



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
UNIVERSITY of the PELOPONNESE

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



***«Αξιολόγηση μετρήσεων καθιζήσεων σε συνεκτικά και μη εδάφη, με  
χρήση υπολογιστικών φύλλων και βάσεων δεδομένων»***

Όνοματεπώνυμο: ΑΝΔΡΕΟΠΟΥΛΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

Αριθμός μητρώου: 5866

Επιβλέποντες καθηγητές: ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ, ΧΡΗΣΤΟΥ ΖΑΧΑΡΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ, 2023

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές της παρούσας πτυχιακής εργασίας, Δρ. Βγενοπούλου Ειρήνη και κ. Χρήστου Ζαχαρία για την καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες και χρήσιμες συμβουλές τους που διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου ως πολιτικός μηχανικός.

## Περίληψη

Η καθίζηση του εδάφους, μια κρίσιμη πτυχή της γεωτεχνικής μηχανικής, παίζει καθοριστικό ρόλο στη σταθερότητα και την απόδοση των κατασκευών πολιτικού μηχανικού, συμπεριλαμβανομένων των κτιρίων, των γεφυρών και των φραγμάτων. Είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν το έδαφος κάτω από μια κατασκευή βιώνει μια σταδιακή καθοδική κίνηση, που οδηγεί σε πιθανά ζητήματα όπως δομικές βλάβες και αστάθεια. Η ακριβής πρόβλεψη και η ενδεδειγμένη ανάλυση της καθίζησης του εδάφους είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό και την κατασκευή ασφαλών και ανθεκτικών τεχνικών έργων.

Η πρόβλεψη και η κατανόηση της καθίζησης του εδάφους είναι μια πολύπλοκη προσπάθεια λόγω της πληθώρας των παραγόντων που εμπλέκονται. Οι ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης, της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε υγρασία, επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά καθίζησης. Επιπλέον, τα εξωτερικά φορτία, οι δομικές διαμορφώσεις και οι περιβαλλοντικές συνθήκες προσθέτουν περαιτέρω επίπεδα πολυπλοκότητας στην ανάλυση. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων που μπορούν να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις διευθέτησης λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις πολύπλευρες μεταβλητές.

Η μέθοδος Boussinesq, που πήρε το όνομά της από τον Γάλλο μαθηματικό Joseph Valentin Boussinesq, είναι μια κλασική αναλυτική προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της καθίζησης του εδάφους σε διάφορα γεωτεχνικά σενάρια. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στις αρχές της ελαστικότητας και επιτρέπει τον υπολογισμό των τιμών καθίζησης που προκαλούνται από εξωτερικά φορτία που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του εδάφους. Με τις ρίζες της στον 19ο αιώνα, η μέθοδος Boussinesq παραμένει ένα θεμελιώδες εργαλείο στη γεωτεχνική μηχανική και προσφέρει ένα πολύτιμο πλαίσιο για την κατανόηση των φαινομένων εδαφικής εγκατάστασης.

Η παρούσα πτυχιακή ξεκινά μια ολοκληρωμένη διερεύνηση της ανάλυσης των οικισμών του εδάφους χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Boussinesq. Οι πρωταρχικοί στόχοι είναι η κατανόηση των θεωρητικών θεμελίων της μεθόδου Boussinesq, η διερεύνηση της εφαρμογής της σε γεωτεχνικά σενάρια του πραγματικού κόσμου και η συμβολή στην πρόοδο της γνώσης στον τομέα της εδαφικής καθίζησης. Εξετάζοντας τις παραδοχές, τους περιορισμούς και την ακρίβεια της μεθόδου Boussinesq, αυτή η έρευνα στοχεύει να παρέχει στους μηχανικούς και στους επαγγελματίες γεωτεχνικούς μια βαθύτερη εικόνα για την πρόβλεψη και τον μετριασμό των θεμάτων καθίζησης του εδάφους.

Στις επόμενες ενότητες της διατριβής, θα εμβαθύνουμε στις θεωρητικές βάσεις της μεθόδου Boussinesq, θα διερευνήσουμε περιπτώσιολογικές μελέτες και θα αξιολογήσουμε κριτικά την αποτελεσματικότητά της στην πρόβλεψη της καθίζησης του εδάφους. Επιπλέον, θα αξιολογήσουμε τους περιορισμούς της μεθόδου και θα προτείνουμε πιθανές βελτιώσεις ή συμπληρωματικές τεχνικές για την αντιμετώπιση πολύπλοκων γεωτεχνικών σεναρίων. Τα ευρήματα αυτής της έρευνας φιλοδοξούν να αποτελέσουν πολύτιμη πηγή για μηχανικούς και ερευνητές που ασχολούνται με τον τομέα της γεωτεχνικής μηχανικής και της εδαφομηχανικής.

### **Υπεύθυνη δήλωση σπουδάστριας**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κείμενου, έχω δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα.

Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

**Η φοιτήτρια :**

**Ανδρεοπούλου Αικατερίνη AM 5866**

## Εικόνες και Πίνακες

Εικόνα 1. Οι τρεις φάσεις του εδάφους. ( <a href="https://eclass.hmu.gr/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf">https://eclass.hmu.gr/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf</a> ).....	12
Εικόνα 2. Όρια Atterberg (Βγενοπούλου, 2020).....	14
Εικόνα 3. Διάγραμμα διατμητικών - ορθών τάσεων ( <a href="http://charalampakis.com/e-learning/ntua/texnikh-mhchanikh.pdf">http://charalampakis.com/e-learning/ntua/texnikh-mhchanikh.pdf</a> ).....	15
Εικόνα 4. Η καθίζηση του εδάφους και οι συνιστώσες της ( <a href="https://www.britannica.com/science/sedimentation-geology">https://www.britannica.com/science/sedimentation-geology</a> ).....	19
Εικόνα 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεως πεπερασμένων στοιχείων και δοκιμής προτύπου πεδύλου από τους <i>Kinner and Ladd (1973)</i> .....	31
Εικόνα 6. Επιβολή εξωτερικού φορτίου σε εδαφική στρώση (Βγενοπούλου, 2020).35	
Εικόνα 7. Μεταβολή της υδροστατικής πίεσης αργίλου μετά από επιβολή φορτίου (Βγενοπούλου, 2020). .....	36
Εικόνα 8. Γραφική παράσταση του μέτρου ελαστικότητας ( <a href="http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/105Kataponisi.html">http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/105Kataponisi.html</a> ).....	39
Εικόνα 9. Συμπιεσόμετρο (οιδήμετρο) (Βγενοπούλου, 2020). .....	41
Εικόνα 10. Συμπίεση αργλικού δείγματος συναρτήσει του χρόνου για δεδομένη αύξηση του φορτίου κατά $\Delta\sigma$ . .....	42
Εικόνα 11. Μεταβολή του δείκτη κενών $e$ συναρτήσει της ενεργού τάσης $\sigma'$ . .....	43
Εικόνα 12. Μεταβολή του δείκτη κενών $e$ συναρτήσει της ενεργού τάσης $\sigma'$ κατά τη διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης.....	44
Εικόνα 13. Προσδιορισμός της τάσης προστερεοποίησης. ....	45
Εικόνα 14. Δείκτης συμπιεστότητας $C_c$ και δείκτης συμπιεστότητας σε επαναφόρτιση $C_r$ . .....	47
Εικόνα 15. Οι τάσεις στον ελαστικό ημιχώρο (Σακελλαρίου, 2003). .....	48
Εικόνα 16. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις σημειακής φόρτισης $P$ . ..	50
Εικόνα 17. Καθίζηση σε βάθος $h$ μετά από επιβολή σημειακής φόρτισης $P$ . .....	51
Εικόνα 18. Ο ελαστικός ημιχώρος σε περίπτωση ομοιόμορφης φόρτισης.....	51
Εικόνα 19. Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) ( <a href="https://geotrisi.net">https://geotrisi.net</a> ). .....	53
Εικόνα 20. Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου. ....	54
Εικόνα 21. Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT) ( <a href="https://docplayer.gr/4864811-Tehniki-ereyna-toy-ypedafoys.html">https://docplayer.gr/4864811-Tehniki-ereyna-toy-ypedafoys.html</a> ).....	55
Εικόνα 22. Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής .....	56

Εικόνα 23. Η τριγωνική κατανομή της μεθόδου Schmertmann ( <a href="http://users.ntua.gr/kanvadas/Books/Foundations/06-settlements.pdf">http://users.ntua.gr/kanvadas/Books/Foundations/06-settlements.pdf</a> ) .....	57
Εικόνα 24. Άσκηση κατακόρυφου μοναχικού φορτίου. ....	61
Εικόνα 25. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel. ....	62
Εικόνα 26. Οι εξισώσεις του Boussinesq σε excel.....	62
Εικόνα 27. Οι υπολογισμοί των κατακόρυφων τάσεων για διαφορετικές οριζόντιες αποστάσεις και βάθη από την επιβολή μοναχικού φορτίου. ....	63
Εικόνα 28. Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης όπου φαίνεται η διακύμανση της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος.....	63
Εικόνα 29. Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης όπου φαίνεται η διακύμανση της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με την οριζόντια.....	64
Εικόνα 30. Άσκηση κατακόρυφης τάσης κάτω από το κέντρο Ο κυκλικής επιφάνειας. ....	64
Εικόνα 31. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel. ....	65
Εικόνα 32. Πίνακας με τις τιμές του συντελεστή τάσης $I_0$ ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών του πηλίκου $z/\alpha$ . ....	65
Εικόνα 33. Ο τύπος Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για κυκλική επιφάνεια. ....	66
Εικόνα 34. Οι υπολογισμοί των κατακόρυφων τάσεων για κυκλική επιφάνεια. ....	66
Εικόνα 35. Διάγραμμα απεικόνισης της κατακόρυφης τάσης για τις διαφορετικές τιμές του πηλίκου $z/\alpha$ . ....	66
Εικόνα 36. Φόρτιση ορθογωνικής επιφάνειας με ομοιόμορφο φορτίο. ....	67
Εικόνα 37. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel. ....	67
Εικόνα 38. Δεδομένα για τον υπολογισμό των τάσεων.....	68
Εικόνα 39. Ο τύπος Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για ορθογωνική επιφάνεια. ....	68
Εικόνα 40. Νομογράφημα για την εύρεση των τιμών του συντελεστή τάσης $I_0$ ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών των πηλίκων $z/b$ και $a/b$ . ....	69
Εικόνα 41. Σχηματική απεικόνιση της τομής του εδάφους στο οποίο θα υπολογιστεί η καθίζηση από την φόρτιση ορθογωνικής επιφάνειας.....	70
Εικόνα 42. Ο διαχωρισμός των στρώσεων για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης. ....	71
Εικόνα 43. Τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων.....	71

