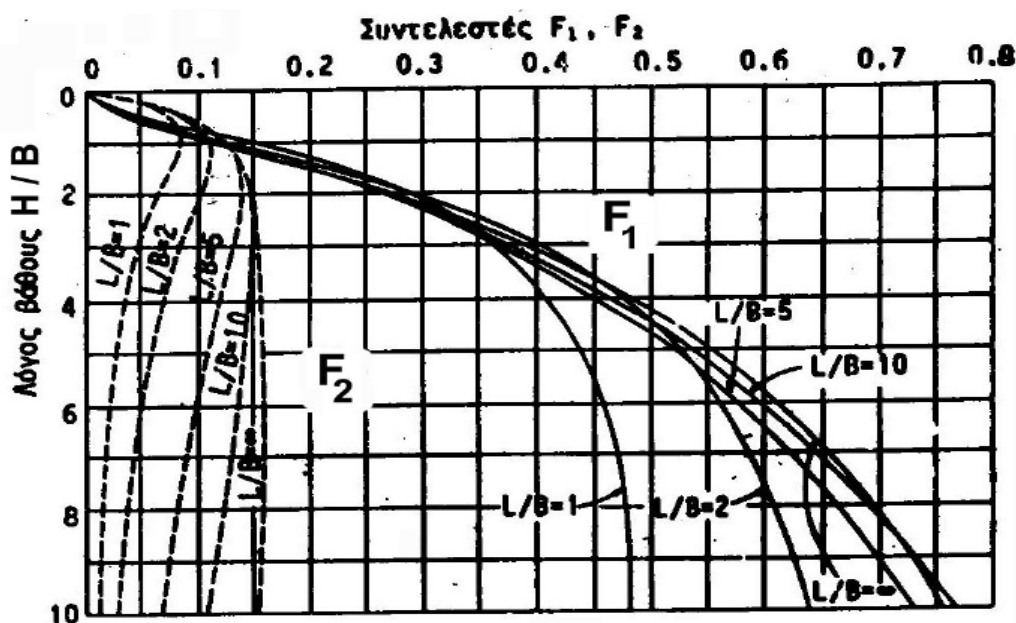


Σχήμα 4.9 Η καθίζηση της γωνίας εύκαμπτου ορθογωνικού πεδίου

Οι συντελεστές επιρροής F_1 και F_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

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

$$F_2 = \frac{N}{2\pi} \arctan \left(\frac{M}{N \sqrt{M^2 + N^2 + 1}} \right), \quad \text{όπου } M = \frac{L}{B} \text{ και } N = \frac{H}{B}$$



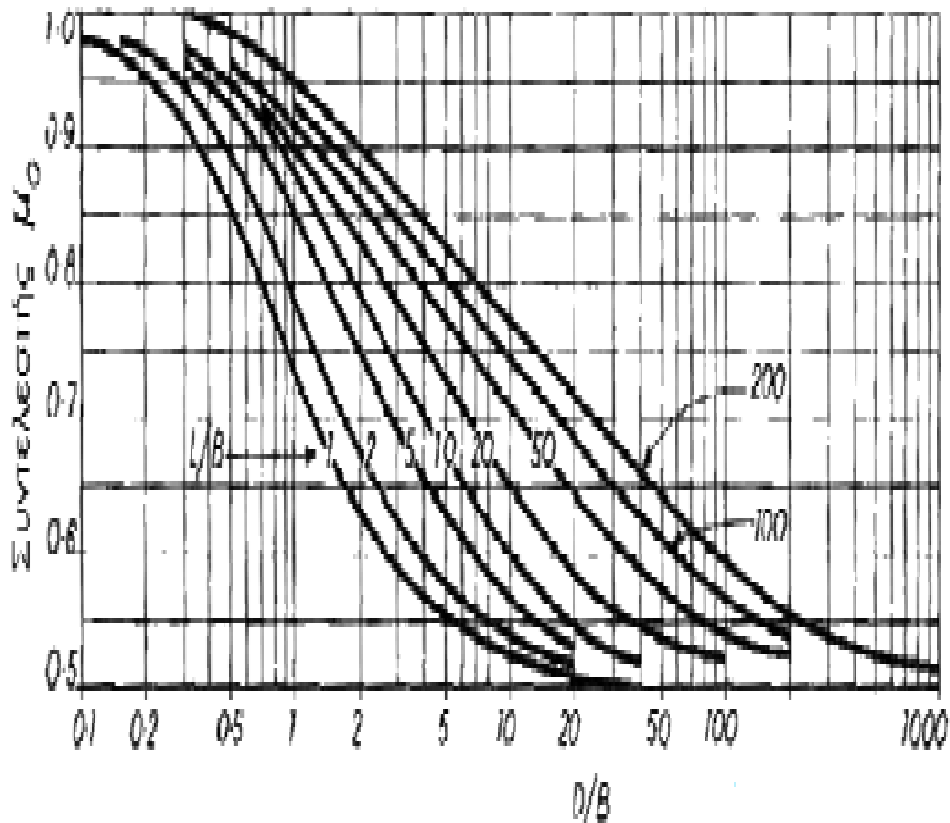
Σχήμα 4.10 Διάγραμμα τιμών των συντελεστών F_1 και F_2

4.2.1.2 Η μέθοδος Janbu – Bjerrum & Kjaernsli (1956)

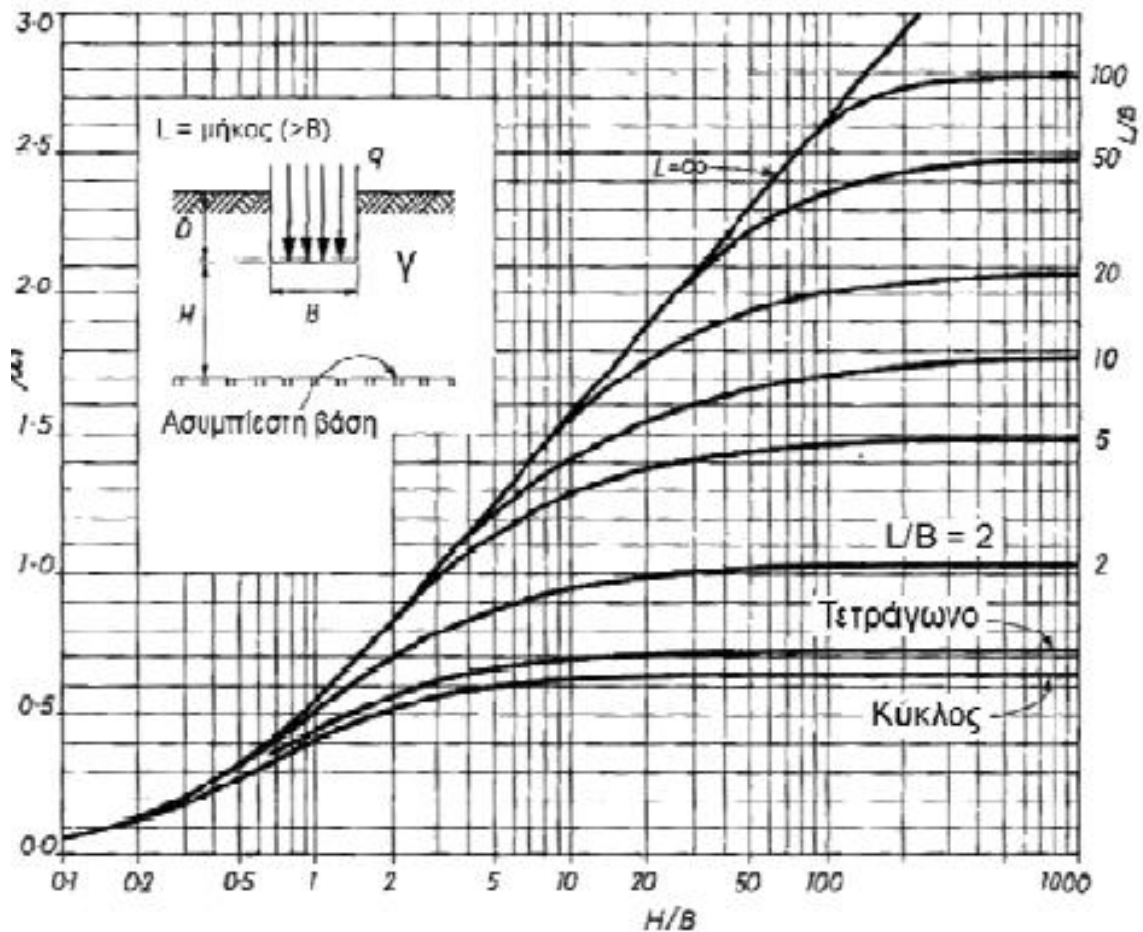
Για εδαφική απόθεση πάχους H η τιμή της άμεσης καθίζησης άκαμπτου θεμελίου δίνεται από την εξίσωση.

$$\Delta H_i = \mu_0 \mu_1 \frac{q_0 B}{E_u}, \quad \text{όπου:}$$

- μ_0 , είναι ο συντελεστής βάθους θεμελίωσης.
- μ_1 , είναι ο συντελεστής πάχους εδαφικής στρώσης.
- E_u , είναι η «αστράγγιστη» τιμή του μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση συντελεστή μ_0



Σχήμα 4.12 Σχηματική απεικόνιση συντελεστή μ_1

4.2.2 Πρωτογενής καθίζηση λόγω στερεοποίησης

Με τον όρο *στερεοποίηση* ορίζουμε την παραμόρφωση του εδάφους που οφείλεται στην απομάκρυνση του νερού των πόρων που πλεονάζει, όταν το έδαφος δέχεται εξωτερικά φορτία.

Η καθίζηση λόγω στερεοποίησης σε αργιλικά (συνεκτικά) εδάφη είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την άμεση καθίζηση και συνήθως αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής καθίζησης, εάν η φόρτιση δεν πλησιάζει τη κατάσταση αστοχίας. Όταν η φόρτιση πλησιάζει την αστοχία, οι άμεσες καθιζήσεις είναι εξίσου πολύ σημαντικές.

Η παραμόρφωση του εδάφους που οφείλεται στην καθίζηση λόγω του φαινομένου της στερεοποίησης αντιστοιχεί στην εκροή του νερού των πόρων, φαινόμενο που εξελίσσεται σταδιακά. Σε κάθε χρονική στιγμή μετά την φόρτιση του εδάφους πραγματοποιείται ένα μέρος της συνολικής καθίζησης και επομένως απαιτεί ένα χρονικό διάστημα για να ολοκληρωθεί. Ο απαιτούμενος

χρόνος για την καθίζηση ή στερεοποίηση εξαρτάται από το συντελεστή διαπερατότητα του εδάφους και μπορεί να διαρκέσει πάρα πολύ εάν η διαπερατότητα είναι χαμηλή.

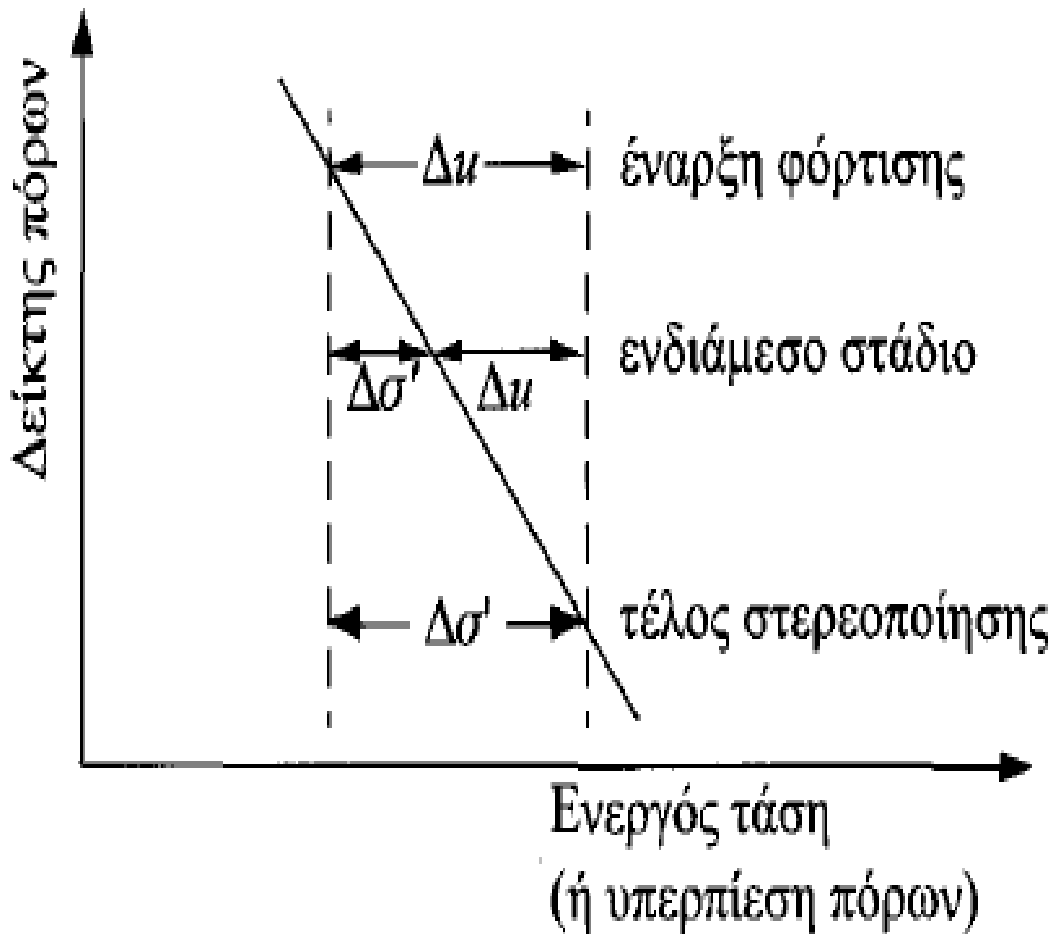
Στη γενική περίπτωση το φαινόμενο της στερεοποίησης περιλαμβάνει τρισδιάστατη παραμόρφωση του εδάφους και τρισδιάστατη εκροή του νερού των πόρων. Η μαθηματική ανάλυση του φαινομένου είναι εξαιρετικά περίπλοκη. Αντίθετα η ανάλυση της περίπτωσης όπου η καθίζηση λαμβάνει χώρα προς μία κατεύθυνση είναι σχετικά απλή.