Εικόνα 44. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της αρχικής ενεργής τάσης. ....	72
Εικόνα 45. Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή Ισ. ....	73
Εικόνα 46. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της καθίζησης.....	74
Εικόνα 47. Σχηματική απεικόνιση της τομής του εδάφους στο οποίο θα υπολογιστεί η καθίζηση από την φόρτιση κυκλικής επιφάνειας.....	75
Εικόνα 48. Ο διαχωρισμός των στρώσεων για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης. ....	76
Εικόνα 49. Τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων.....	76
Εικόνα 50. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της αρχικής ενεργής τάσης. ....	77
Εικόνα 51. Πίνακας υπολογισμού Ισ.....	78
Εικόνα 52. Απόσπασμα φύλλου excel από τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης. ....	78
Εικόνα 53. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της καθίζησης.....	79



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	1
Περίληψη .....	2
Υπεύθυνη δήλωση σπουδάστριας.....	4
Εικόνες και Πίνακες .....	5
Εισαγωγή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1. Εδαφικές παράμετροι .....	10
1.1. Φυσικές ιδιότητες εδαφών .....	11
1.1.1. Δείκτης πόρων $e$ – πορώδες $n$ .....	12
1.1.2. Βαθμός κορεσμού.....	13
1.1.3. Περιεκτικότητα σε νερό % (υγρασία) .....	13
1.2. Μηχανικές ιδιότητες εδαφών .....	13
1.2.1. Πλαστικότητα.....	13
1.2.2. Συνεκτικότητα .....	14
1.2.3. Διατμητική αντοχή.....	14
1.2.4. Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi$ .....	15
2. Καθιζήσεις.....	17
2.1. Ορισμός καθίζησης.....	17
2.2. Κατηγορίες καθιζήσεων .....	20
2.3. Αίτια καθιζήσεων.....	22
2.4. Μέθοδοι ανίχνευσης και υπολογισμού των καθιζήσεων .....	24
2.5. Επιπτώσεις καθιζήσεων .....	27
3. Βασικές αρχές των καθιζήσεων .....	28
3.1. Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη.....	28
3.2. Καθιζήσεις σε μη συνεκτικά εδάφη.....	33
3.3. Καθίζηση εδαφικής στρώσης.....	35
3.4. Παραδοχή ελαστικού εδάφους .....	37
3.5. Μέτρο ελαστικότητας $E$ .....	38

3.6.	Λόγος του Poisson $\nu$ .....	39
3.7.	Τάσεις εξαιτίας επιβολής εξωτερικών φορτίων μέσα στο έδαφος .....	40
3.8.	Εργαστηριακή δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης.....	40
3.9.	Μέθοδος Boussinesq για ελαστικά εδάφη .....	48
4.	Δοκιμές στο πεδίο.....	53
4.1.1.	Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) .....	53
4.1.2.	Δοκιμή διείσδυσης κώνου.....	54
4.1.3.	Δοκιμή Πτερυγίου (FVT) .....	56
4.1.4.	Εμπειρική μέθοδος Schmertmann .....	56
5.	Μελέτη περίπτωσης: Μέθοδος boussinesq σε excel .....	60
5.1.	Τάσεις εδάφους λόγω εξωτερικού φορτίου .....	60
5.1.1.	Εξισώσεις της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για κατακόρυφο μοναχικό φορτίο.....	61
5.1.2.	Τάσεις κάτω από το κέντρο κυκλικής επιφάνειας που φορτίζεται ομοιόμορφα	64
5.1.3.	Τάσεις κάτω από ορθογωνική επιφάνεια που φορτίζεται με συνεχές φορτίο	67
5.1.4.	Υπολογισμός καθιζήσεων σε περίπτωση ορθογωνικού φορτίου σε έδαφος με στρώσεις πηλού και αργίλου .....	70
5.1.5.	Υπολογισμός καθιζήσεων σε περίπτωση φορτίου κυκλικής επιφάνειας σε έδαφος με στρώσεις άμμου και αργίλου .....	74
	Συμπεράσματα .....	80
	Βιβλιογραφία .....	82

## 1. Εδαφικές παράμετροι

Με τον όρο έδαφος εννοούμε ένα σύνολο ασυγκόλλητων ή αδύνατα συγκολλημένων ορυκτών κόκκων που προήλθαν από αποσάθρωση πετρωμάτων και που στα κενά μεταξύ των κόκκων περιέχεται αέρας ή νερό ή και τα δύο. Η αποσαθρωτική διεργασία που μετατρέπει το βράχο σε έδαφος είναι φυσική ή χημική. Η φυσική διεργασία η οποία συνίσταται σε διάβρωση από νερό, δράση παγετώνων κ.λ.π. έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των λεγόμενων κοκκωδών ή μη συνεκτικών εδαφών. Η χημική διεργασία η οποία συνίσταται στην ενέργεια του νερού, του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα οδηγεί στη δημιουργία των συνεκτικών εδαφών. Επιγραμματικά οι διαφορές στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των δυο αυτών τύπων εδαφών συνοψίζονται ως εξής (Βγενοπούλου, 2020):

### **Κοκκώδη ή ψαθυρά ή μη συνεκτικά ή χονδρόκοκα ή αμμοχαλικώδη εδάφη:**

- Η ορυκτολογική τους σύσταση είναι ίδια με του πατρικού πετρώματος και αποτελείται κυρίως από χαλαζία, άστριο, πλαγιόκλαστο και ασβεστολιθικά άλατα.
- Είναι χονδρόκοκα με κόκκους ογκώδεις, μεγέθους λίθου ή χαλικιού ή άμμου που είναι περίπου στρογγυλοί ή γωνιώδεις.
- Έχουν χαμηλή «ειδική επιφάνεια» (λόγο επιφάνειας προς όγκο).
- Οι κόκκοι συγκρατούνται μεταξύ τους μόνο με δυνάμεις βαρύτητας.
- Η αντοχή τους εξαρτάται από την εσωτερική τριβή των κόκκων. Χαρακτηρίζεται από τη γωνία φ.
- Παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα
- Παρουσιάζουν άμεσες (ελαστικές) καθιζήσεις
- Η μηχανική τους συμπεριφορά δεν εξαρτάται από την παρουσία νερού μέσα στο έδαφος.

### **Συνεκτικά ή λεπτόκοκα ή αργιλικά εδάφη:**

- Η ορυκτολογική τους σύσταση είναι διαφορετική από του πατρικού πετρώματος και αποτελείται από ορυκτά της αργίλου που σχηματίζονται από φύλλα πυριτίου, αργιλίου και μαγνησίου.

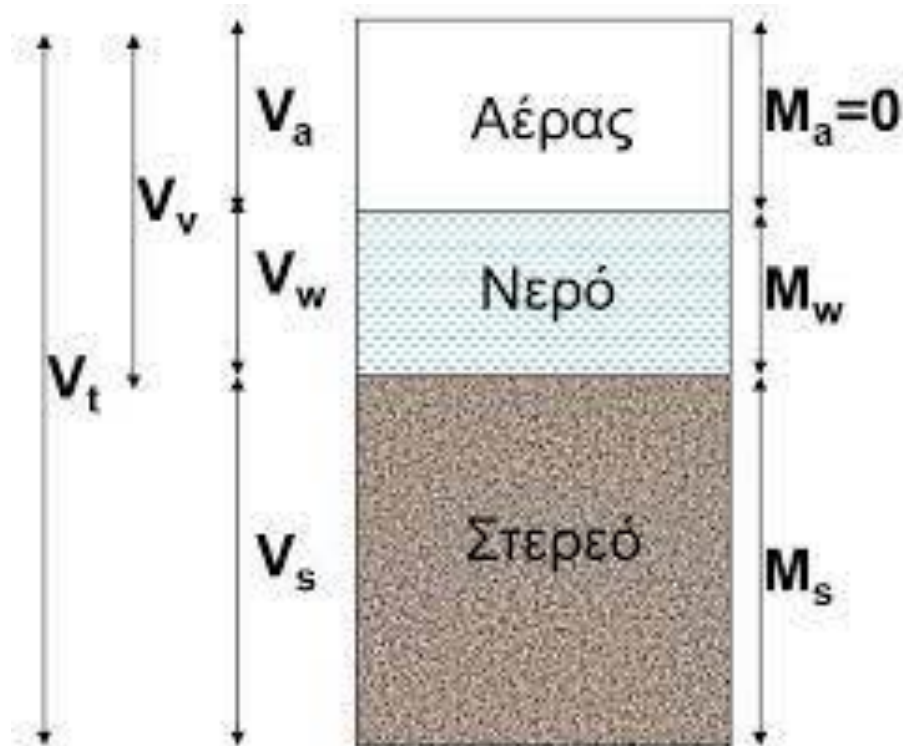
- Είναι λεπτόκοκκα με κρυσταλλικούς κόκκους μικρότερους από 0.002mm, και με σχήμα πλακοειδές ή βελονοειδές ή ραβδοειδές.
- Έχουν υψηλή «ειδική επιφάνεια».
- Οι κόκκοι συγκρατούνται μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις.
- Η αντοχή τους εξαρτάται όχι μόνον από την εσωτερική τριβή αλλά κυρίως από τη συνοχή ( c) μεταξύ των κόκκων.
- Παρουσιάζουν μικρή διαπερατότητα.
- Παρουσιάζουν μακροχρόνιες (έμμεσες ή μη ελαστικές) καθιζήσεις , οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο της «στερεοποίησης».
- Η μηχανική τους συμπεριφορά εξαρτάται από την παρουσία νερού.

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  $\tau$  και η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  (Darley & Gray, 1988).

### 1.1. Φυσικές ιδιότητες εδαφών

Ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητος για την αναγνώριση και τον προσδιορισμό των μηχανικών του ιδιοτήτων. Δεν υπάρχει άμεσος συσχετισμός αλλά υπάρχουν εμπειρικές σχέσεις και νομογραφήματα που προσδιορίζουν τουλάχιστον το εύρος των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων από τις φυσικές.

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.). Ο ποσοτικός προσδιορισμός τους γίνεται εργαστηριακά ή επί τόπου (Βγενοπούλου, 2020).



Εικόνα 1. Οι τρεις φάσεις του εδάφους.  
 ([https://eclass.hmu.gr/Lecture\\_1\\_Ardeuseis\\_2019.pdf](https://eclass.hmu.gr/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf))

### 1.1.1. 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. Είναι δυνατόν ο δείκτης κενών να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \mu\epsilon \quad V_s = V - V_v$$

Το πορώδες  $n$  ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο κενών και στερεών (συνολικός όγκος). Το πορώδες κυμαίνεται θεωρητικά από 0 έως 1. Στην πράξη κυμαίνεται από περίπου 20% έως 80% (Βγενοπούλου, 2020).

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

### 1.1.2. Βαθμός κορεσμού

Το ποσοστό του όγκου των κενών που έχει πληρωθεί από το νερό. Σε τελείως ξηρό έδαφος:  $S=0$  και σε τελείως κορεσμένο (όλα τα κενά κορεσμένα (γεμάτα) με νερό)  $S=1$ .

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

### 1.1.3. Περιεκτικότητα σε νερό % (υγρασία)

Η υγρασία ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του νερού προς το βάρος των στερεών συστατικών. Είναι δυνατόν  $w>1$ .

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

## 1.2. 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.

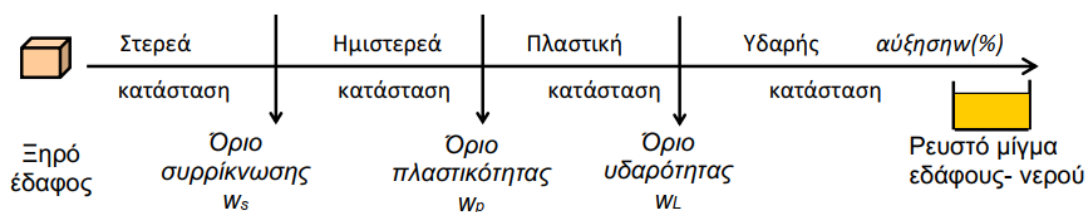
### 1.2.1. Πλαστικότητα

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 (Güven, 2009). Οι φυσικές ιδιότητες και η μηχανική συμπεριφορά ενός εδάφους μεταβάλλονται σημαντικά με τη μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι ένα λεπτόκοκκο έδαφος το οποίο περιέχει ορυκτά της αργίλου με την παρουσία κάποιας υγρασίας μπορεί να ξαναπλάθεται χωρίς να θρυμματίζεται. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται πλαστικότητα και ορίζεται ως η ικανότητα ενός εδάφους να μπορεί να παραμορφώνεται με μόνιμες (μη αναστρέψιμες) παραμορφώσεις χωρίς να θραύεται ή να θρυμματίζεται. Το ίδιο έδαφος με την παρουσία μεγάλης υγρασίας συμπεριφέρεται σαν υγρό και με την παρουσία πολύ μικρής υγρασίας σαν στερεό. Έτσι, ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία η συμπεριφορά του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί κάπως αυθαίρετα ότι

ανήκει σε τέσσερις φυσικές καταστάσεις: τη στερεά, την ημιστερεά, την πλαστική και την υδαρή κατάσταση.

### 1.2.2. 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 (Güven, 1992). Οι υγρασίες στις οποίες γίνεται η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη καλούνται όρια του Atterberg και είναι τα εξής: όριο συρρίκνωσης (από τη στερεά στην ημιστερεά κατάσταση), όριο πλαστικότητας (από την ημιστερεά στην πλαστική) και όριο υδαρότητας (από την πλαστική στην υδαρή).



Εικόνα 2. Όρια Atterberg (Βγενοπούλου, 2020).

Τα όρια Atterberg είναι χαρακτηριστικά για κάθε εδαφικό υλικό και προφανώς δε μεταβάλλονται ανάλογα με τη φυσική κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Το όριο συρρίκνωσης  $w_s$  ορίζεται ως η υγρασία εκείνη για την οποία ο όγκος του εδάφους δε μειώνεται πλέον όσο και αν αυτό ξηρανθεί. Αντίθετα τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας δεν μπορούν να ορισθούν παρά μόνον με αυθαίρετες εργαστηριακές διαδικασίες τις οποίες θέσπισε ο Atterberg. Το όριο πλαστικότητας  $w_p$  ορίζεται ως η υγρασία για την οποία το έδαφος πλάθεται σε κυλίνδρους διαμέτρου 3.2mm χωρίς να θρυμματίζεται. Η δοκιμή πραγματοποιείται πλάθοντας ραβδίσκους εδάφους διαφόρων υγρασιών σε γυάλινη πλάκα.

### 1.2.3. Διατμητική αντοχή

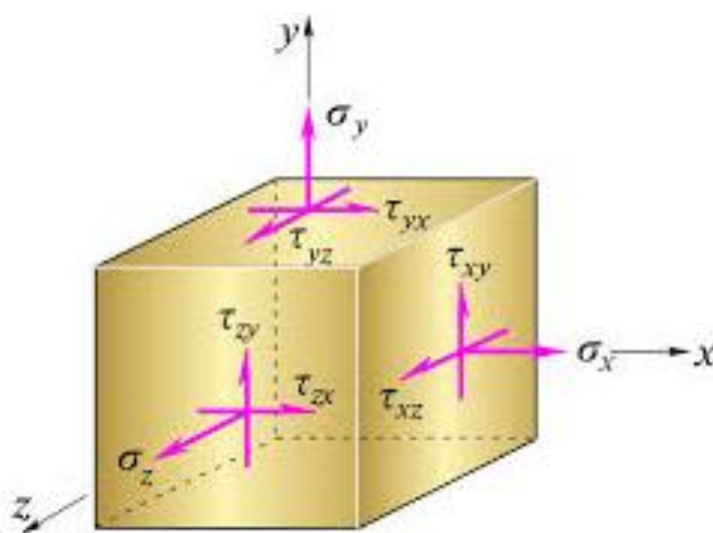
Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών τα εδάφη αστοχούν διατμητικά. Η αντοχή (αντίσταση) που προβάλλει το έδαφος στη διάτμηση είναι λοιπόν η

διατμητική αντοχή  $\tau$  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:

$$\tau = \sigma * \tan\phi + c$$

όπου :

- $\tau$ : η διατμητική αντοχή
- $\sigma$ : η ορθή τάση
- $\phi$ : η γωνία τριβής του εδάφους
- $c$ : η συνοχή του εδάφους



Εικόνα 3. Διάγραμμα διατμητικών - ορθών τάσεων (<http://charalampakis.com/e-learning/ntua/teknikh-mhxanikh.pdf>)

#### 1.2.4. Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi$

Η γωνία τριβής  $\phi$ , εκφράζει την αντίσταση στην ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Η γνώση της τιμής της γωνίας  $\phi$  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.





## 2. Καθιζήσεις

### 2.1. Ορισμός καθίζησης

Η καθίζηση, στις γεωλογικές επιστήμες, είναι η διαδικασία εναπόθεσης στερεού υλικού από κατάσταση εναιώρησης ή διαλύματος σε ρευστό (συνήθως αέρα ή νερό). Σε γενικές γραμμές, περιλαμβάνει επίσης αποθέσεις από παγετώδεις πάγους και εκείνα τα υλικά που συλλέγονται μόνο υπό την ώθηση της βαρύτητας, όπως στις αποθέσεις ή συσσωρεύσεις υπολειμμάτων πετρωμάτων στη βάση των βράχων. Ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως ως συνώνυμο της ιζηματογενούς πετρολογίας και της ιζηματολογίας (Elzea & Murray, 1990).

Η φυσική της πιο κοινής διαδικασίας καθίζησης, της καθίζησης στερεών σωματιδίων από ρευστά, είναι γνωστή εδώ και πολύ καιρό. Η εξίσωση της ταχύτητας καθίζησης που διατυπώθηκε το 1851 από τον G.G. Stokes είναι το κλασικό σημείο εκκίνησης για οποιαδήποτε συζήτηση σχετικά με τη διαδικασία καθίζησης. Ο Stokes έδειξε ότι η τελική ταχύτητα καθίζησης των σφαιρών σε ένα ρευστό ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το ιξώδες του ρευστού και ευθέως ανάλογη με τη διαφορά πυκνότητας υγρού και στερεού, την ακτίνα των σφαιρών που εμπλέκονται και τη δύναμη της βαρύτητας. Η εξίσωση του Stokes ισχύει, ωστόσο, μόνο για πολύ μικρές σφαίρες (κάτω από 0,04 χιλιοστά σε διάμετρο) και ως εκ τούτου έχουν προταθεί διάφορες τροποποιήσεις του νόμου του Stokes για μη σφαιρικά σωματίδια και σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους (US Geological Survey, 2008).

Καμία εξίσωση ταχύτητας καθίζησης, όσο έγκυρη κι αν είναι, δεν παρέχει επαρκή εξήγηση ακόμη και για τις βασικές φυσικές ιδιότητες των φυσικών ιζημάτων. Το μέγεθος κόκκου των κλαστικών στοιχείων και η ταξινόμηση, το σχήμα, η στρογγυλότητα, η υφή τους και το περίβλημά τους είναι τα αποτελέσματα πολύπλοκων διεργασιών που σχετίζονται όχι μόνο με την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού μέσου αλλά και με τη μεταφορική ταχύτητα του ρευστού εναπόθεσης, τον στροβιλισμό που προκύπτει από αυτή την κίνηση και την τραχύτητα των κρεβατιών πάνω από τα οποία κινείται. Αυτές οι διεργασίες σχετίζονται επίσης με διάφορες μηχανικές ιδιότητες των στερεών υλικών που προωθούνται, με τη διάρκεια

της μεταφοράς του ιζήματος και με άλλους ελάχιστα κατανοητούς παράγοντες (Σακελλαρίου, 2003).