Συνήθως το μέγεθος και η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στερεοποίησης υπολογίζονται με χρήση της *θεωρίας στερεοποίησης Terzaghi*. Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων προσδιορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές, όπως για παράδειγμα με τη δοκιμή συμπίεσόμετρου, σε δοκίμια που έχουν ληφθεί από γεωτρήσεις.

4.2.2.1 Το φαινόμενο της κύριας στερεοποίησης

Εάν εφαρμοστεί μια τάση σ σε ένα αργιλικό έδαφος, το οποίο είναι κορεσμένο, τότε επειδή η διαπερατότητα της αργίλου είναι πολύ μικρή, μέρος αυτής της τάσεως μεταφέρεται στο νερό των πόρων, του οποίου η πίεση αυξάνεται στιγμιαία. Η υπερπίεση αυτή λαμβάνεται ίση με u . Η υπερπίεση αυτή αναγκάζει το νερό να διαφύγει προς τα διαπερατά στρώματα, με αποτέλεσμα αυτή να μειώνεται βαθμιαία, ενώ αυξάνεται ισόποσα η ενεργός τάση που παραλαμβάνεται από τους κόκκους του εδάφους σ' , έτσι ώστε να ισχύει η αρχή $\sigma = \sigma' + u$. Η ενεργός τάση ευθύνεται για την κατακόρυφη παραμόρφωση του εδάφους, δηλαδή την καθίζηση.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι σε οποιαδήποτε στιγμή ο όγκος της εδαφικής μάζας είναι σχετικός με την ενεργό τάση σ' στο έδαφος εκείνη τη στιγμή και όχι με την ολική τάση σ . Με άλλα λόγια, η καθίζηση είναι μία λειτουργία της ενεργού τάσης. Η εφαρμογή της ολικής τάσης απλά και μόνο δημιουργεί μία κατάσταση μεταβατικής ροής και παροτρύνει την στερεοποίηση μέσω της εκροής του πορώδους νερού και αυξάνει την ενεργό τάση μέσω της μείωσης της πλεονάζουσας πίεσης στο νερό των πόρων u .



Σχήμα 4.13 Μεταβολή πίεσης πόρων και ενεργού τάσης

Η τάση σ' του κύριου σκελετού του εδάφους, που ονομάζεται στερεά ή ενεργός τάση, έχει συνεπώς χαμηλότερη τιμή από την τάση σ και είναι ίση με:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Η δημιουργία των υπερπίεσεων u οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

1. Για εδάφη με μικρή διαπερατότητα, όπως είναι οι άργιλοι, η εκροή του νερού είναι συνάρτηση της απόστασης από τα διαπερατά στρώματα.
2. Το νερό μπορεί να θεωρηθεί σαν ασυμπίεστο σε σχέση με το έδαφος.

Όταν αυξάνεται η πίεση του νερού, δημιουργείται υδραυλική βαθμίδα και το νερό μπαίνει σε κίνηση και απομακρύνεται. Η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται και κατά συνέπεια τα κενά των πόρων καταλαμβάνονται από τους κόκκους που μετατοπίζονται, γιατί παραλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος της ολικής τάσεως. Η καθίζηση του εδάφους αυξάνεται μέχρι την στιγμή που μηδενίζεται η υπερπίεση u και όλη η τάση μεταφέρεται στο σκελετό των

κόκκων, οπότε επέρχεται και ισορροπία, ($\sigma = \sigma'$). Η πίεση του νερού των πόρων επανέρχεται στην αρχική (την υδροστατική). Η βαθμιαία μείωση της περιεκτικότητας σε νερό, για ένα σταθερό φορτίο, αποτελεί το φαινόμενο της στερεοποίησης.

Πρέπει να προσέξουμε όμως ότι το έδαφος μετά το πέρας της στερεοποίησης εξακολουθεί να είναι κορεσμένο.

Κατά συνέπεια, η ύπαρξη ενός αργιλικού στρώματος στην περιοχή, όπου πρόκειται να κατασκευαστεί ένα τεχνικό έργο, θα δημιουργήσει πρόβλημα καθιζήσεων, οι οποίες θα πρέπει να προβλεφθούν. Το αργιλικό στρώμα μπορεί να μην βρίσκεται απαραίτητα στην επιφάνεια, αλλά να βρίσκεται κάτω από ένα άλλο (π.χ. αμμώδες).

Θα πρέπει να είναι γνωστό, πριν τον τελικό σχεδιασμό της θεμελίωσης, το *ύψος των καθιζήσεων* που μπορεί να δώσει η άργιλος μετά από τη συγκεκριμένη φόρτιση, που θα δεχτεί από την κατασκευή, καθώς και ο *χρόνος* ο οποίος θα απαιτηθεί για να ολοκληρωθούν οι καθιζήσεις.

Για να υπολογιστούν αυτά τα μεγέθη, (ύψος και χρόνος καθιζησης), είναι απαραίτητο να είναι γνωστά : το φορτίο της κατασκευής και των υπερκειμένων στρωμάτων, τα χαρακτηριστικά του στρώματος (ύψος, δείκτης κενών) και κάποιοι συντελεστές, οι οποίοι προσδιορίζονται εργαστηριακά με τη δοκιμή του *οιδήμετρου* (συμπιεσομέτρου).



Εικόνα 4.5 Δοκιμή οιδήμετρου

Η καθίζηση της κορεσμένης αργίλου λόγω της στερεοποίησης μπορεί να γίνει κατανοητή με εργαστηριακές δοκιμές χρησιμοποιώντας απλούς μηχανισμούς ανάλογους του φαινομένου.

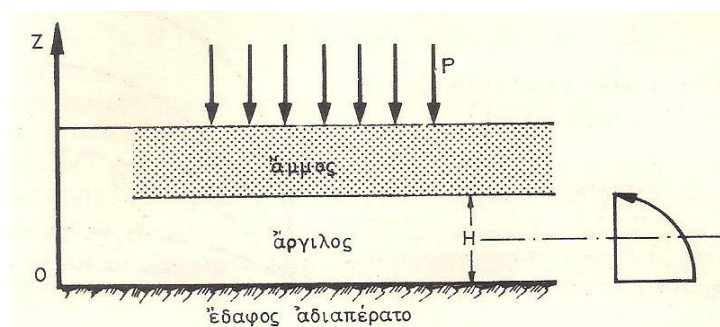
4.2.2.2 Θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης Terzaghi

Για την μελέτη της πορείας του φαινομένου, το μέγεθος και τη χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων λόγω της στερεοποίησης, ο Terzaghi διατύπωσε τη *θεωρία της μονοδιάστατης στερεοποίησης*.

Στη θεωρία της μονοδιάστατης στερεοποίησης γίνεται η παραδοχή ότι η ροή του νερού πραγματοποιείται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση μόνο. Στην πράξη η περίπτωση αυτή εμφανίζεται όταν οι διαστάσεις της φορτιζόμενης επιφάνειας είναι πολύ μεγαλύτερες από το πάχος του αργιλικού στρώματος H που υφίσταται την στερεοποίηση. Άλλες παραδοχές της θεωρίας είναι:

- Το έδαφος είναι ομοιογενές και κορεσμένο.
- Οι κόκκοι και το νερό του εδάφους είναι ασυμπίεστα (η μεταβολή του όγκου του εδάφους οφείλεται μόνο στη μεταβολή του δείκτη κενών).
- Η ροή του νερού στα κενά του εδάφους είναι μονοδιάστατη, ενώ ισχύει ο νόμος του Darcy.
- Οι παραμορφώσεις είναι μικρές.
- Ο συντελεστής διαπερατότητας είναι σταθερός.

Ο Terzaghi μελέτησε τη στερεοποίηση ενός οριζόντιου ομοιογενούς και ισότροπου στρώματος κορεσμένης αργίλου, σταθερού πάχους, το οποίο εδράζεται σε τελείως αδιαπέρατο στρώμα.



Σχήμα 4.14 Οριζόντια και ομοιογενής στρώση κορεσμένης αργίλου

Το κατακόρυφο φορτίο είναι ομοιόμορφο και εφαρμόζεται πάνω σε στρώμα διαπερατής άμμου σταθερού πάχους. Στην περίπτωση αυτή οι ροές είναι μονοδιάστατες, από κάτω προς τα πάνω, κατά το κατακόρυφο άξονα z και η ολική τάση είναι σταθερή.

Διατυπώνοντας την υδραυλική εξίσωση συνέχειας και ότι η μεταβολή του δείκτη πόρων είναι ίση με τον όγκο του νερού που εκρέει σύμφωνα με το νόμο του Darcy για την ταχύτητα ροής, προκύπτει η διαφορική εξίσωση που καθορίζει την εκτόνωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων.

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}, \quad \text{όπου:}$$

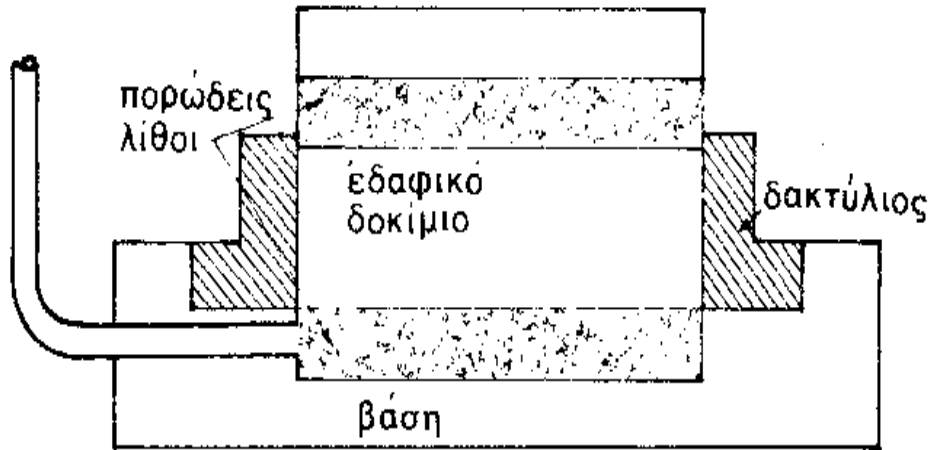
- u_e , η υπερπίεση του νερού των πόρων.
- C_v , ο συντελεστής στερεοποίησης.

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση αποτελεί την εξίσωση της θεωρίας της μονοδιάστατης στερεοποίησης Terzaghi.

4.2.2.3 Δοκιμή Οιδήμετρου του Terzaghi

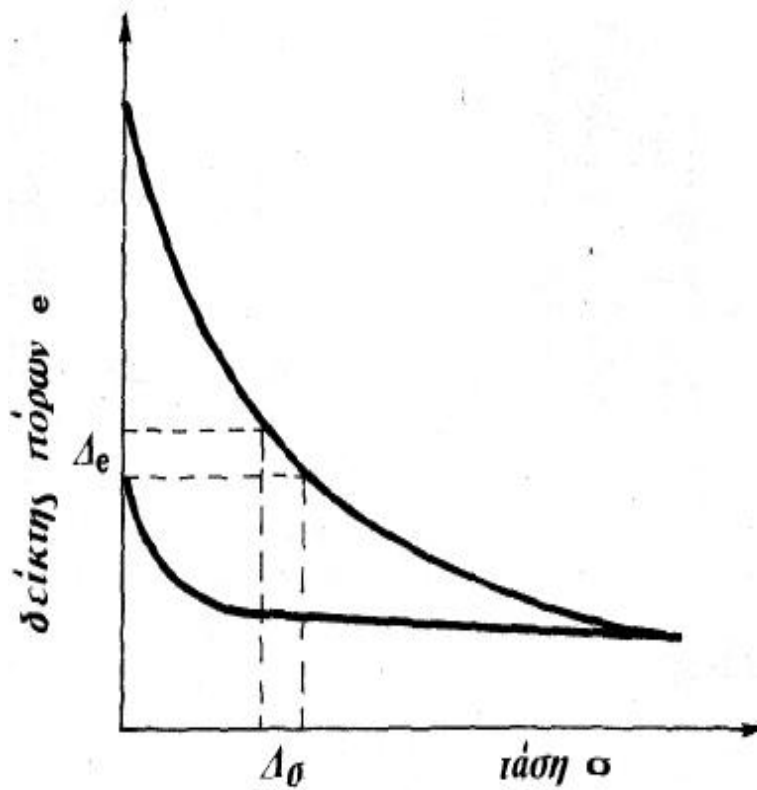
Η μελέτη της επίδρασης του χρόνου στην καθίζηση μπορεί να γίνει στο εργαστήριο, για απλή περίπτωση, με την βοήθεια του *οιδήμετρου του Terzaghi*. Η συσκευή αυτή μας επιτρέπει να μελετήσουμε ως ένα βαθμό τη μονοδιάστατη στερεοποίηση.

Το οιδήμετρο επιτρέπει τη μελέτη της καθίζησης χρησιμοποιώντας ένα κυλινδρικό δοκίμιο αργίλου μικρών διαστάσεων (πάχος 2 cm, διάμετρος 6 cm). Το δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πορώδεις λίθους και περιορίζεται πλευρικά από κυλινδρική επιφάνεια που εμποδίζει κάθε διόγκωση.

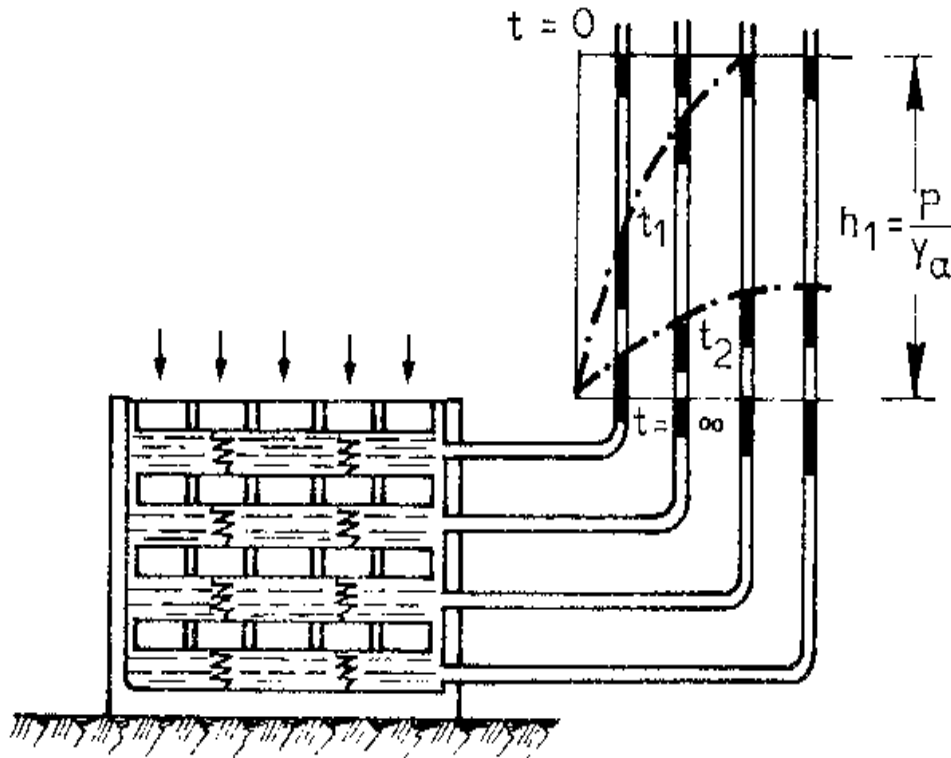


Σχήμα 4.15 Οιδήμετρο Terzaghi

Η καθίζηση που παρατηρείται είναι ίση με τη μεταβολή σε όγκο του δοκιμίου και ανάλογη με τη μεταβολή του δείκτη πόρων. Το φορτίο εφαρμόζεται σε διαδοχικές φάσεις για να χαραχθεί η καμπύλη του φορτίου – δείκτη πόρων.



Σχήμα 4.16 Καμπύλη φορτίου – δείκτη πόρων

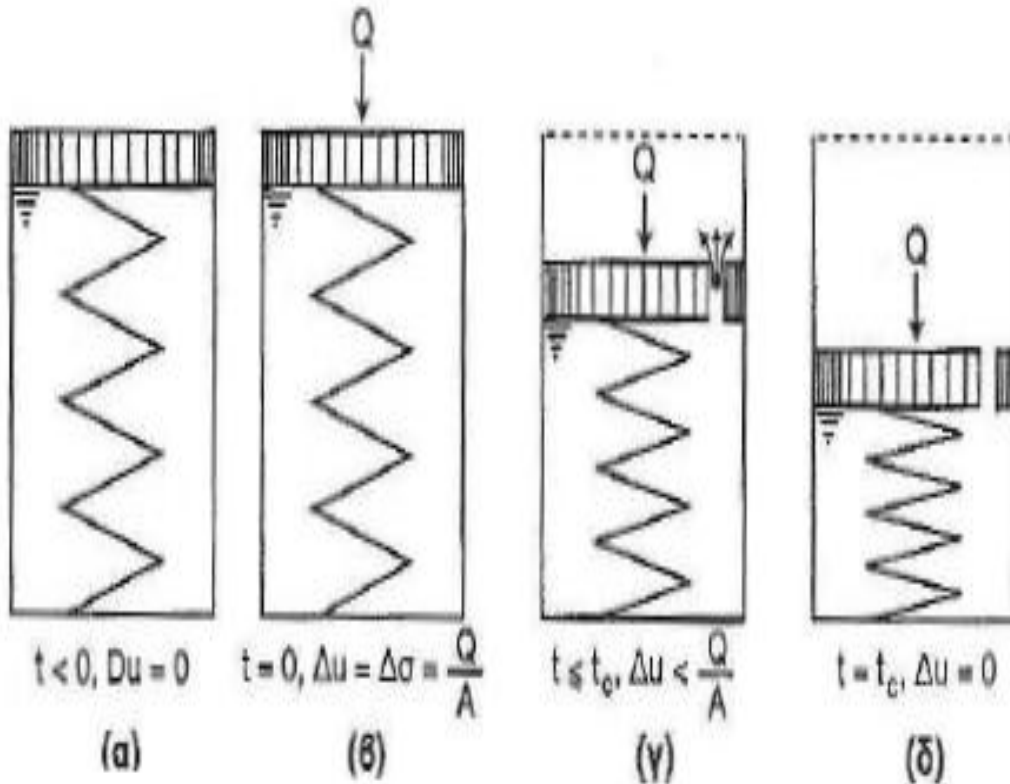


Σχήμα 4.18 Κυλινδρικό δοχείο Terzaghi

Εάν εφαρμόσουμε ένα φορτίο p στην επιφάνεια του δοχείου, τα ελατήρια επειδή δεν μπορούν να παραλάβουν το φορτίο εάν δεν μετακινηθούν, όλο το φορτίο μεταβάλλεται σε υδραυλική πίεση του νερού ($u = p = h_1 \gamma_w$), την οποία μπορούμε να παραστήσουμε με μια οριζόντια ευθεία σε ύψος h_1 πάνω από τον δίσκο. Ύστερα από ένα χρονικό διάστημα t_1 , μέρος του νερού που περιέχεται ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο δίσκο, απομακρύνεται από τις οπές του πρώτου δίσκου και τα ελατήρια ανάμεσα στους δύο πρώτους δίσκους αρχίζουν να παραμορφώνονται. Μέρος του φορτίου μεταφέρεται στα ελατήρια και η πίεση του νερού μειώνεται στο επάνω μέρος αλλά εξακολουθεί να παραμένει ίση με p στο κάτω μέρος του δοχείου. Το φαινόμενο εξακολουθεί να συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι μια χρονική διάρκεια T όπου η υδραυλική πίεση έχει μηδενιστεί και το φορτίο p έχει μεταφερθεί ολόκληρο στα ελατήρια.

Το παραπάνω παράδειγμα του Terzaghi επιτρέπει έναν καλό παραλληλισμό της στερεοποίησης της αργίλου αλλά στην πραγματικότητα το φαινόμενο είναι αρκετά πολύπλοκο.

Ένα αντίστοιχο παράδειγμα με το κυλινδρικό δοχείο του Terzaghi περιγράφεται και παρακάτω. Χρησιμοποιούμε έναν απλό κυλινδρικό μηχανισμό ανάλογο του φαινομένου της στερεοποίησης, στο οποίο έχει εφαρμοστεί ένα ελατήριο στο κέντρο του.



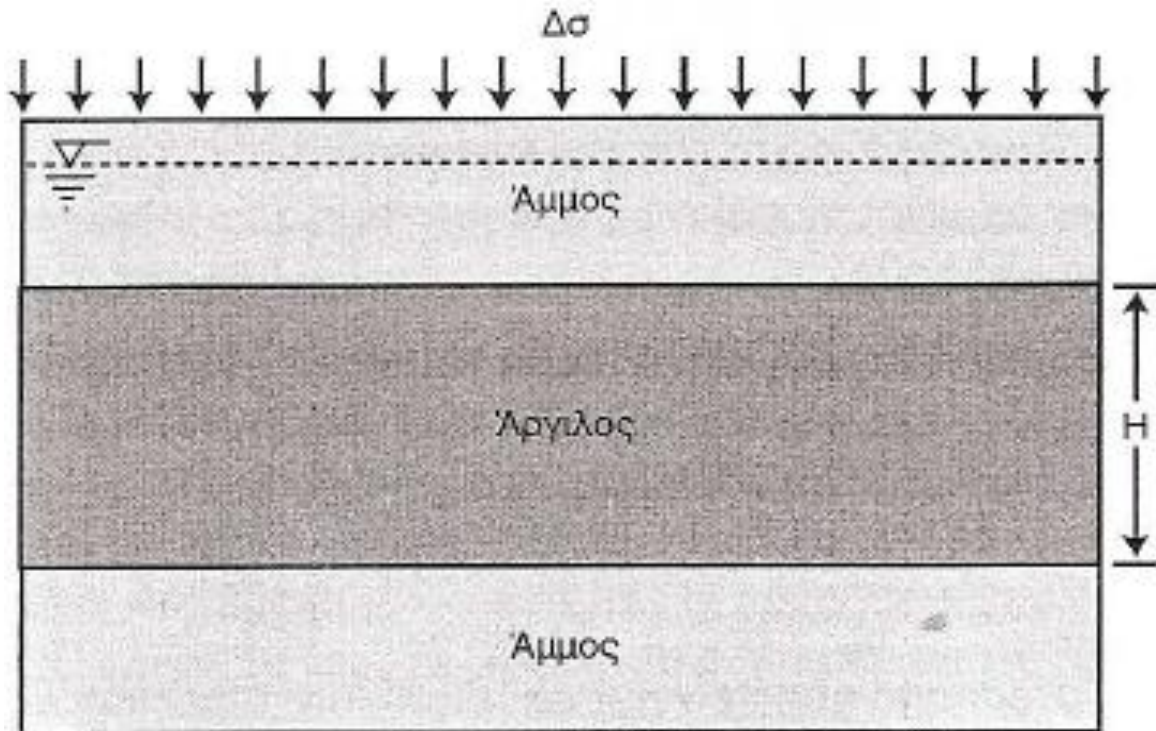
Σχήμα 4.19 Μηχανικό ανάλογο της στερεοποίησης

Γεμίζουμε τον κύλινδρο με νερό και εφαρμόζουμε στην επιφάνεια του μια φόρτιση Q μέσω υδατοστεγούς εμβόλου. Εάν η εσωτερική επιφάνεια της διατομής του κυλίνδρου είναι A , τότε η αναπτυσσόμενη τάση θα είναι:

$$\Delta\sigma = \frac{Q}{A}$$

Αμέσως μετά την εφαρμογή του φορτίου (και ενώ η βαλβίδα διαφυγής του νερού είναι κλειστή), η τάση $\Delta\sigma$ παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το νερό, επειδή το νερό είναι ασυμπίεστο. Όταν ανοίξουμε την βαλβίδα, αρχίζει η εκροή του και μειώνεται η πίεση του, ενώ το υπόλοιπο φορτίο παραλαμβάνεται από το συμπιεσμένο ελατήριο. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου θα μηδενιστεί η πίεση του νερού και το φορτίο θα παραληφθεί εξ ολοκλήρου από το ελατήριο.

Έχοντας κατά νου το παραπάνω μηχανισμό, μπορούμε να αναλύσουμε την παραμόρφωση μιας στρώσης κορεσμένης αργίλου πάχους H , η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ δύο στρώσεων άμμου, η οποία υφίσταται ξαφνικά μια πρόσθετη ολική τάση $\Delta\sigma$.



Σχήμα 4.20 Κορεσμένη αργλική στρώση μεταξύ δύο στρώσεων άμμου

Η τάση αυτή παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων και από το στερεό σκελετό του εδάφους, πράγμα που σημαίνει ότι η ολική τάση μοιράζεται μεταξύ της ενεργού τάσης $\Delta\sigma'$ και της πίεσης του νερού των πόρων Δu . Είναι δηλαδή:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u$$

Επειδή η διαπερατότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) της αργίλου είναι πολύ χαμηλή, κατά το χρόνο επιβολής του φορτίου ($t = 0$) η ολική τάση $\Delta\sigma$ παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων. Αμέσως μετά, λόγω αύξησης της πίεσης, το νερό αρχίζει να αποβάλλεται προς τις εκατέρωθεν στρώσεις της άμμου. Στην συνέχεια μειώνεται βαθμιαία η πίεση του νερού Δu ενώ αυξάνεται ισόποσα η τάση που παραλαμβάνεται από το στερεό σκελετό, αυξάνεται δηλαδή η ενεργός τάση του εδάφους η ενεργός τάση του εδάφους $\Delta\sigma'$ έτσι ώστε να ισχύει πάντοτε η παραπάνω αρχή.

Η διαδικασία αυτή της μεταφοράς του φορτίου από την υγρή στη στερεή φάση αποτελεί το φαινόμενο της στερεοποίησης και διαρκεί μέχρι να ολοκληρωθεί η αποβολή του νερού, μέχρι να ολοκληρωθεί δηλαδή η στράγγιση της αργίλου. Θεωρητικά η διάρκεια της στερεοποίησης είναι άπειρη.