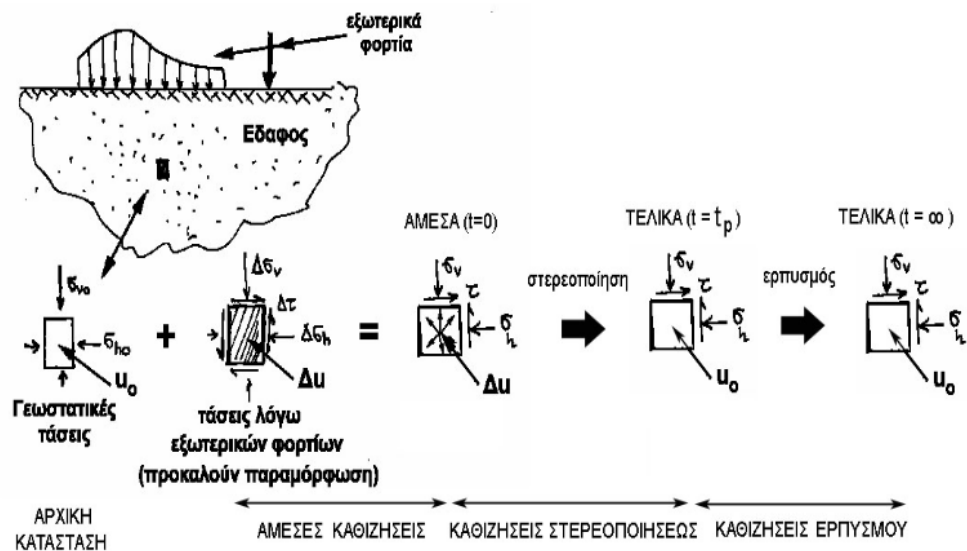
Η καθίζηση θεωρείται γενικά από τους γεωλόγους όσον αφορά τις υφές, τις δομές και το περιεχόμενο απολιθωμάτων των κοιτασμάτων που ορίζονται σε διαφορετικά γεωγραφικά και γεωμορφικά περιβάλλοντα. Έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες για να γίνει διάκριση μεταξύ ηπειρωτικών, παραθαλάσσιων, θαλάσσιων και άλλων κοιτασμάτων στο γεωλογικό αρχείο. Η ταξινόμηση των περιβαλλόντων και τα κριτήρια για την αναγνώρισή τους εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο ζωνής συζήτησης. Η ανάλυση και η ερμηνεία των αρχαίων κοιτασμάτων έχει προωθηθεί από τη μελέτη της σύγχρονης καθίζησης. Ωκεανογραφικές και λιμνολογικές αποστολές έχουν ρίξει πολύ φως στην καθίζηση στον Κόλπο του Μεξικού, τη Μαύρη Θάλασσα και τη Βαλτική Θάλασσα και σε διάφορες εκβολές ποταμών, λίμνες και ποτάμιες λεκάνες σε όλα τα μέρη του κόσμου.

Η χημική καθίζηση γίνεται κατανοητή με όρους χημικών αρχών και νόμων. Αν και ο διάσημος φυσικοχημικός J.H. Ο van't Hoff εφάρμοσε τις αρχές της ισορροπίας φάσης στο πρόβλημα της κρυστάλλωσης άλμης και την προέλευση των αποθέσεων αλατιού ήδη από το 1905, λίγη προσπάθεια έγινε για να εφαρμοστεί η φυσική χημεία στα προβλήματα της χημικής καθίζησης. Πιο πρόσφατα, ωστόσο, έχει διερευνηθεί ο ρόλος του δυναμικού οξειδοαναγωγής (αμοιβαία αναγωγή και οξείδωση) και του pH (οξύτητα-αλκαλικότητα) στην καθίζηση πολλών χημικών ιζημάτων και έχει γίνει μια νέα προσπάθεια για την εφαρμογή γνωστών θερμοδυναμικών αρχών την προέλευση των κοιτασμάτων ανυδρίτη και γύψου, στη χημεία του σχηματισμού δολομίτη και στο πρόβλημα των σιδηρολίθων και των σχετικών ιζημάτων (Williams κ.ά., 2009).

Ο γεωχημικός εξετάζει επίσης τη διαδικασία καθίζησης ως προς τα χημικά τελικά προϊόντα. Για αυτόν η καθίζηση είναι σαν μια γιγάντια χημική ανάλυση στην οποία τα πρωτεύοντα συστατικά του πυριτικού φλοιού της Γης διαχωρίζονται το ένα από το άλλο με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια μιας ποσοτικής ανάλυσης υλικού πετρώματος στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα αυτής της χημικής κλασματοποίησης δεν είναι πάντα τέλεια, αλλά σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά καλά. Η γεωχημική κλασμάτωση, η οποία ξεκίνησε την προκάμβρια εποχή, είχε ως αποτέλεσμα μια τεράστια συσσώρευση νατρίου στη

θάλασσα, ασβεστίου και μαγνησίου στους ασβεστόλιθους και δολομίτες, πυριτίου στα στρώματα πυριτίου και ορθοαλαζιτικούς ψαμμίτες, άνθρακα στα ανθρακικά και ανθρακικού άλατος στις υποθέσεις. θειικά άλατα, σίδηρος στις σιδερένιες πέτρες και ούτω καθεξής. Αν και ο μαγματικός διαχωρισμός έχει, σε ορισμένες περιπτώσεις, παραγάγει μονοοργανικά πετρώματα όπως ο δουνίτης και ο πυροξενίτης, καμία πυριγενής ή μεταμορφική διεργασία δεν μπορεί να ταιριάζει με τη διαδικασία καθίζησης σε αποτελεσματική απομόνωση και συγκέντρωση αυτών και άλλων στοιχείων (Wan, 2008).

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.



Εικόνα 4. Η καθίζηση του εδάφους και οι συνιστώσες της (<https://www.britannica.com/science/sedimentation-geology>)

## 2.2. Κατηγορίες καθιζήσεων

Τα είδη των καθιζήσεων (Robertson, 1986) 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 (Σακελλαρίου, 2003).

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 (Wan, 2008).

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) (Torok & Thompson, 1972).

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

- **Άμεσες ή ελαστικές καθιζήσεις:**

Συμβαίνουν σε όλα τα ξηρά, στα 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. Συμβαίνουν αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου και υπολογίζονται με σχέσεις από τη θεωρία ελαστικότητας (Βγενοπούλου, 2020).

- **Πρωτογενείς (πρωτεύουσες) 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. Ο υπολογισμός τους γίνεται με τη θεωρία στερεοποίησης (Βγενοπούλου, 2020).

➤ **Δευτερογενείς (δευτερεύουσες) καθιζήσεις ή καθιζήσεις λόγω ερπυσμού.**

Συμβαίνουν στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη μετά το πέρας της πρωτεύουσας 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 (Βγενοπούλου, 2020). Τα αίτια και ο μηχανισμός ανάπτυξης της δευτερογενούς καθιζήσης ποικίλλει στα διάφορα εδάφη και οι καθιζήσεις αυτές μπορούν να εξελίσσονται για μεγάλο χρονικό διάστημα (Σακελλαρίου, 2003).

### **2.3. Αίτια καθιζήσεων**

Οι παθητικές καθιζήσεις μπορεί να οφείλονται (Sanders, 1973; Robertson, 1986):

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.

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 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

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 (Robertson, 1986).

#### **2.4. 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:

##### **▪ 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 (Σακελλαρίου, 2003), είναι τα παρακάτω:

- Το πιεζόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πίεσης του νερού.
- Το κλισιόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης του εδάφους.
- Το κλινόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση των στροφών μιας κατασκευής.
- Το μηκυνσιόμετρο, χρησιμοποιείται για την μέτρηση των μεταβολών του μήκους μεταξύ δύο σημείων.

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

#### ***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.
- Πλακέτες με προεξοχικό κοχλία, οι οποίες πακτώνονται στο σώμα της κατασκευής ή σε άλλη σταθερή θέση (π.χ τοίχοι αντιστήριξης)
- Ειδικές βάσεις πάκτωσης στο έδαφος και φορητοί στύλοι στήριξης των οργάνων.

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια στην επιλογή της θέσης των κορυφών των επίγειων γαιωδτικών 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 γαιωδτικός 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.

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.

## **2.5. Επιπτώσεις καθιζήσεων**

Τα 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 (Diaz & Souza-Santos, 2001).

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.

### **3. Βασικές αρχές των καθιζήσεων**

#### **3.1. Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη**

Γενικά, όλες οι μέθοδοι εκτιμήσεως των καθιζήσεων που αφορούν σε συνεκτικούς σχηματισμούς, βασίζονται στην θεωρία ελαστικότητας είτε άμεσα ή έμμεσα. Η συνολική καθίζηση του συνεκτικού εδάφους αποτελείται ουσιαστικά από τρεις συνιστώσες οι οποίες είναι αντίστοιχα η άμεση καθίζηση, η καθίζηση από στερεοποίηση και η δευτερογενής καθίζηση. Η άμεση καθίζηση παρατηρείται αμέσως μετά την επιβολή της φορτίσεως και είναι αποτέλεσμα των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος. Η άμεση καθίζηση πραγματοποιείται με σταθερό όγκο και χωρίς αποστράγγιση του νερού των πόρων. Σε ψαθυρά εδάφη καθώς επίσης και σε κορεσμένες αργίλους και ιλύες η άμεση καθίζηση αποτελεί την ολική καθίζηση. Η καθίζηση λόγω στερεοποίησης πραγματοποιείται βαθμιαία, μετά το τέλος της άμεσης καθιζήσεως, με βαθμιαία απομάκρυνση του νερού των πόρων από το έδαφος και μεταφορά της φορτίσεως από το νερό στον στερεό σκελετό. Το φαινόμενο τελειώνει όταν η πίεση του νερού των πόρων εξισωθεί με τις υπάρχουσες οριακές υδραυλικές συνθήκες. Τέλος, η δευτερογενής καθίζηση παρατηρείται μετά το τέλος της καθιζήσεως λόγω στερεοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο και δεν έχει σχέση με την μεταβολή της πίεσεως των πόρων. Η ανάπτυξη της δευτερογενούς καθιζήσεως, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως «ιξώδης» συμπεριφορά της δομής, παρατηρείται κυρίως σε οργανικές αργίλους και οργανικά εδαφικά υλικά.