4.2.2.4 Υπολογισμός καθίζησης σε κανονικά στερεοποιημένη κ υπερστερεοποιημένη άργιλο

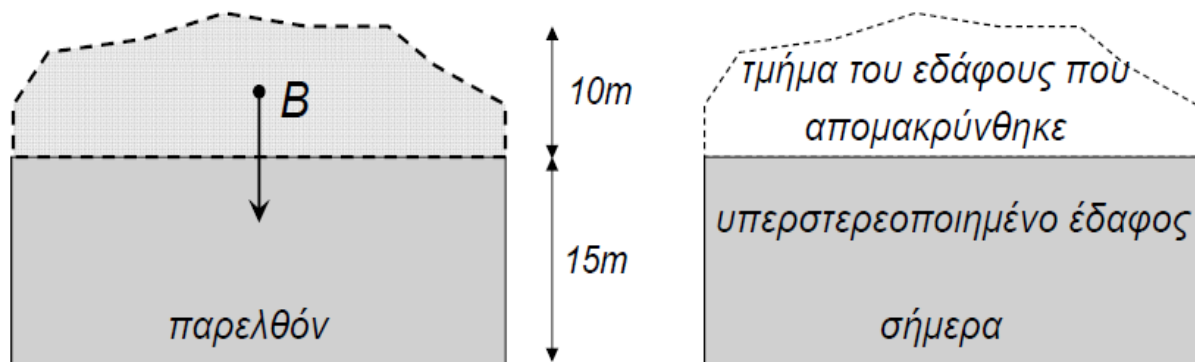
Ανάλογα με το ιστορικό των τάσεων που έχει δεχτεί μια άργιλος καθορίζεται η συμπεριφορά της σε παραμόρφωση (καθίζηση) και διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Κανονικά στερεοποιημένη: Καλείται η άργιλος όταν η τάση που δέχεται στην παρούσα φάση είναι η μεγαλύτερη που έχει δεχτεί ποτέ στην ιστορία της. Η καθίζηση της κανονικά στερεοποιημένης αργίλου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{c,i}}{1 + e_{0,i}} \log \frac{\sigma'_{0,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{0,i}} \right)$$

- Υπερστερεοποιημένη ή υπερπροφορτισμένη: Καλείται η άργιλος όταν στο παρελθόν έχει δεχτεί μεγαλύτερη τάση από αυτήν που δέχεται στην παρούσα φάση. Η μεγαλύτερη τάση που έχει δεχτεί ποτέ καλείται *τάση προστερεοποίησης*. Η καθίζηση της υπερστερεοποιημένης αργίλου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{r,i}}{1 + e_{0,i}} \log \frac{\sigma'_{0,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{0,i}} \right)$$



Σχήμα 4.21 Σχηματική απεικόνιση υπερστερεοποιημένης αργίλου

4.2.2.5 Λόγος υπερστερεοποίησης OCR

Η συμπεριφορά της αργίλου μπορεί να χαρακτηριστεί από τον λόγο υπερστερεοποίησης *OCR*:

$$OCR = \frac{P_c}{P_0}, \quad \text{όπου}$$

- P_c , πίεση που έχει δεχτεί στο παρελθόν
- P_0 , πίεση που δέχεται τώρα

Ανάλογα με τις τιμές του δείκτη υπερστερεοποίησης:

- $OCR > 1$, υπερστερεοποιημένο αργιλικό έδαφος
- $OCR = 1$, κανονικά στερεοποιημένο αργιλικό έδαφος
- $OCR < 1$, υποστερεοποιημένο αργιλικό έδαφος

4.2.2.6 Δείκτες συμπίεστικότητας C_c και C_r

Ο υπολογισμός της καθίζησης λόγω στερεοποίησης γίνεται με χρήση των παραμέτρων συμπίεστικότητας C_c και C_r , από τη λογαριθμική σχέση τάσης – συμπίεσης στη δοκιμή οιδήμετρου.

4.2.2.6.1 Δείκτης συμπίεστικότητας C_c

Από την επεξεργασία του διαγράμματος $e - \log \sigma'$ παρατηρούμε ότι η μεταβολή του δείκτη κενών για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο προκύπτει από τη σχέση

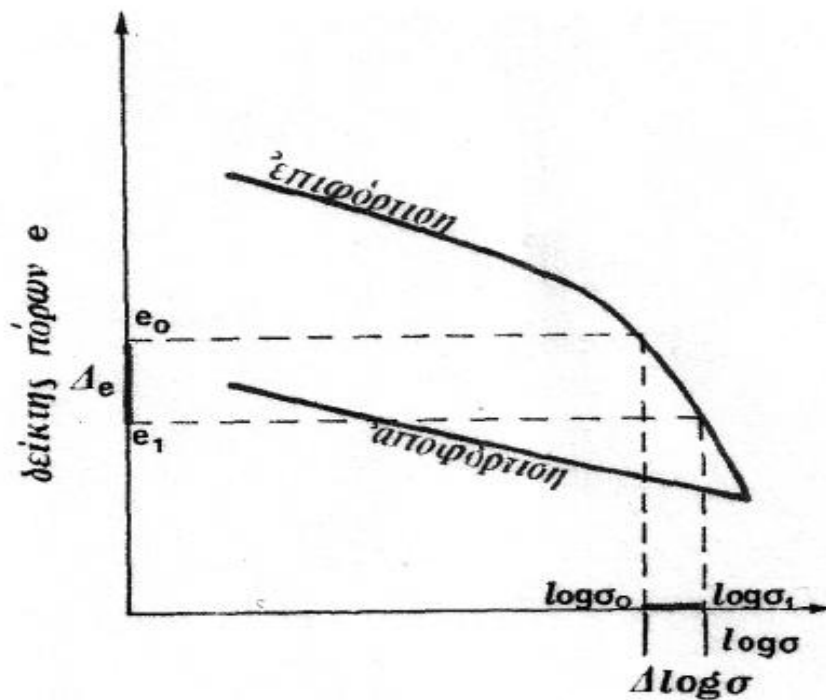
$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

Ο συντελεστής C_c ονομάζεται *δείκτης συμπίεστότητας* και είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος ΒΓ της καμπύλης ΑΒΓ. Ο δείκτης συμπίεστότητας συνδέει την παραμόρφωση με την τάση μέσω της μεταβολής του δείκτη πόρων. Προσδιορίζεται εργαστηριακά αλλά δίνεται και από εμπειρικές σχέσεις όπως:

$$C_c = 0,009 (w_L - 10\%) , \quad (Terzaghi)$$

$$C_c = 0,540 (e_0 - 0,35) , \quad (Nishida)$$

$$C_c = 0,014 (w - 13,4\%) , \quad (Nishida)$$

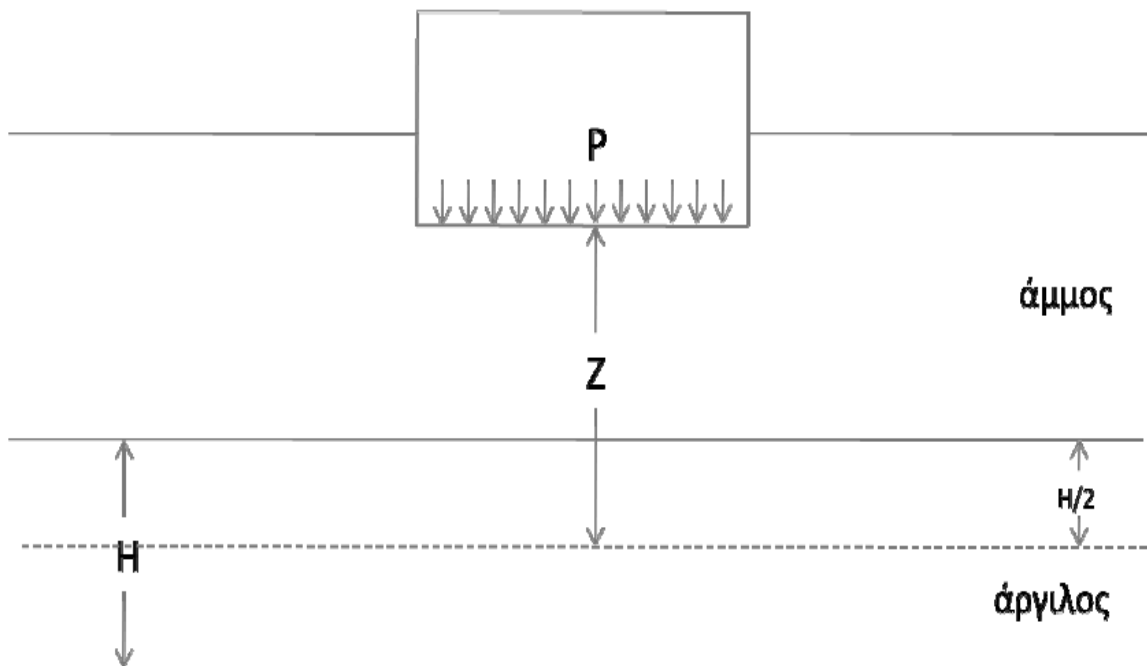


Σχήμα 4.22 Διάγραμμα $e - \Delta \log \sigma$

Με τον δείκτη συμπίεστότητας C_c μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος των καθιζήσεων στο στρώμα που εξετάζουμε, με την μέθοδο που περιγράφεται παρακάτω.

Η ένταση της κατακόρυφης πίεσης κατά μήκος οποιασδήποτε κατακόρυφου γραμμής, που ξεκινά κάτω από κατανεμημένο φορτίο, μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος z από την επιφάνεια φόρτισης. Επομένως, εάν η συμπίεστη στρώση έχει μεγάλο πάχος, η κατακόρυφη πίεση μειώνεται σε αυτή σημαντικά, από την ανώτερη επιφάνεια μέχρι τη βάση της. Η συμπίεση όμως στρώσης με μικρό

πάχος, εξαρτάται μόνο από την μέση κατακόρυφη πίεση, η οποία προσεγγιστικά είναι ίση με εκείνη που επιβάλλεται στο μέσο του ύψους της στρώσης. Συνεπώς, εάν η συμπιεστή στρώση έχει μικρό πάχος, μπορεί η μεταβολή της πίεσης με το βάθος να μην ληφθεί υπ' όψιν και να υπολογιστεί εκείνη που αντιστοιχεί στο μέσον του πάχους της στρώσης, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση που το συμπιεστό εδαφικό στρώμα είναι μεγάλου πάχους H , τότε χωρίζεται σε n στρώματα μικρού πάχους.



Σχήμα 4.23 Η καθίζηση σε βάθος z από την επιφάνεια κατανεμημένης φόρτισης

Η τιμή της καθίζησης αργλικού στρώματος λόγω στερεοποίησης, δίνεται από τη σχέση:

$$S = H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}, \quad \text{όπου:}$$

- H , το ύψος της αργλικής στρώσης
- C_c , ο δείκτης συμπιεστότητας του εδάφους
- e_0 , ο αρχικός δείκτης κενών του εδάφους

- σ_0 , η αρχική εντατική κατάσταση (πριν την θεμελίωση)
- Δs , η επιφόρτιση από την κατασκευή (στο μέσον του πάχους της στρώσης)

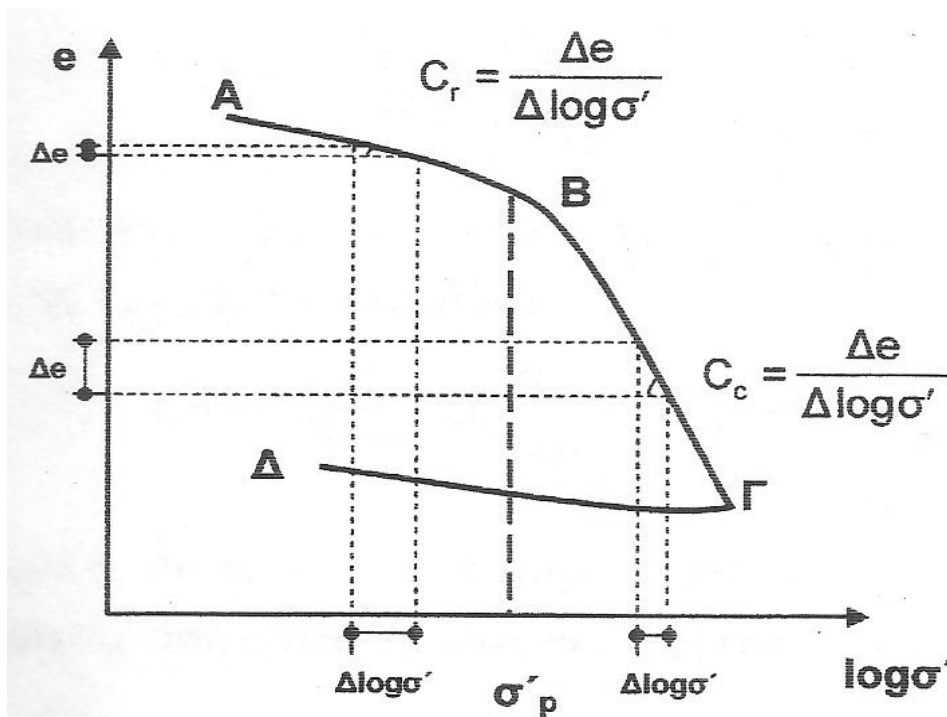
4.2.2.6.2 Δείκτης συμπίεστικότητας C_r

Από την επεξεργασία του διαγράμματος $e - \log \sigma'$ παρατηρούμε ότι:

- Η μεταβολή του δείκτη κενών για υπερστερεοποιημένη άργιλο προκύπτει από τη σχέση:

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

Ο συντελεστής C_r ονομάζεται *δείκτης συμπίεστικότητας σε επαναφόρτιση* και είναι η μέση κλίση του καμπύλου τμήματος AB.



Σχήμα 4.24 Δείκτης συμπίεστικότητας C_c και δείκτης συμπίεστικότητας σε επαναφόρτιση C_r

4.2.2.7 Δείκτης διόγκωσης C_s

Κατά τον ίδιο τρόπο ορίζεται ο δείκτης διόγκωσης C_s :

$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

Που αντιστοιχεί στην αποφόρτιση της αργίλου (τμήμα ΓΔ). Στη φάση αυτή έχουμε αύξηση του όγκου της αργίλου (διόγκωση).

Μπορεί να θεωρηθεί ότι ο δείκτης διόγκωσης C_s είναι περίπου ίσος με τον δείκτη συμπίεστικότητας σε επαναφόρτιση C_r . Ο δείκτης συμπίεστικότητας σε επαναφόρτιση C_r προσδιορίζεται εργαστηριακά και είναι σημαντικά μικρότερος από τον δείκτη συμπίεστικότητας C_c .

$$C_s \approx \frac{1}{5} \quad \text{έως} \quad \frac{1}{10} C_c$$

Το σταθερό φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο στο συμπιεσόμετρο, διπλασιάζεται κάθε 24 ώρες και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Μπορούμε συνολικά να επιβάλλουμε 12 με 13 φορτίσεις και ενδιάμεσα να κάνουμε αποφορτίσεις. Από κάθε φόρτιση υπολογίζουμε ένα μέσο δείκτη κενών e του δοκιμίου.

Όπως είδαμε η τελική καθίζηση στη δοκιμή συμπιεσόμετρου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Για υπερστερεοποιημένες αργίλους, όταν δηλαδή η άργιλος έχει δεχτεί μεγαλύτερη τάση από την παρούσα αρχική αλλά και από την τελική τάση (μετά την επιβολή του φορτίου), η μεταβολή του δείκτη πόρων στη σχέση μπορεί να αντικατασταθεί από την παρακάτω σχέση και η τελική καθίζηση να προκύψει ως εξής:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{C_r \Delta \log \sigma'}{1 + e_0}$$

Από την οποία προκύπτει:

$$\Delta H = C_r \frac{H_0}{1 + e_0} \Delta \log \sigma' = C_r \frac{H_0}{1 + e_0} (\log \sigma'_{\tau\epsilon\lambda} - \log \sigma'_{\alpha\rho\chi})$$

Όπου τελικά:

$$\Delta H = C_r \frac{H_0}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{\tau\epsilon\lambda}}{\sigma'_{\alpha\rho\chi}}$$

Για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, όταν δηλαδή η παρούσα αρχική ενεργός τάση είναι η μεγαλύτερη που έχει δεχτεί ποτέ η άργιλος, τότε η τελική καθίζηση προκύπτει με ανάλογο τρόπο:

$$\Delta H = C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{\tau\epsilon\lambda}}{\sigma'_{\alpha\rho\chi}}$$

Στην περίπτωση όπου : $\sigma'_{\alpha\rho\chi} < \sigma'_p$ αλλά $\sigma'_p < \sigma'_{\tau\epsilon\lambda}$ τότε η καθίζηση γίνεται με επαλληλία των δύο περιπτώσεων:

$$\Delta H = C_r \frac{H_0}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{\alpha\rho\chi}} + C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{\tau\epsilon\lambda}}{\sigma'_p}$$

Είναι προφανές ότι οι καθιζήσεις στην υπερστερεοποιημένη άργιλο είναι πολύ μικρότερες από αυτές της κανονικά στερεοποιημένης.

4.2.2.8 Συντελεστής στερεοποίησης C_v

Η στερεοποίηση μπορεί να χαρακτηριστεί με τρόπο ικανοποιητικό και από τον συντελεστή στερεοποίησης C_v .

$$C_v = \frac{K}{m_v} \frac{1}{\gamma_w} \quad (cm^2/sec)$$

Η στερεοποίηση επιταχύνεται όταν η διαπερατότητα του εδάφους που χαρακτηρίζεται από τη τιμή του συντελεστή K είναι υψηλή καθώς και όταν η συμπιεστότητα που χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή συμπιεστότητας σε όγκο m_v είναι χαμηλή.

$$m_v = \frac{\alpha_v}{1 + e}$$

Ο συντελεστής m_v ονομάζεται δίνει την καθίζηση στρώσης μοναδιαίου πάχους για μοναδιαία αύξηση τάσης.

Όταν η τιμή του δείκτη πόρων μειώνεται, εξαιτίας της επιβαλλόμενης φόρτισης, οι συντελεστές K και m_v μεταβάλλονται με ανάλογο τρόπο και ο λόγος τους

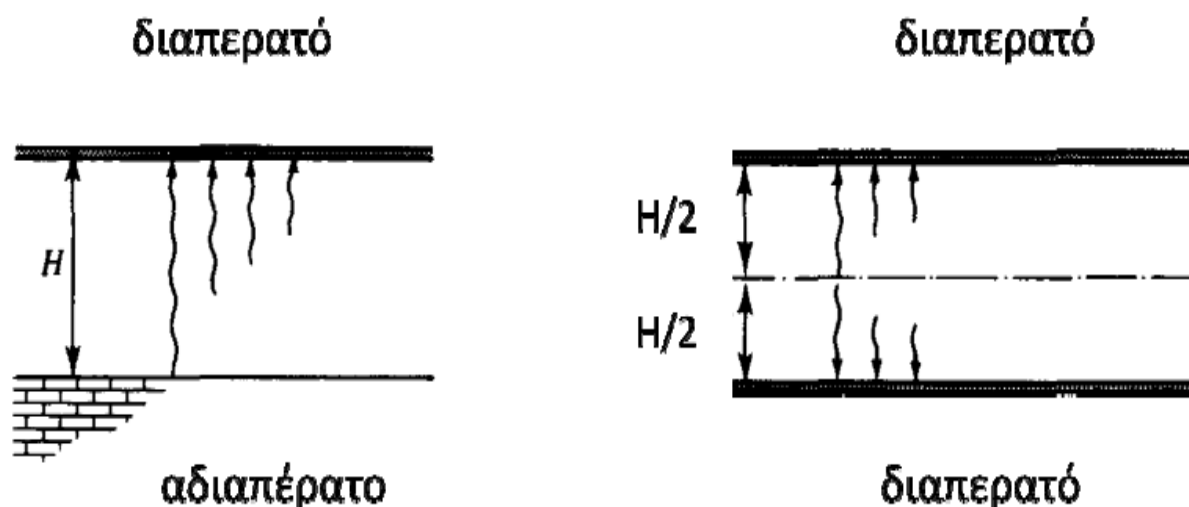
παραμένει σχετικά σταθερός. Ο συντελεστής C_v μπορεί να θεωρηθεί έτσι ότι παραμένει αμετάβλητος σε όλη τη διάρκεια της στερεοποίησης.

Η τιμή του συντελεστή στερεοποίησης C_v εξαρτάται όμως από το μέγεθος του φορτίου και είναι προτιμότερο να γίνεται ο προσδιορισμός του στο εργαστήριο σε φόρτιση για την οποία θα γίνει η μελέτη της στερεοποίησης του εδάφους.

4.2.2.8.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του συντελεστή στερεοποίησης C_v

Οι συνηθέστερες μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή στερεοποίησης είναι η, η μέθοδος του *λογάριθμου χρόνου* (μέθοδος Casagrande) και η μέθοδος της *τετραγωνικής ρίζας του χρόνου*. Βασική παραδοχή των τριών μεθόδων για τον προσδιορισμό του C_v είναι η σύμπτωση της θεωρητικής και της πειραματικής καμπύλης της στερεοποίησης η οποία προκύπτει από την αναλυτική επίλυση της εξίσωσης της στερεοποίησης. Ο προσδιορισμός του C_v γίνεται από τη δοκιμή στερεοποίησης για δεδομένο φορτίο παρακολουθώντας και καταγράφοντας τη συμπίεση του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου.

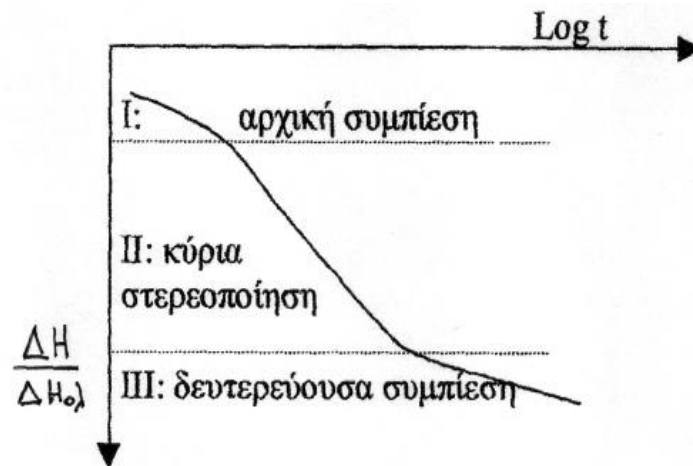
Με τα δεδομένα των μετρήσεων από το συμπιεσόμετρο κατασκευάζουμε το διάγραμμα καθιζήσεων στον λογάριθμο του χρόνου ($\log t - d$) και υπολογίζουμε μεταξύ των άλλων τον συντελεστή στερεοποίησης C_v . Με τον συντελεστή στερεοποίησης μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο στον οποίο θα ολοκληρωθούν οι καθιζήσεις στη στρώση εδάφους που εξετάζουμε.



Σχήμα 4.25 Αποστράγγιση σε βάθος H διαπερατής – αδιαπέρατης εδαφικής στρώσης

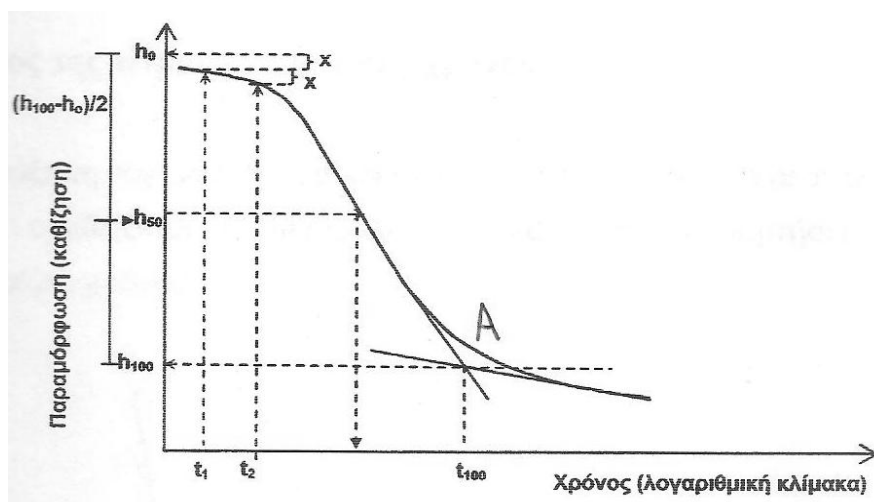
4.2.2.8.2 Η μέθοδος του λογάριθμου χρόνου (μέθοδος Casagrande)

Ο συντελεστής στερεοποίησης C_v μπορεί να προσδιοριστεί από την καμπύλη βράχυνσης – χρόνου που προκύπτει από την εφαρμογή κάθε φορτίου στη δοκιμή στερεοποίησης. Μια τυπική καμπύλη βράχυνσης – χρόνου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.26 Τυπική καμπύλη βράχυνσης – χρόνου

Όπως ήδη έχουμε δει, για κάθε αύξηση του φορτίου $\Delta\sigma$ και ως ότου περατωθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου προκύπτουν οι καμπύλες της εξέλιξης της καθίζησης (συμπίεσης) συναρτήσει του λογάριθμου χρόνου της μορφής:



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα μεθόδου λογάριθμου χρόνου

Για τον προσδιορισμό του C_v ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

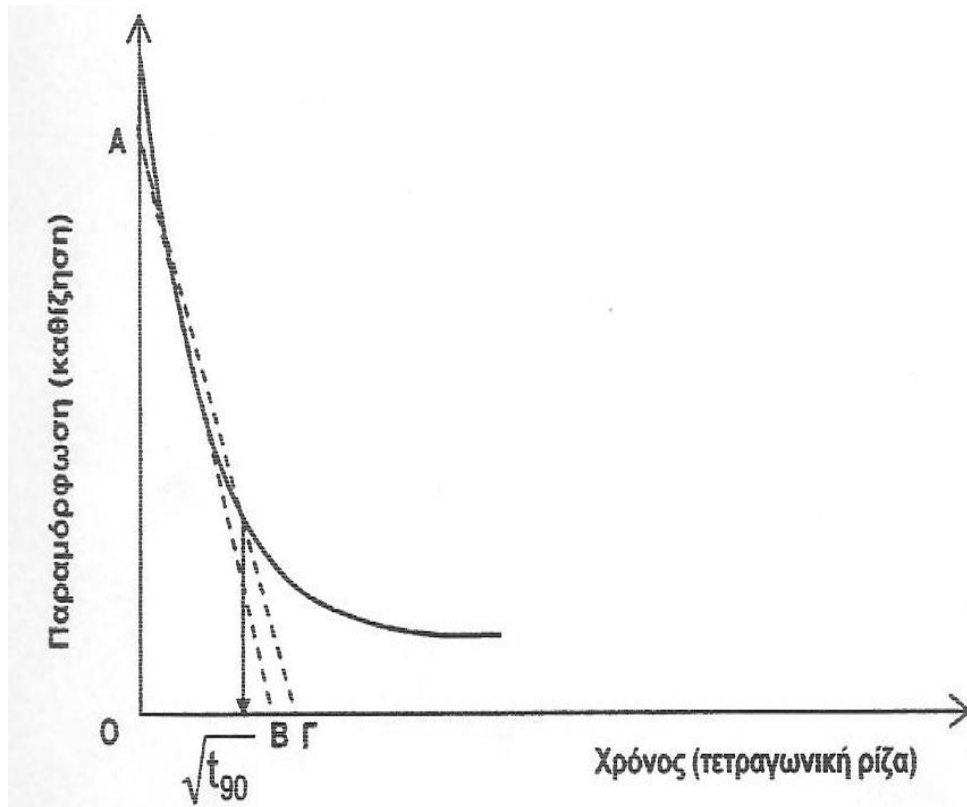
1. Προεκτείνουμε τα δύο ευθύγραμμα τμήματα πρωτεύουσας και δευτερεύουσας στερεοποίησης. Το σημείο A στο οποίο τέμνονται δεχόμαστε ότι αντιστοιχεί σε στερεοποίηση $U = 100\%$ και έχει συντεταγμένες $a_{100}(t_{100}, h_{100})$.
2. Επιλέγουμε τα σημεία $t_1 = 1\text{min}$ και $t_2 = 4\text{min}$. Αυτά ορίζουν τις καθιζήσεις h_1 και h_2 αντίστοιχα.
3. Παίρνουμε πάνω στον άξονα των καθιζήσεων κατακόρυφη απόσταση πάνω από το t_1 ίση με $h_1 - h_2$ και προσδιορίζουμε το σημείο h_0 που αντιστοιχεί σε μηδενική καθίζηση.
4. Η απόσταση $h_0 - h_{100}$ είναι το σύνολο της πρωτεύουσας στερεοποίησης του δείγματος. Το μισό της στερεοποίησης h_{50} βρίσκεται προφανώς στη μέση της απόστασης $h_0 - h_{100}$ και αντιστοιχεί σε χρόνο t_{50} .
5. Από τον πίνακα (ταδε) ή από το σχήμα (ταδε) για βαθμό στερεοποίησης $U = 50\%$ προκύπτει $T_v = 0.197$. Έχουμε επίσης ότι $T_v = C_v t / H^2$ όπου τελικά προκύπτει:

$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

Όπου H το ύψος του δοκιμίου ή το μισό ύψος του δοκιμίου αναλόγως με τις συνθήκες στράγγισης (όταν η αποστράγγιση γίνεται μόνο από το ένα όριο ή και από τα δύο).