Η παραδοσιακή προσέγγιση, αρχικά θεμελιωμένη από τον Terzaghi (1943), χρησιμοποιεί την μονοδιάστατη μέθοδο κατά την οποία η καθίζηση θεωρείται ότι προέρχεται από στερεοποίηση εξαιτίας της αύξησης των ενεργών τάσεων η οποία και προκαλείται από αποτόνωση της υπερπίεσεως του ύδατος των πόρων. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η φόρτιση από την θεμελίωση προκαλεί μόνο κατακόρυφες παραμορφώσεις στο υπέδαφος, η καθίζηση που αναπτύσσεται οφείλεται στην στερεοποίηση και η αποτόνωση της υπερπίεσεως του ύδατος των πόρων συμβαίνει μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Οποιαδήποτε τυχόν πλευρική διαρροή του νερού αμελείται και οι καθιζήσεις οι προκαλούμενες από άμεση διατμητική παραμόρφωση θεωρούνται ασήμαντες.

Οι Burland et al. (1977) παρουσιάζουν μία λεπτομερή μελέτη του λόγου της

μονοδιάστατης καθιζήσεως προς την συνολική καθίζηση, και αποδεικνύουν ότι η ανισοτροπία του εδάφους μπορεί να έχει κάποια επιρροή σε αυτόν τον λόγο. Επίσης, υποστηρίζουν ότι, ενώ η καθίζηση η εκτιμώμενη μέσω μονοδιάστατης αναλύσεως  $s_{oed}$  προσεγγίζει πολύ καλά την συνολική τελική καθίζηση η οποία εκτιμάται από την τριδιάστατη ανάλυση  $s_{TF}$  για στιφρές αργίλους, καλύτερα προσεγγίζει την τελική καθίζηση από στερεοποίηση  $s_{CF}$  για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους. Για την υπερστερεοποιημένη άργιλο, η μονοδιάστατη ανάλυση φαίνεται ότι δίδει μια σχετικά αρκετά καλή προσέγγιση της καθιζήσεως με την αντίστοιχη τιμή της συνολικής καθιζήσεως που υπολογίζεται μέσω της τριδιάστατης αναλύσεως  $s_{TF}$  όταν ο λόγος Poisson του εδάφους είναι μικρότερος από περίπου  $\nu=0.35$ , ακόμη και στην περίπτωση σχετικώς μεγάλου πάχους εδαφικών στρωμάτων. Η μονοδιάστατη ανάλυση τείνει να υποεκτιμά την καθίζηση  $s_{oed}$  με την αύξηση του λόγου Poisson του εδάφους είτε με την αύξηση του σχετικού εδαφικού βάθους. Για μαλακές αργιλικές στρώσεις, η μονοδιάστατη ανάλυση δίδει μια αξιοσημείωτα καλή προσέγγιση της συνολικής τελικής καθιζήσεως αν ο λόγος Poisson του εδάφους είναι μικρότερος από  $\nu=0.35$  (Poulos et al. 2001).

Είναι γνωστό ότι οι τριδιάστατες επιδράσεις μπορούν να επιταχύνουν σημαντικά τον ρυθμό αύξησης των καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων σε αργιλικούς σχηματισμούς, κυρίως εξαιτίας της ικανότητας αποτονώσεως της υπερπίεσεως του ύδατος των πόρων τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια. Από πρακτική άποψη, δεν είναι πάντοτε εφικτό να χρησιμοποιείται η ανάλυση διδιάστατης ή τριδιάστατης στερεοποίησεως. Για τον λόγο αυτό, είναι δυνατό να προσαρμοσθεί η μονοδιάστατη στερεοποίηση χρησιμοποιώντας έναν ισοδύναμο συντελεστή στερεοποίησεως,  $c_{ve}$ , πολλαπλασιάζοντας τον πραγματικό συντελεστή στερεοποίησεως,  $c_v$ , με έναν γεωμετρικό παράγοντα  $R_f$  σύμφωνα με την σχέση:  $c_{ve} = R_f \cdot c_v$ . Οι τιμές του παράγοντα  $R_f$  προκύπτουν από επιλύσεις που αφορούν σε τριδιάστατο ρυθμό ανάπτυξης καθιζήσεων, όπως εκείνες που εκτιμώνται από τους Davis and Poulos (1972). Όσο το πάχος του στρώματος αυξάνει σε σχέση με το μέγεθος του πεδίου θεμελιώσεως, ο παράγοντας  $R_f$  αυξάνει, επηρεάζοντας την επιτάχυνση του ρυθμού αναπτύξεως των καθιζήσεων εξαιτίας πλευρικής αποτονώσεως.

Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η άμεση καθίζηση είναι αρκετά σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί, κυρίως όταν πρόκειται για στιφρές αργίλους. Συνεπώς, όταν χρησιμοποιείται η θεωρία μονοδιάστατης καθιζήσεως, θα πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπ' όψη οι παρακάτω σχέσεις:

- Για στιφρές υπερστερεοποιημένες αργίλους:

$$S_{TF}=S_{oed}, \quad S_{CF}=S_{oed}-s_i$$

- Για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους:

$$S_{TF}=s_i+S_{oed}, \quad S_{CF}=S_{oed}$$

όπου  $S_{TF}$  είναι η συνολική τελική καθίζηση,  $S_{oed}$  η μονοδιάστατη καθίζηση (από το

συμπιεσόμετρο),  $s_i$  η άμεση καθίζηση και  $S_{CF}$  η τελική καθίζηση από στερεοποίηση.

Η άμεση καθίζηση μίας επιφανειακής θεμελιώσεως που εδράζεται σε αργιλικό έδαφος οφείλεται αποκλειστικά στην παραμόρφωση της αργίλου υπό αστράγγιστες συνθήκες η οποία συμβαίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Σε πολλές περιπτώσεις, η άμεση καθίζηση μπορεί να είναι μικρότερη σε μέγεθος συγκρινόμενη με την καθίζηση από στερεοποίηση, ωστόσο όμως έχει διαπιστωθεί ότι είναι αρκετά σημαντική, κυρίως όταν πρόκειται για συνεκτικά εδάφη υψηλής πλαστικότητας ( $PI \geq 50$ ) ή και οργανικά εδάφη (Foott and Ladd 1981).

Οι περισσότερες μέθοδοι εκτιμήσεως των άμεσων καθιζήσεων βασίζονται στην γραμμικώς ελαστική ανάλυση, η οποία μπορεί να παρέχει λογικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι έχουν επιλεγεί «αντιπροσωπευτικές» εδαφικές παράμετροι. Οι Christian and Carrier (1978) χρησιμοποίησαν μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να σχεδιάσουν διαγράμματα με σκοπό την εκτίμηση άμεσης καθιζήσεως πεδίων εδραζόμενων σε αργιλικό έδαφος, το οποίο προσομοίωσαν ως γραμμικώς ελαστικό μέσο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, πρότειναν τον υπολογισμό της άμεσης καθιζήσεως  $\rho$  μέσω της σχέσεως:

$$\rho = I_1 \times I_2 \times q_b \times B/E_u$$

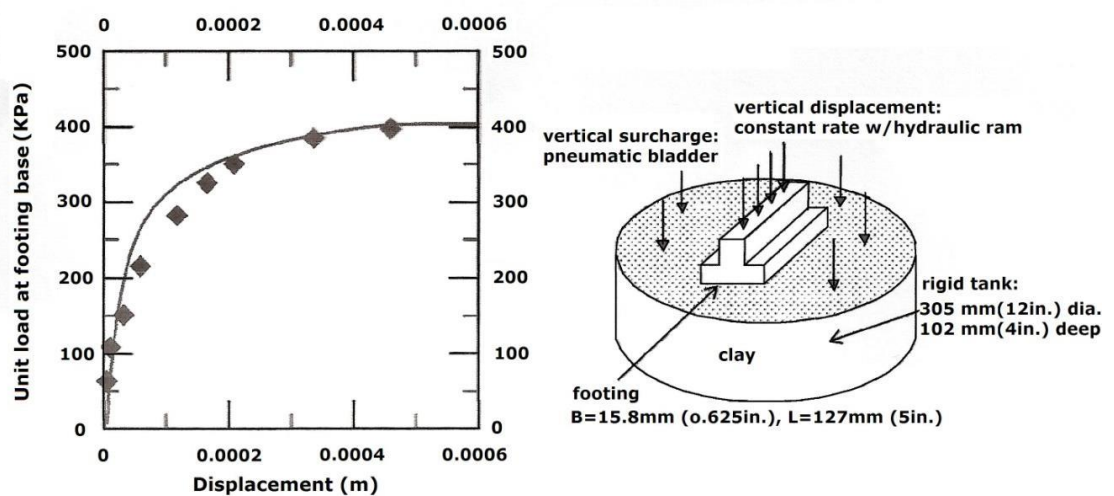
όπου  $I_1, I_2$ : συντελεστές επιρροής εξαρτώμενοι από το σχήμα των πεδίων, το πάχος της αργιλικής στρώσεως, το βάθος θεμελιώσεως,

$q_b$ : η φόρτιση στην βάση του πεδίου

$B$ : το πλάτος του πεδίου και

$E_u$ : το μέτρο Young.

Η εδαφική συμπεριφορά, ακόμη και σε περιπτώσεις που αναπτύσσονται πολύ μικρές παραμορφώσεις, είναι στην πραγματικότητα μη γραμμική, συνεπώς η παράβλεψη αυτής της ιδιαιτερότητας μπορεί τελικώς να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη κατά την εκτίμηση των καθιζήσεων. Ο Kondner (1963) πρότεινε την χρήση μιας διπαραμετρικής υπερβολικής καμπύλης προκειμένου να προσομοιώσει την μη γραμμική συμπεριφορά τάσεως–παραμορφώσεως του εδάφους. Μία παράμετρος εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο προσομοίωμα είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $c_u$ . Οι D' Arrolonia and Lambe (1970) εφάρμοσαν ένα διγραμμικό καταστατικό πρότυπο για την εκτίμηση της άμεσης καθιζήσεως πεδίων σε άργιλο. Οι Simon et al. (1974) χρησιμοποίησαν ένα υπερβολικό πρότυπο σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να αναπαράγουν τα αποτελέσματα από τα προσομοιώματα των Kinner and Ladd (1973).