4.2.2.8.3 Η μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας χρόνου

Για κάθε αύξηση του φορτίου $\Delta\sigma$ και έως ότου περατωθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου σχεδιάζεται η μεταβολή της καθίζησης συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας χρόνου.



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα μεθόδου τετραγωνικής ρίζας χρόνου

Για τον προσδιορισμό του C_v ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Προεκτείνουμε το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης έως ότου μεί τον άξονα των καθιζήσεων στο σημείο Α.
2. Φέρουμε την ευθεία ΑΓ έτσι ώστε $ΟΓ = 1.150B$. Το σημείο τομής της ευθείας ΑΓ με την καμπύλη στερεοποίησης αντιστοιχεί στην τετραγωνική ρίζα του χρόνου που αντιστοιχεί σε καθίζηση 90%.
3. Από τον πίνακα (ταδε) ή από το σχήμα (ταδε) για βαθμό στερεοποίησης $U = 90\%$ προκύπτει $T_v = 0.848$. Έχουμε επίσης ότι $T_v = C_v t / H^2$ όπου τελικά προκύπτει:

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$$

Όπου H το ύψος του δοκιμίου ή το μισό ύψος του δοκιμίου αναλόγως με τις συνθήκες στράγγισης (μία ή δύο επιφάνειες στράγγισης αντίστοιχα).

4.2.2.9 Βαθμός στερεοποίησης $U(T_V)$

Εισάγωντας τους αδιάστατους συντελεστές Z και T_V στην εξίσωση της θεωρίας της μονοδιάστατης στερεοποίησης:

- $T_V = \frac{c_V t}{H^2}$, ο χρονικός συντελεστής.
- $Z = \frac{z}{H}$, με H το μισό πάχος ($H=d/2$) της αργλικής στρώσης αν έχουμε στράγγιση και από τα δύο όρια της στρώσης ή όλο το πάχος ($H=d$) αν έχουμε στράγγιση μόνον από το ένα όριο.

Προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial Z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial T_V}$$

Λύνοντας την εξίσωση αυτή με τις οριακές συνθήκες, δηλαδή:

- Στον πυθμένα ($Z=0$) και στην κορυφή ($Z=2$) του αργλικού στρώματος διπλής στράγγισης και για όλους τους χρόνους t , η υπερπίεση είναι πάντα δυναμική και η πίεση u ίση με την αρχική u_0 .

$$u_e = 0$$

- Σε όλο το πάχος του αργλικού στρώματος ($0 \leq Z \leq 2$) η υπερπίεση τη χρονική στιγμή της επιβολής του φορτίου είναι ίση με μια αρχική τιμή u_{e0} .

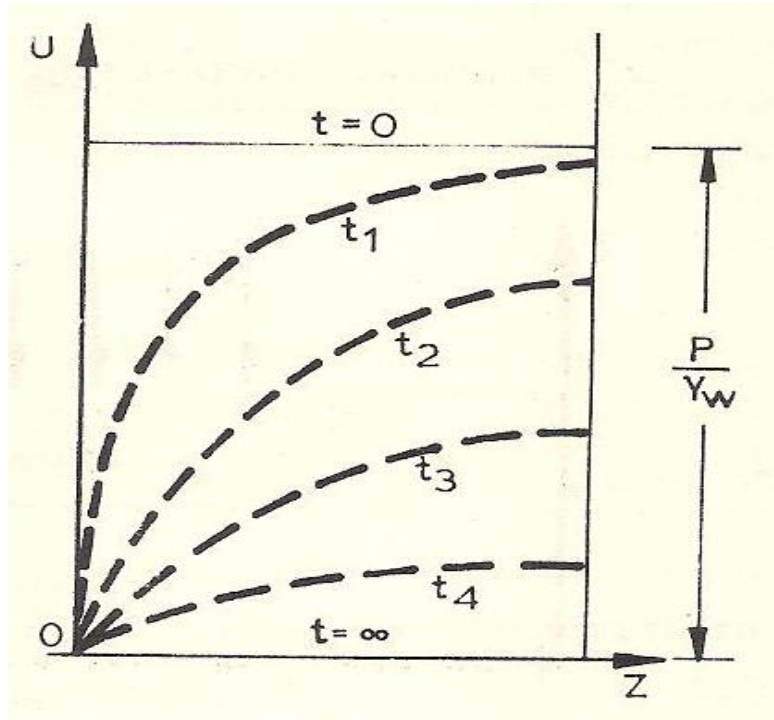
$$u_e = u_{e0}$$

Προκύπτει η εξίσωση:

$$u_e(t) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_{e0}}{M} (\sin MZ) e^{-M^2 T_V}, \quad \text{όπου:}$$

- $M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$
- $m = 1, 2, 3 \dots, \infty$

Η εξίσωση αυτή είναι της μορφής $u = f(Z, T_v)$ και μπορεί να παρασταθεί υπό τη μορφή καμπυλών συναρτήσεων των T_v και Z . Για κάθε τιμή του T_v έχουμε μια ισόχρονη καμπύλη του παρακάτω σχήματος, της οποίας η εξίσωση είναι $u = f(T)$.



Σχήμα 4.29 Ισόχρονες καμπύλες του βαθμού στερεοποίησης

Η καθίζηση στο χρόνο T_v είναι ίση με $S_T = [p - f(T)]H m_v$ ενώ μετά από πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, όταν η πίεση των πόρων έχει επανέλθει στις αρχικές συνθήκες, δηλαδή σε χρόνο T_∞ όπου $u = 0$, η εξίσωση είναι $S_\infty = H p m_v$.

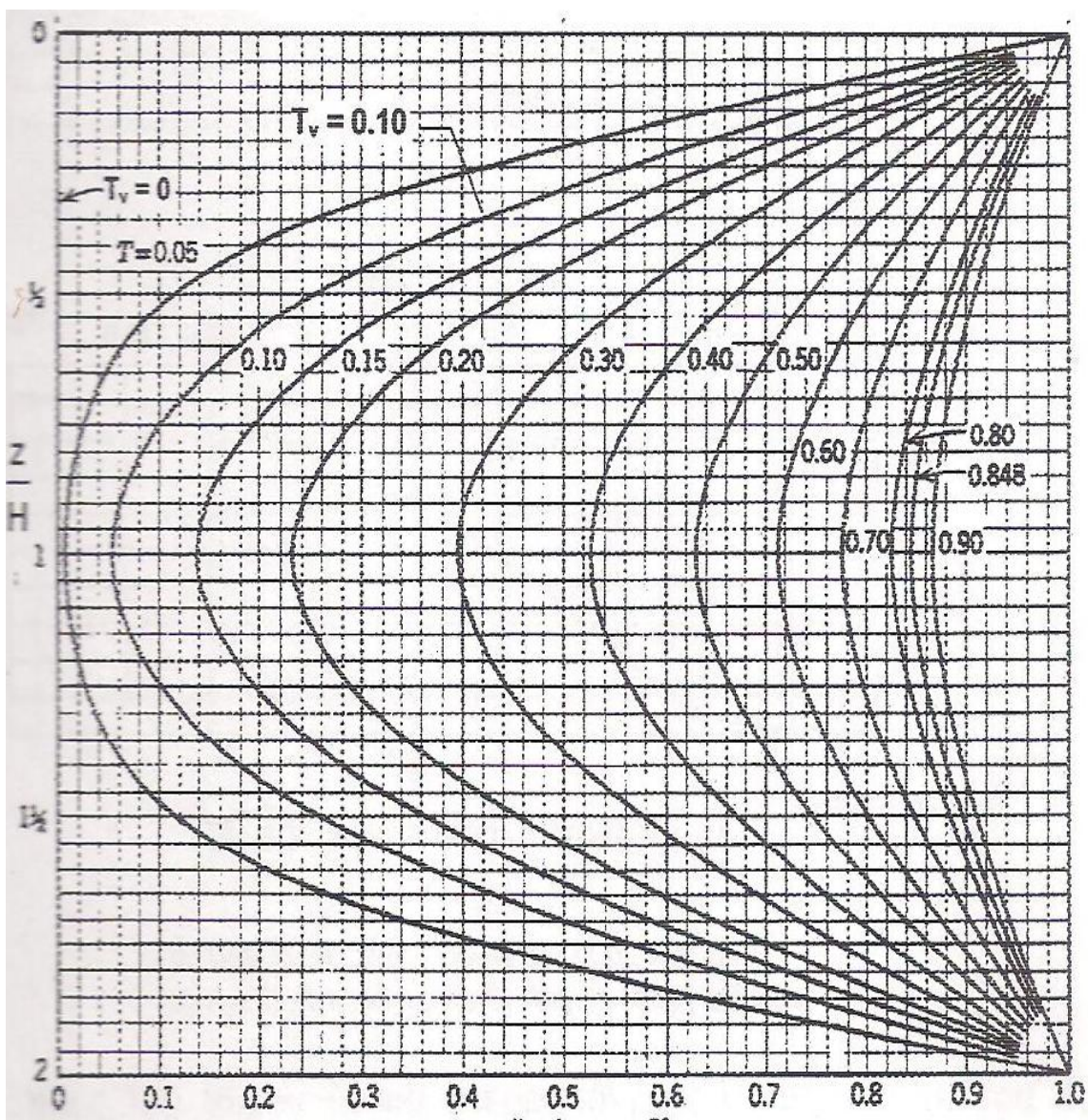
Εφόσον η μόνη μεταβλητή που έχουμε είναι ο χρόνος T , προκύπτει τελικά η εξίσωση:

$$S_T = S_\infty \frac{U(T_v)}{100} \quad \text{ή} \quad U(T_v) = \frac{S_T}{S_\infty} (\%)$$

Όπου $U(T_v)$ είναι ο βαθμός στερεοποίησης της εδαφικής στρώσης και εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό.

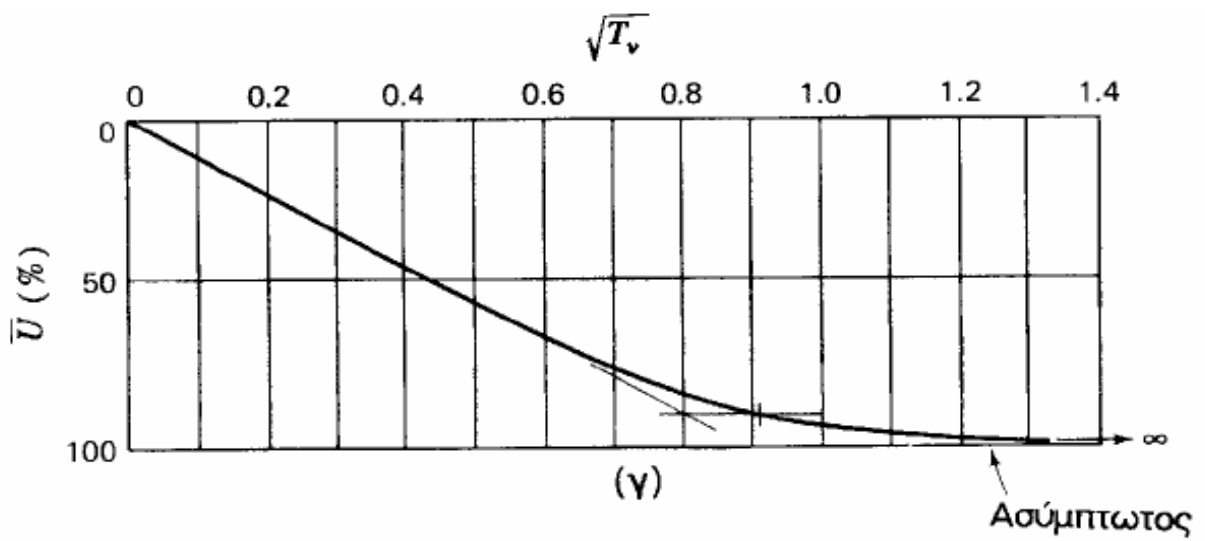
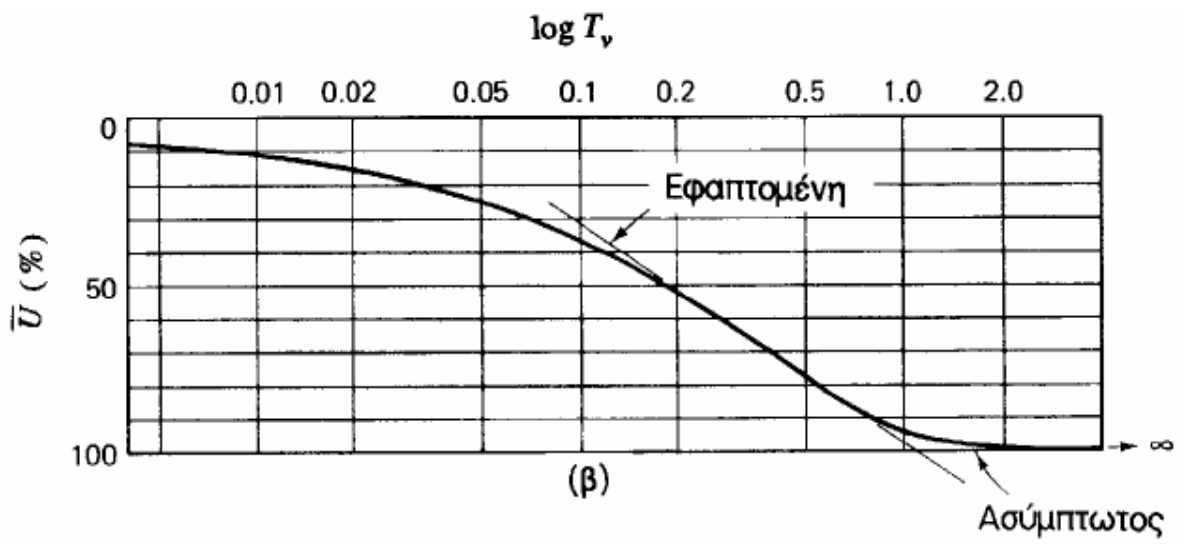
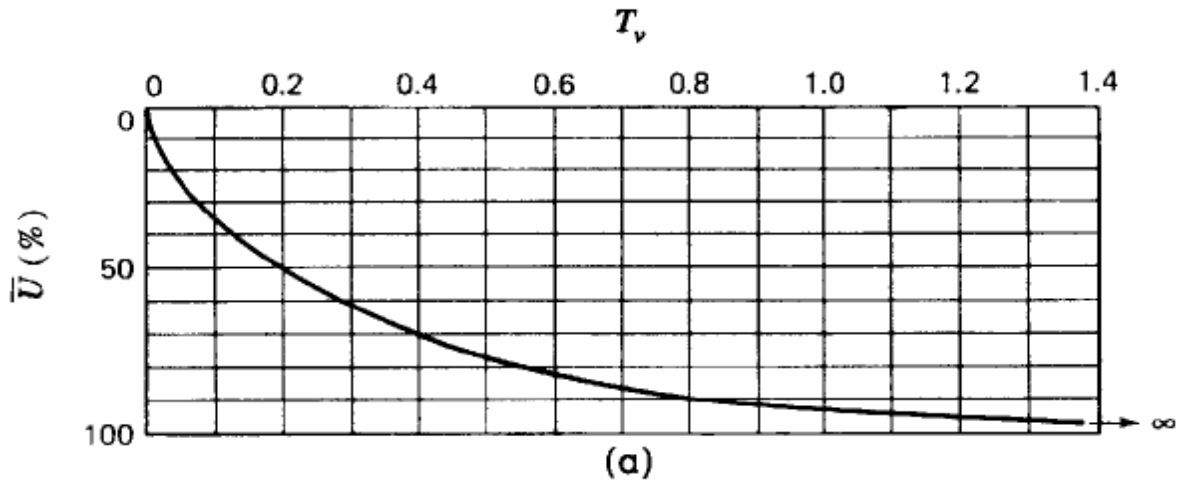
Η τιμή της συνάρτησης $U(T_v)$ έχει υπολογιστεί και δίνεται σε νομογραφήματα και πίνακες.

Στο παρακάτω διάγραμμα μπορεί κανείς να υπολογίσει σε οποιοδήποτε σημείο της αργλικής στρώσης και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή το βαθμό της στερεοποίησης.



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα μεταβολής βαθμού στερεοποίησης $U(T_v)$

Η μεταβολή του βαθμού στερεοποίησης συναρτήσει του χρονικού συντελεστή T_v φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα.



Επίσης οι τιμές του μέσου λόγου στερεοποίησης U συναρτήσει του χρονικού συντελεστή T_v για σταθερή κατανομή του u_{e0} δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v
0	0	35	0.096	70	0.403
5	0.002	40	0.126	75	0.477
10	0.008	45	0.159	80	0.567
15	0.018	50	0.197	85	0.684
20	0.031	55	0.239	90	0.848
25	0.049	60	0.286	95	1.129
30	0.071	65	0.340	100	∞

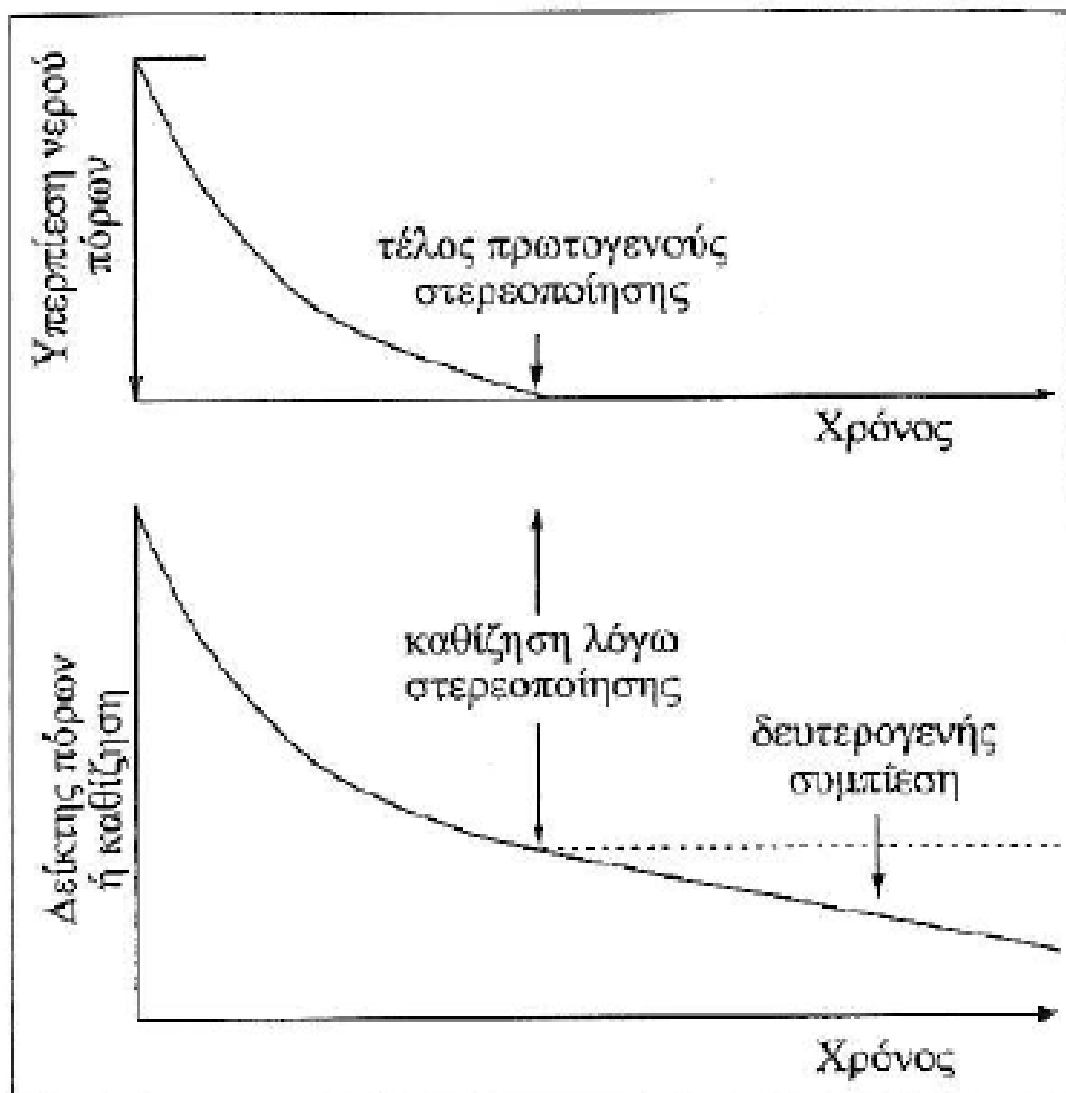
Πίνακας 4.1 Τιμές βαθμού στερεοποίησης U για διάφορες τιμές T_v

4.2.3 Δευτερογενής καθίζηση λόγω ερπυσμού

Η καθίζηση μπορεί να συνεχιστεί με σταθερό φορτίο και αφού τελειώσει η στερεοποίηση. Σε μερικούς τύπους εδαφών, έχει διαπιστωθεί ότι οι μειώσεις του όγκου άρα και οι καθιζήσεις μπορεί να συνεχιστούν και αφού ολοκληρωθεί η πρωτογενής στερεοποίηση.

Το φαινόμενο αυτό λέγεται δευτερογενής συμπίεση και προκαλεί ερπυστικού τύπου παραμορφώσεις καθώς και περαιτέρω μείωση του λόγου κενών του εδάφους υπό σταθερό φορτίο, παρά την πλήρη εκτόνωση των υπερπλίσεων πόρων που έχει προκαλέσει από την αρχή το φορτίο αυτό. Ο ερπυσμός λόγω στράγγισης μπορεί να αποτελείται και από ογκομετρικές και από διατμητικές παραμορφώσεις. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται εντονότερα στις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους υψηλής πλαστικότητας και στα οργανικά εδάφη. Η δευτερογενής συμπίεση θεωρείται ότι αρχίζει μετά το τέλος της πρωτογενούς στερεοποίησης και μειώνεται εκθετικά με το χρόνο.

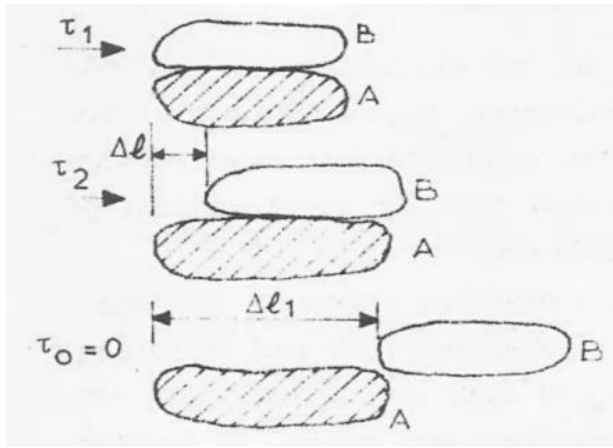
Έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί και προσομοιώματα για την ερμηνεία του φαινομένου, αλλά φαίνεται πως είναι πιθανότερο ότι σχετίζεται με μια ανακατανομή της αλληλεπίδρασης των δυνάμεων μεταξύ των κόκκων, η οποία ακολουθεί τις μεγάλες δομικές αναδιατάξεις που συμβαίνουν στην διάρκεια του σταδίου φόρτισης της κανονικής στερεοποίησης. Αυτή η υπόθεση ενισχύεται από το γεγονός ότι οι δευτερογενείς καθιζήσεις είναι ασήμαντες για πιέσεις κάτω από το επίπεδο προστερεοποίησης όταν δηλαδή το έδαφος είναι προστερεοποιημένο και συμβαίνουν κυρίως ελαστικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.31 Η εξέλιξη της δευτερογενής συμπίεσης μετά τη στερεοποίηση

Μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της συμπιεστότητας του υπεδάφους και κατα επέκταση των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής ενός έργου, είναι και η προφόρτιση, κυρίως αργιλικών εδαφών, με σκοπό την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων από στερεοποίηση πριν από την κατασκευή του έργου. Η διαδικασία της προφόρτισης συχνά επιταχύνεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή και αύξηση του ύψους της προφόρτισης, εφόσον η φέρουσα ικανότητα του εδάφους το επιτρέπει. Παρόλο αυτά, παρατηρείται πολλές φορές ότι οι καθιζήσεις από στερεοποίηση συνεχίζονται και μετά την κατασκευή του έργου, χωρίς να έχουν ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια της προφόρτισης.

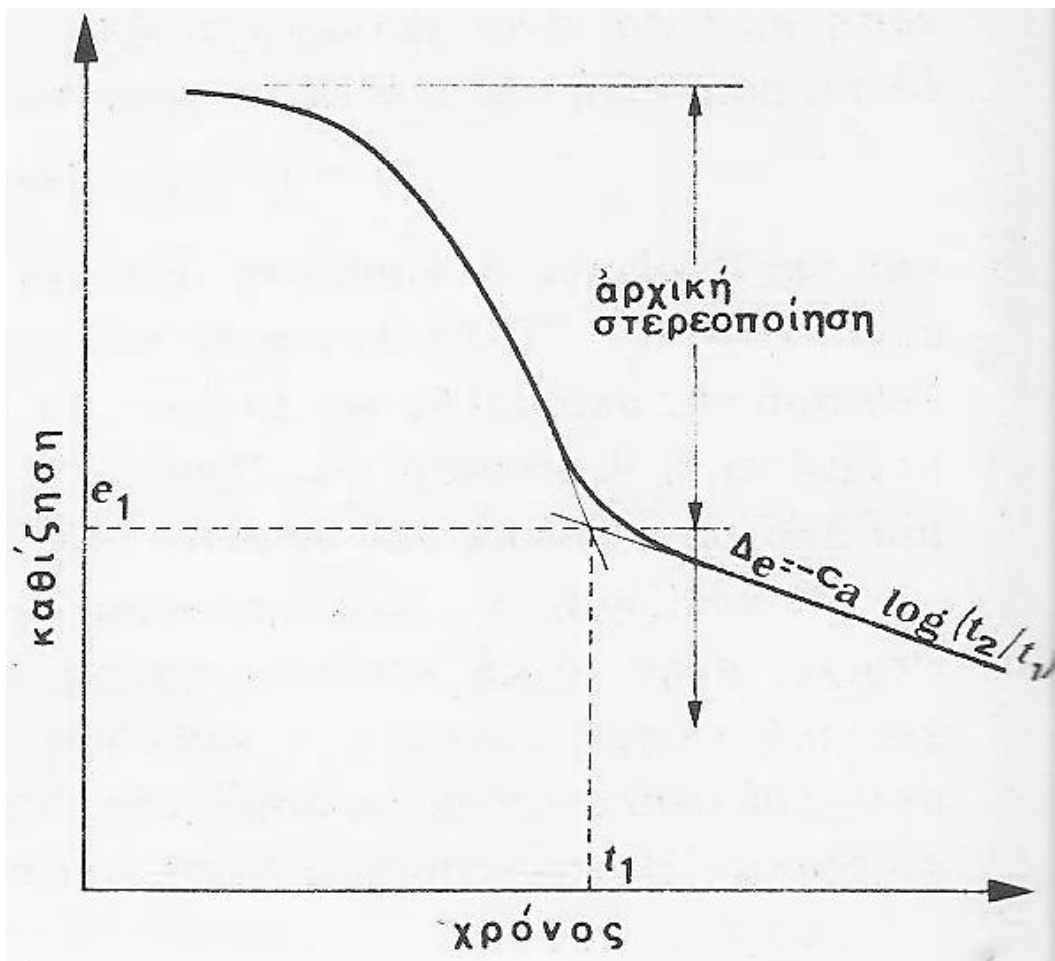
Το φαινόμενο της δευτερεύουσας στερεοποίησης μπορεί να εξηγηθεί σχηματικά με τη μελέτη της σχετικής μετατόπισης των κόκκων του εδάφους, που στην περίπτωση της αργίλου έχουν μακρόστενη μορφή.