Εικόνα 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεως πεπερασμένων στοιχείων και δοκιμής προτύπου πεδίου από τους Kinner and Ladd (1973)



Το πρότυπο αυτό συγχωνεύει χαρακτηριστικά του υπερβολικού και ταυτόχρονα του διγραμμικού προσομοιώματος. Η τεχνική αυτή επέτρεψε την προσομοίωση της συμπεριφοράς φόρτιση–καθίζηση μέχρι την αστοχία. Οι παράμετροι εισαγωγής υιοθετήθηκαν από τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών άμεσης διατμήσεως οι οποίες εκτελέστηκαν από τους Kinner and Ladd (1973). Στο Σχήμα 1.1 δίδεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με τα αποτελέσματα από την δοκιμή προτύπου πεδίου (“test 200”) από τους Kinner and Ladd (1973). Οι Foye et al. (2008) εφάρμοσαν, επίσης, ένα μη γραμμικό ελαστικό–ιδεατώς πλαστικό καταστατικό πρότυπο σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ένα αξονικά φορτιζόμενο πέδιλο εδραζόμενο σε αργιλικό έδαφος. Βάσει των αποτελεσμάτων της παραπάνω αναλύσεως σχεδίασαν διαγράμματα προκειμένου να εκτιμηθούν οι άμεσες καθιζήσεις σε τετραγωνικά και ορθογωνικά πέδιλα καθώς και σε πεδιλοδοκούς. Παράλληλα πρότειναν μια διαδικασία για την εκτίμηση των βασικών παραμέτρων εισαγωγής (αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$  και αρχικό μέτρο διατμήσεως  $G_0$  του εδάφους) εξετάζοντας διάφορες τιμές αντιπροσωπευτικού βάθους επιρροής.

Επιπλέον, η ύπαρξη του φαινομένου του ερπυσμού περιπλέκει την πρόβλεψη και του μεγέθους αλλά και του ρυθμού αναπτύξεως των καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων σε αργιλικά εδάφη. Οι περισσότερες πρακτικές μέθοδοι που σχετίζονται με θέματα ερπυσμού βασίζονται σε παρατηρήσεις του Buisman (1936) όπου ο ερπυσμός χαρακτηρίζεται μέσω μίας γραμμικής σχέσεως μεταξύ καθιζήσεως και λογαρίθμου του χρόνου. Η κλίση αυτής της σχέσεως (του λόγου) γενικά αντιστοιχεί στον συντελεστή δευτερογενούς συμπίεσεως  $C_\alpha$ , όπου:  $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ , όπου:  $\Delta e$  είναι η μεταβολή του λόγου κενών και  $t$  ο χρόνος. Οι Mesri and Godlewski (1977) διαπίστωσαν ότι ο  $C_\alpha$  σχετίζεται με τον δείκτη συμπίεστότητας  $C_c$  του εδάφους, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τιμές του λόγου  $C_a/C_c$  για διάφορα εδάφη κατά Mesri and Godlewski (1977).

Είδος εδάφους	$C_a/C_c$
Οργανικές ιλύες	0.035 – 0.06
Άμορφη και ινώδης τύρφη	0.035 – 0.085
Άργιλος Leda (Καναδάς)	0.03 – 0.06
Μεταπαγετώδεις άργιλοι Σουηδίας	0.05 – 0.07
Οργανικές άργιλοι	0.04 – 0.06

Οι Mesri et al. (1994) έδωσαν τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για υπερστερεοποιημένες αργίλους ο ρυθμός αναπτύξεως της καθιζήσεως από ερπυσμό είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.

Πίνακας 2. Τιμές του λόγου  $C_a/C_c$  για διάφορα εδάφη κατά Mesri et al. (1994).

Έδαφος	$C_a/C_c$
Κοκκώδη εδάφη, και αδρανή υλικά	$0.02 \pm 0.01$
Αργιλικός Σχιστόλιθος και Ιλυόλιθος	$0.03 \pm 0.01$
Ανόργανες άργιλοι και ιλύες	$0.04 \pm 0.01$
Οργανικές άργιλοι και ιλύες	$0.05 \pm 0.01$
Τύρφη και Βάλτος	$0.06 \pm 0.01$

### 3.2. Καθιζήσεις σε μη συνεκτικά εδάφη

Στα μη συνεκτικά εδάφη, στα οποία η συνοχή είναι ουσιαστικά μηδενική, ενώ αντίθετα η διαπερατότητά τους είναι πολύ μεγάλη, οι καθιζήσεις αναπτύσσονται ταχέως κάτω από την επιβολή μίας φορτίσεως και στην περίπτωση που αφορά σε μέσης πυκνότητας έως πυκνές άμμους οι προκαλούμενες καθιζήσεις έχουν σχετικά μικρή τιμή. Συχνά, οι καθιζήσεις που εκδηλώνονται σε άμμους ή χάλικες έχουν αρκετά χαμηλότερες τιμές από εκείνες που αναπτύσσονται σε αργιλικά εδάφη (Padfield and Sharrock 1983, Jardine et al. 1995). Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, λόγω της ελλείψεως της συνοχής, η συμπεριφορά των μη συνεκτικών εδαφών είναι μη γραμμική και για τον λόγο αυτό τα συγκεκριμένα υλικά δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν τέλεια μέσω της θεωρίας γραμμικής ελαστικότητας.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι η θεωρία γραμμικής ελαστικότητας, στην περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών, μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτιμήσεις των καθιζήσεων όταν πρόκειται για μεγάλες θεμελιώσεις, όπως π.χ. πλάκες γενικής κοιτοστρώσεως, εξαιτίας της παραδοχής του αρκετά μεγάλου βάθους επιρροής. Σύμφωνα με τους Berardi et al. (1991), για κυκλικά ή τετραγωνικά πέδιλα θεμελιώσεως μπορούν να ληφθούν αντίστοιχα τα επόμενα βάθη επιρροής:

$$z_1 = 1.2 \cdot B \text{ έως } 1.8 \cdot B, \text{ όπου επιτυγχάνεται το } 85\% \text{ της καθιζήσεως}$$
$$z_2 = 0.8 \cdot B \text{ έως } 1.3 \cdot B, \text{ όπου επιτυγχάνεται το } 75\% \text{ της καθιζήσεως,}$$

τα οποία εξαρτώνται από τις διαστάσεις της θεμελιώσεως, την διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του βάθους καθώς επίσης και από τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας της φέρουσας ικανότητας. Το πρόβλημα της εκτιμήσεως των καθιζήσεων σε μη συνεκτικούς σχηματισμούς είναι αρκετά πολύπλοκο και οφείλεται στους ποικίλους παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της καθιζήσεως. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι η κατανομή των τάσεων, η προϊστορία των τάσεων-παραμορφώσεων, η συμπιεστότητα του εδάφους, η δυσκολία λήψης αδιατάρακτων δειγμάτων κατά τις επί τόπου δοκιμές (Moorehouse 1972, Holzlohner 1984). Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί προκειμένου να εκτιμηθούν οι καθιζήσεις επιφανειακών θεμελιώσεων σε μη συνεκτικά εδάφη. Αυτές οι μέθοδοι ποικίλλουν από θεωρητικές εμπειρικές μεθόδους οι οποίες αναπτύχθηκαν αρχικά για συντηρητικό σχεδιασμό πεδίων, έως σύνθετες μη γραμμικές μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Πολλές από αυτές τις μεθόδους βασίζονται σε στοιχεία από επί τόπου δοκιμές S.P.T. ή C.P.T., και ως εκ τούτου δεν είναι δυνατό να εξετασθεί ικανοποιητικά η θεωρητική σχέση μεταξύ των ποικίλων μεθόδων.

Η δοκιμή S.P.T. (Standard Penetration Test), αν και είναι πολύ παλαιά, εξακολουθεί να αποτελεί την περισσότερο διαδεδομένη και συνήθη δοκιμή κατά τις διερευνήσεις του υπεδάφους για τον καθορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των μη συνεκτικών εδαφών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη δοκιμή παρέχει μόνο μια παράμετρο αστοχίας του εδάφους, τον αριθμό κρούσεων  $N$  του προτύπου δειγματολήπτη, η οποία είναι σχετικά δύσκολο να συσχετισθεί με μια παράμετρο παραμορφώσεως, που ουσιαστικά απαιτείται για τον υπολογισμό των

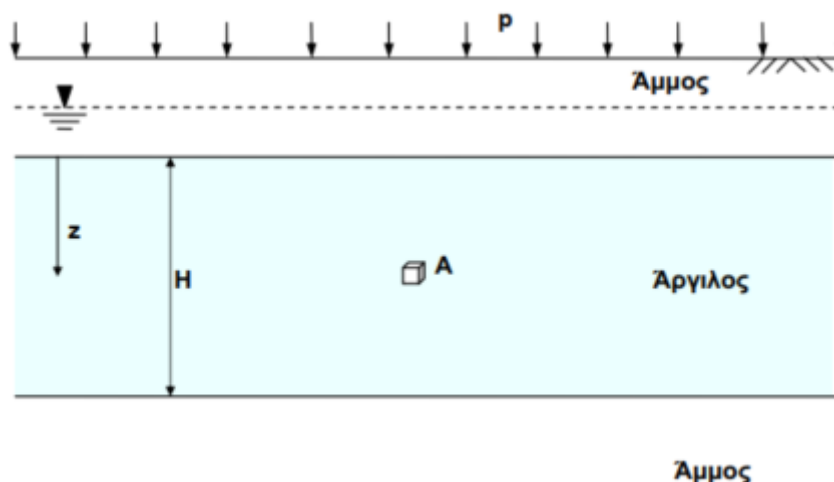
καθιζήσεων. Ο Bowles (1987), χρησιμοποίησε την σχέση που ακολουθεί συνδυάζοντας το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του εδάφους με τον αριθμό κρούσεων  $N$ :

$$E = 7.5 + 0.5N \text{ (MPa)}$$

Επίσης, ο αριθμός κρούσεων  $N$  (SPT) έχει συνδεθεί με το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E_s$  του εδάφους σύμφωνα με την σχέση  $E_s = 7.5 + 0.8N$  (MPa) από τους Paradopoulos and Anagnostopoulos (1987).

### 3.3. 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 (Βγενοπούλου, 2020).

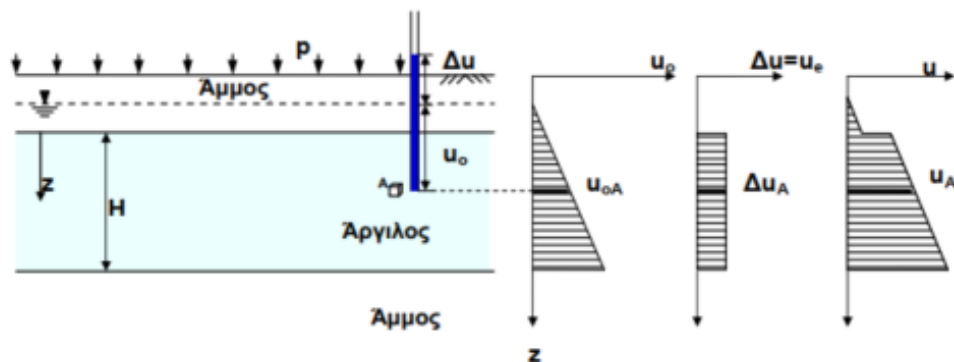


Εικόνα 6. Επιβολή εξωτερικού φορτίου σε εδαφική στρώση (Βγενοπούλου, 2020).

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.

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 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) (Βγενοπούλου, 2020).



Εικόνα 7. Μεταβολή της υδροστατικής πίεσης αργίλου μετά από επιβολή φορτίου (Βγενοπούλου, 2020).

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  $\sigma'$ . Η ενεργός τάση, σε ένα σημείο του εδάφους κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, είναι ίση με τη διαφορά της ολικής τάσης  $\sigma$  (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 (Βγενοπούλου, 2020). Οι καθιζήσεις του εδάφους οφείλονται στην ενεργό τάση και όχι στην ολική τάση (Güven, 2009).

Συνοψίζοντας ισχύει ότι αν  $\sigma_v$ ,  $\sigma_v'$ ,  $u$  οι αρχικές τιμές των τάσεων ( $\sigma_v = \sigma_v' + u$ ),  $p$  το επιβαλλόμενο φορτίο,  $\sigma_{va}$ ,  $\sigma_{va}'$ ,  $u_a$  οι αρχικές τιμές των τάσεων αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου,  $\sigma_{vi}$ ,  $\sigma_{vi}'$ ,  $u_i$  ενδιάμεσες τιμές των τάσεων (κατά τη διάρκεια της στράγγισης) και  $\sigma_{vt}$ ,  $\sigma_{vt}'$ ,  $u_t$  οι τελικές τιμές των τάσεων μετά τη στράγγιση, τότε ισχύουν τα εξής:

- Για  $t=0^+ \rightarrow \sigma_{va} = \sigma_v + p$ ,  $\sigma_{va}' = \sigma_v'$ ,  $u_a = u + p$
- Για  $0^+ < t < \infty \rightarrow \sigma_{vi} = \sigma_v + p$ ,  $\sigma_{vi}' = \sigma_v' + p_1$ ,  $u_i = u + p_2$ ,  $p = p_1 + p_2$
- Για  $t \rightarrow \infty \rightarrow \sigma_{vt} = \sigma_v + p$ ,  $\sigma_{vt}' = \sigma_v' + p$ ,  $u_t = u$

#### 3.4. 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 θεμελείωσης είναι ισότροπο και ομογενές. Οι ελαστικές ιδιότητες των εδαφών αυτών εκφράζονται από δύο συντελεστές ελαστικότητας, το Μέτρο Ελαστικότητας  $E$  και τον Λόγο του Poisson  $\nu$ , οι οποίοι χαρακτηρίζουν τη φυσική κατάσταση και τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

- Το μέτρο ελαστικότητας:

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

Όπου,  $\sigma$ : η τάση και  $\varepsilon$ : η αντίστοιχη παραμόρφωση κατά την διεύθυνση της τάσης.

➤ Ο λόγος του Poisson:

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

Όπου,  $\varepsilon_e$ : η εγκάρσια παραμόρφωση (κάθετα προς την διεύθυνση της τάσης) και  $\varepsilon$ : η αξονική παραμόρφωση (παράλληλη με τη διεύθυνση της τάσης).

### 3.5. 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:

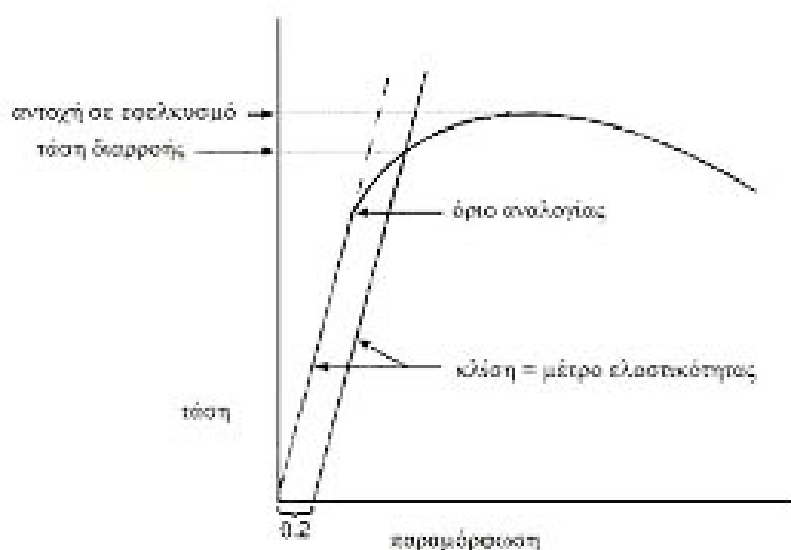
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

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).

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 πρεσιόμετρο ή με άλλους τρόπους. Χαρακτηριστικές τιμές του E σε Kg / cm<sup>2</sup> είναι:

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



Εικόνα 8. Γραφική παράσταση του μέτρου ελαστικότητας  
(<http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/105Kataponisi.html>)

### 3.6. Λόγος του Poisson $\nu$

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  $\nu = 0,30$ . Χαρακτηριστικές τιμές του Λόγου του Poisson  $\nu$  είναι:

- 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)

### **3.7. Τάσεις εξαιτίας επιβολής εξωτερικών φορτίων μέσα στο έδαφος**

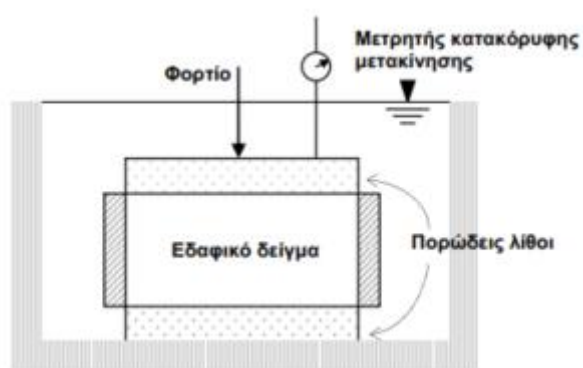
Η γνώση των τάσεων στο εσωτερικό του εδάφους λόγω εξωτερικών φορτίων είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της αντοχής του και για τον υπολογισμό των καθιζήσεων. Με σκοπό τον υπολογισμό των τάσεων αυτών γίνεται χρήση της θεωρίας Ελαστικότητας που προϋποθέτει το εδαφικό υλικό να είναι ομογενές, ισότροπο και να παρουσιάζει ελαστική – γραμμική συμπεριφορά (ισχύει ο νόμος του Hooke) (Βγενοπούλου, 2020).

Το έδαφος γενικά δεν παρουσιάζει τέτοιου είδους συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι ομογενές διότι πολύ συχνά παρουσιάζει στρωμάτωση, δηλαδή εμφανίζεται σε εδαφικές στρώσεις διαφορετικών μεταξύ τους ιδιοτήτων. Επίσης πολλές φορές παρουσιάζει διαφορές ως προς μια ιδιότητα ανάλογα με την κατεύθυνση δηλαδή δεν είναι ισότροπο. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζει παραμένουσες παραμορφώσεις η δε γραμμική συμπεριφορά παρατηρείται μόνον σε μικρές μεταβολές τάσεων – παραμορφώσεων. Παρόλα αυτά η μόνη μαθηματική θεωρία που υπάρχει για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι οι λύσεις Boussinesq που βασίζονται στη θεωρία της ελαστικότητας και αναφέρονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις φορτίσεων.

### **3.8. Εργαστηριακή δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης**

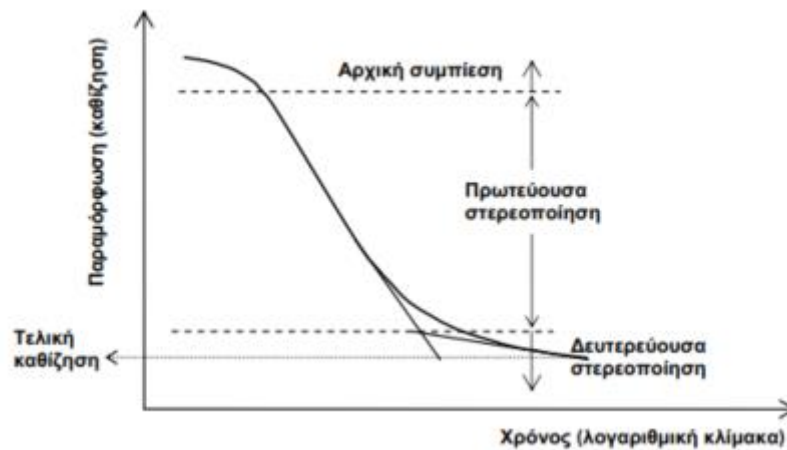
Η συμπίεση του στρώματος της αργίλου που φαίνεται στην Εικόνα 6, λόγω της μεγάλης έκτασης του φορτίου και της στρώσης σε σχέση με το πάχος της , θα

μπορούσε να θεωρηθεί πλευρικά περιορισμένη και επομένως μονοδιάστατη. Έτσι, αν θεωρήσουμε το στοιχείο A, αυτό υποβάλλεται σε κατακόρυφη και πλευρική τάση αλλά μόνον σε κατακόρυφη παραμόρφωση μια και η πλευρικά είναι περιορισμένο και δεν μπορεί να παραμορφωθεί. Η μελέτη μιας τέτοιας καταπόνησης μπορεί να γίνει εργαστηριακά με τη συσκευή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9. Συμπιεσόμετρο (οιδήμετρο) (Βγενοπούλου, 2020).