Ο κόκκος Β γλυστρά με σταθερό διατμητικό φορτίο τ_1 πάνω από τον κόκκο Α. Αυτό προκαλεί την μετατόπιση Δl που μπορεί να φτάσει μέχρι μια μέγιστη τιμή Δl_1 , ίση περίπου με το μήκος των κόκκων, οπότε μηδενίζεται και η διατμητική δύναμη.

Η μελέτη της δευτερεύουσας στερεοποίησης και του μηχανισμού του ερπυσμού δεν μπορεί να γίνει με τρόπο ικανοποιητικό.

Από εργαστηριακές δοκιμές προκύπτει ότι, αφού ολοκληρωθεί η κύρια (αρχική) στερεοποίηση σε χρόνο t_1 , η μεταβολή του δείκτη πόρων και της καθίζησης συνεχίζεται με τρόπο γραμμικό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.32 Η μεταβολή του δείκτη πόρων και καθίζησης συναρτήσει του χρόνου

Η δευτερεύουσα καθίζηση χαρακτηρίζεται έτσι από την κλίση C_α των ευθύγραμμων αυτών τμημάτων και συνεπώς μετά από t_2 έτη θα έχουμε μια ολική μεταβολή του δείκτη πόρων:

$$\Delta e = C_\alpha \log \frac{t_2}{t_1}$$

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς τη κλίση C_α προκύπτει ο *Δείκτης δευτερογενούς συμπίεσης*.

4.2.3.1 Δείκτης δευτερογενούς στερεοποίησης (συμπίεσης)

Η δευτερογενής στερεοποίηση εκφράζεται αριθμητικά από τον *δείκτη δευτερογενούς συμπίεσης* C_α , ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}}$$

Έχει παρατηρηθεί ότι το C_α αυξάνει με την πλαστικότητα και το ποσοστό οργανικών του εδάφους ενώ αντίθετα μειώνεται με το βαθμό προστερεοποίησης και το βαθμό διαγένεσης του εδάφους. Επιπλέον ο C_α μεταβάλλεται γενικά με το λογάριθμο του χρόνου υπό σταθερό φορτίο, ανάλογα με το πεδίο των τάσεων (αυξάνεται για τάσεις κοντά στην πίεση προστερεοποίησης ενώ μειώνεται για τάσεις αρκετά μεγαλύτερες από αυτήν).

Κεφάλαιο 5^ο

Αναφορές καθιζήσεων στον Ελλαδικό χώρο

Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από γεωμορφολογική και γεωλογική πολυμορφία. Το γεγονός αυτό εξηγεί το μεγάλο αριθμό καθιζήσεων.

Ειδικότερα τα αίτια που οδηγούν στη συχνή εμφάνιση των καθιζήσεων στην Ελλάδα είναι τα εξής:

- Οι μεγάλες μορφολογικές κλίσεις σε πολλά σημεία της χώρας.
- Η έντονη τεκτονική παραμόρφωση. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και συνδέεται και με την υψηλή σεισμικότητα της χώρας μας.
- Τα μικρά μεγέθη των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών.
- Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες συχνά γίνονται αλόγιστα και χωρίς μελέτη ή προγραμματισμό και οδηγούν στην αποψίλωση των δασών, στην άστοχη διαμόρφωση ή στην αφαίρεση της υποστήριξης των πρανών, στην υπεράντληση των υδροφόρων οριζόντων κ.α.

5.1 Καθιζήσεις στο Ροπωτό Τρικάλων (23/02/2010)

Το μισό χωριό στο Ροπωτό χάθηκε από τον χάρτη της Ελλάδος όπου το έδαφος υπέστη καθίζηση, μετά από έντονες βροχοπτώσεις των τελευταίων ημερών στην περιοχή. Έντρομοι οι κάτοικοι έβλεπαν την κεντρική Εκκλησία του χωριού και περίπου 50 σπίτια να βυθίζονται, ενώ υπήρχαν και ανησυχίες για μια μεγαλύτερη καθίζηση η οποία θα βύθιζε ολόκληρο το μέρος του χωριού πάνω από την εκκλησία.



Εικόνα 5.1 Καθιζήσεις στο χωριό Ροπώτο Τρικάλων

Το οδικό δίκτυο και τα σπίτια είχαν υποστεί σοβαρές καταστροφές ενώ βλάβες είχε υποστεί και δίκτυο ηλεκτροδότησης της Δ.Ε.Η. Ένας μετασχηματιστής είχε παρασυρθεί από την καθίζηση με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί και πρόσθετος κίνδυνος λόγω ηλεκτροπληξίας από τα ηλεκτροφόρα καλώδια.



Εικόνα 5.2 Καθιζήσεις στο χωριό Ροπώτο Τρικάλων

5.2 Καθίζηση στους Μουζακέους Ιωαννίνων (28/11/2010)

Καθίζηση δημιουργήθηκε μετά από μεγάλη βροχόπτωση στην Ήπειρο και ειδικότερα στους Μουζακέους Ιωαννίνων 25 χιλιόμετρα έξω από την πόλη. Συγκεκριμένα το Πνευματικό κέντρο του χωριού κατεστράφη ολοσχερώς, βουλιάζοντας μέσα στο ρήγμα το οποίο προκλήθηκε από μεγάλης έκτασης καθίζηση. Ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι και μεγάλη αγροτική έκταση έπαθαν μεγάλες ζημιές από τις καθιζήσεις, ενώ δέντρα και αποθήκες μετατοπίστηκαν.



Εικόνα 5.3 Καθίζηση δρόμου στους Μουζακέους Ιωαννίνων

Με έγγραφο του προς τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας ο Νομάρχης Ιωαννίνων κ. Αλέξανδρος Καχριμάνης, ζήτησε την κήρυξη του Νομού σε Κατάσταση Έκτακτης Ανάγκης Πολιτικής Προστασίας και παράλληλα την άμεση παρέμβασή της, για τη χορήγηση των απαιτούμενων πιστώσεων για την εκτέλεση των αναγκαίων έργων υποδομής και για την αποκατάσταση των ζημιών των πλημμυροπαθών.

5.3 Καθιζήσεις στο ορεινό της Ζαχάρως (08/02/2011)

Σοβαρά προβλήματα αντιμετώπισε το ορεινό δίκτυο στη Ζαχάρω του νομού Ηλείας. Οι δρόμοι προς Αρτέμιδα και Μάκιστο είχαν υποστεί καθιζήσεις σε αρκετά σημεία και οι μετακινήσεις των πολιτών γινόταν μόνο με αγροτικά μηχανήματα. Καθιζήσεις παρατηρήθηκαν και στο δρόμο που οδηγεί προς την κοινότητα Σμέρνα και στα χωριά Βίρνα και Ξηροχώρι.



Εικόνα 5.4 Καθίζηση στη περιοχή της Ζαχάρως

Σύμφωνα με τους γεωλόγους, οι καθιζήσεις τελευταίων ημερών οφείλονται στις νεροποντές των αλλιά και στην έλλειψη της βλάστησης μετά τις καταστροφικές πυρκαγιές τον Αυγουστο του 2007.

5.4 Καθιζήσεις στην εθνική οδό Σκάλα Λακωνίας (07/04/2011)

Προβλήματα στη κυκλοφορία αντιμετώπισαν όσοι κινούνταν στην εθνική οδό Σκάλας – Μολαών Λακωνίας, στην περιοχή της Μακρυνάρας, όπου το οδόστρωμα είχε υποστεί καθιζήσεις σε διάφορα σημεία.



Εικόνα 5.5 Καθιζήσεις στην εθνική οδό Σκάλας – Μολαών Λακωνίας

Ο κίνδυνος που δημιουργήθηκε για τους διερχόμενους οδηγούς ήταν μεγάλος ενώ παράλληλα η σήμανση ήταν ελλιπής και δεν υπήρχε επαρκής φωτισμός για την κυκλοφορία το βράδυ.



Εικόνα 5.6 Καθιζήσεις στην εθνική οδό Σκάλας – Μολαών Λακωνίας

5.5 Καθίζηση στην εθνική οδό Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας (10/03/2013)

Καθίζηση υπέστη το οδόστρωμα στην εθνική οδό Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας, η οποία προκλήθηκε ύστερα από σφοδρή κακοκαιρία που έπληξε την περιοχή, ενώ υπάρχουν και αναφορές για την κακή κατασκευή του οδικού δικτύου.



Εικόνα 5.7 Καθίζηση στην εθνική οδό Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας

5.6 Καθίζηση στη Τσακώνα Αρκαδίας (07/02/2014)

Καθίζηση σημειώθηκε στη Τσακώνα Αρκαδίας στο έργο της αποκατάστασης, που είχε γίνει με τοίχο αντιστήριξης και με μπάζωμα με 3Α, από τη Διεύθυνση Τεχνικών Εργων της Περιφερειακής Ενότητας Αρκαδίας.



Εικόνα 5.8 Καθίζηση σε δρόμο στη Τσακώνα

5.7 Καθίζηση στο δρόμο Μεγαλόπολης – Ακόβου (14/03/2014)

Στη διακοπή της κυκλοφορίας των οχημάτων στον δρόμο Μεγαλόπολης-Ακόβου, και ειδικότερα από τη χιλιομετρική θέση 26,7 μέχρι και πεντακόσια μέτρα από αυτό το σημείο, προ του οικισμού Γουπάτων, προχώρησε η αστυνομία, λόγω καθίζησης που έχει υποστεί το οδόστρωμα σε μήκος 60,5 μέτρων, πλάτους τεσσάρων μέτρων και βάθους ενός μέτρου.



Εικόνα 5.9 Καθίζηση στο δρόμο Μεγαλόπολης – Ακόβου

Η διακοπή της κυκλοφορίας, λόγω έργων μέχρι την αποκατάσταση της βλάβης του οδοστρώματος, διήρκησε περίπου ένα μήνα και η κυκλοφορία των οχημάτων προς Άκοβο και Λεπτίνιο διεξαγόταν μέσω της επαρχιακής οδού Μεγαλόπολης – Δυρραχίου.

5.8 Καθίζηση σε τμήμα της επαρχιακής οδού Πύργου – Οινόης (25/03/2104)

Η επαρχιακή οδός Πύργου – Οινόης στο 17^ο χλμ, από τη διασταύρωση Χειμαδιού μέχρι και την Κουτσοχέρα, υπέστη καθίζηση ύστερα από τις έντονες βροχοπτώσεις που έπληξαν την περιοχή με αποτέλεσμα ο δρόμος να υποστεί μεγάλες ζημιές. Υστερα από αυτοψίες που έγιναν στην περιοχή κρίθηκε ακατάλληλη για τη διέλευση οχημάτων, για περίπου 20 ημέρες μέχρι να ολοκληρωθεί η ανακατασκευή του, λόγω επικινδυνότητας.



Εικόνα 5.10 Καθίζηση στην επαρχιακή οδό Πύργου – Οινόης

Ειδικότερα, στον νομό Ηλείας τα σοβαρότερα προβλήματα έχουν εντοπιστεί στην επαρχιακή οδό Πύργου – Οινόης, στον δρόμο από Αρχαία Ολυμπία προς Λάλα, στον δρόμο από Ανδρίτσαινα προς Κρέστενα, στον δρόμο από Ζαχάρω προς το Λογγό, στο Βούναργο, στο Κατάκολο, στην Καυκανιά, τη Φρίζα, το Περιστέρι, κ.α.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων, το περιφερειακό συμβούλιο Δυτικής Ελλάδας αποφάσισε την ένταξη στο ετήσιο επενδυτικό πρόγραμμα του 2014 τη μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας της καθιζάνουσας περιοχής της Καυκανιάς Αρχαίας Ολυμπίας, τη γεωτεχνική μελέτη και έρευνα για την αποκατάσταση κατολίσθησης στην κοινότητα Βούναργου Πύργου, καθώς και τη μελέτη διερεύνησης και αντιμετώπισης κατολισθήσεων σε θέσεις της επαρχιακής οδού Πύργου – Οινόης.

Βιβλιογραφία

ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, Δημήτριος Θ. Βαλάλας, Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη 1996

ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, Μαραγκός Νίκος, Προσθήκες Κίρτας Εμμανουήλ, Σέρρες 2010

ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, Κίρτας Εμμανουήλ, Σέρρες 2010

ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, Βασίλειος Χρηστάρας, Έκδοση Α.Π. Θεσσαλονίκης 2005

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, Μιχάλης Ι. Καββαδάς, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου 2005

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, Βιολέττα Πλαστήρα, Αιγάλεω 2010

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ Ι, Ειρήνη Βγενοπούλου, Πάτρα 2004

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΙ, Ειρήνη Βγενοπούλου, Πάτρα 2004

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΩΝ ΣΕ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΛΑΦΗ, Κωνσταντής Θωμάς, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ Ξάνθη 2006

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΟΥ ΕΔΡΑΖΟΝΤΑΙ ΜΕΣΩ ΠΛΑΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, Γεώργιος Ι. Σουφλής, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα 2007

Διαδικτυακοί Ιστότοποι

- <http://www.gscp.gr/ggpp/site/home/ws/promote/fisikes/katolisthisis.csp>
- http://www.geo.auth.gr/883/chapt_3.htm
- http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php?cidReq=PSTGR111