Η συσκευή αυτή καλείται οιδήμετρο ή συμπιεσόμετρο και χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μονοδιάστατης στερεοποίησης. Το αδιατάρακτο εδαφικό δείγμα A τοποθετείται μεταξύ δύο πορωδών λίθων σε ένα μεταλλικό δακτύλιο και εμβαπτίζεται σε δοχείο με νερό. Έτσι έχουμε ένα κορεσμένο δείγμα στο οποίο δεν επιτρέπονται οι πλευρικές παραμορφώσεις. Ακολούθως του επιβάλλεται αυξανόμενο κατακόρυφο φορτίο και ταυτόχρονα μετρείται η κατακόρυφη παραμόρφωση (καθίζηση). Η κατακόρυφη φόρτιση επιβάλλεται όσο αργά απαιτείται ώστε να γίνεται πλήρης στράγγιση του νερού με σωληνάκια (δεν απεικονίζονται στο σχήμα για λόγους απλοποίησης) και εκτόνωση της υπερπίεσης του νερού (μετρείται με ειδικό όργανο). Έτσι κάθε φορά η αύξηση του φορτίου μεταφέρεται στους στερεούς κόκκους και εκφράζεται σαν αύξηση της ενεργού τάσης. Η αύξηση του φορτίου γίνεται αφού έχει εκτονωθεί πλήρως η υπερπίεση του νερού των πόρων. Η διαδικασία αυτή της στράγγισης διαρκεί συνήθως 24 ώρες. Κάθε φορά το φορτίο διπλασιάζεται. Για κάθε βαθμίδα (αύξηση) της φόρτισης  $\Delta\sigma$  η εξέλιξη της μεταβολής του πάχους (παραμόρφωση ή καθίζηση) του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 10. Συμπίεση αργιλικού δείγματος συναρτήσει του χρόνου για δεδομένη αύξηση του φορτίου κατά  $\Delta\sigma$ .

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τρεις περιοχές όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

- ❖ Αρχική συμπίεση. Οφείλεται στην αρχική φόρτιση του δείγματος
- ❖ Πρωτεύουσα στερεοποίηση. Είναι η καθίζηση που οφείλεται στη διαδικασία της στράγγισης – στερεοποίησης που περιγράψαμε : εκτόνωση της υπερπίεσης- μεταφορά του φορτίου στους στερεούς κόκκους- αύξηση της ενεργού τάσης
- ❖ Δευτερεύουσα στερεοποίηση. Λαμβάνει χώρα μετά το τέλος του φαινομένου της στερεοποίησης και οφείλεται σε ερπυστικά φαινόμενα του εδάφους.

Μετά το τέλος των δοκιμών απ' όπου λαμβάνουμε ένα διάγραμμα του τύπου της Εικόνας 10 για κάθε φόρτιση, είναι χρήσιμο να παρακολουθήσουμε τη μεταβολή του τελικού δείκτη πόρων του εδαφικού δείγματος συναρτήσει της ενεργού τάσης για κάθε φόρτιση. Ο δείκτης πόρων προσδιορίζεται έμμεσα με τη μέτρηση της παραμόρφωσης του δείγματος από τη σχέση:

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

όπου :

H: το αρχικό πάχος του δοκιμίου

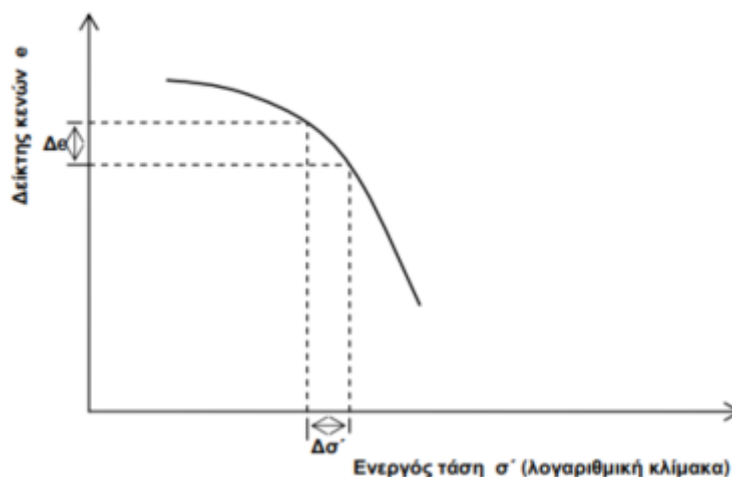
$\Delta H$ : η τελική μεταβολή του πάχους του δοκιμίου για τη συγκεκριμένη φόρτιση

$e_0$  : ο αρχικός δείκτης κενών του δείγματος

$e_1$ : ο τελικός δείκτης κενών του δείγματος

$\Delta e = e_0 - e_1$  η μεταβολή του δείκτη κενών

Έτσι , το διάγραμμα μεταβολής του δείκτη κενών συναρτήσει της ενεργού τάσης έχει την εξής μορφή:

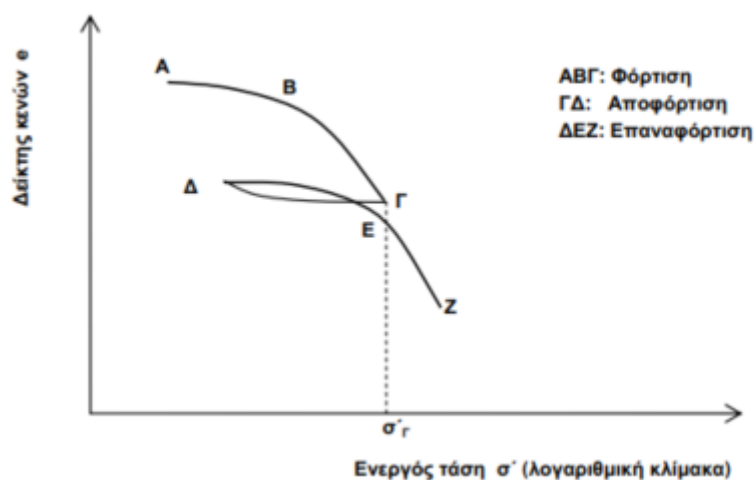


Εικόνα 11. Μεταβολή του δείκτη κενών  $e$  συναρτήσει της ενεργού τάσης  $\sigma'$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε σημείο της καμπύλης έχει προκύψει από ένα διάγραμμα του τύπου της Εικόνας 10 λαμβάνοντας την τιμή της τελικής καθίζησης (πάχους δοκιμίου) και την τάση για την οποία προέκυψε το διάγραμμα αυτό. Επίσης η ενεργός τάση  $\sigma'$  είναι ίση με την ολική  $\sigma$  εφόσον λαμβάνουμε την τελική καθίζηση η οποία αντιστοιχεί σε κατάσταση πλήρους εκτόνωσης των υπερπιέσεων οπότε όλο το φορτίο έχει μεταβιβαστεί στους κόκκους.

Όσον αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων εργαστηριακής δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης (προστερεοποιημένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλος), παρατηρούμε ότι η καμπύλη της Εικόνας 11 έχει ένα καμπύλο και ένα σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα. Προκειμένου να διερευνηθεί η αιτία για τη μορφή αυτή

της καμπύλης προβαίνουμε σε διαδοχική φόρτιση και αποφόρτιση του δοκιμίου. Προκύπτουν καμπύλες της μορφής:



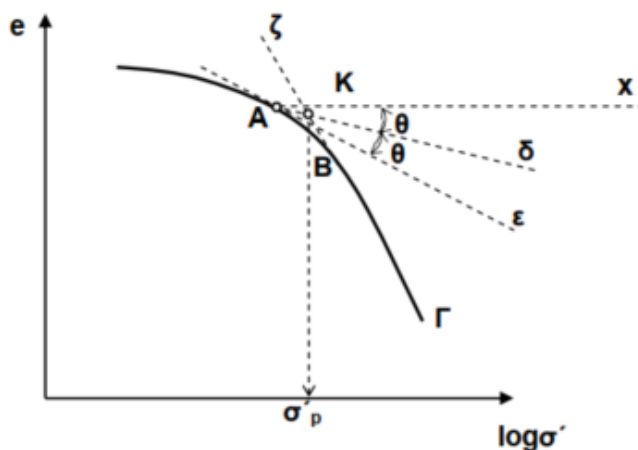
Εικόνα 12. Μεταβολή του δείκτη κενών  $e$  συναρτήσει της ενεργούτάσης  $\sigma'$  κατά τη διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης.

Η καμπύλη ΑΒΓ αντιστοιχεί στην αρχική φόρτιση του δείγματος. Η καμπύλη ΓΔ σε αποφόρτιση (έχουμε μείωση της τάσης) και η καμπύλη ΔΕΖ σε επαναφόρτιση του δείγματος. Παρατηρούμε ότι στην καμπύλη ΔΕΖ το τμήμα ΔΕ είναι καμπύλο και έχει μικρή κλίση. Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση που το δείγμα έχει δεχθεί ήδη στο παρελθόν ( $\sigma' < \sigma'_{\Gamma}$ ). Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή του δείκτη κενών, και επομένως η καθίζηση, είναι αισθητά μικρότερη όταν η τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο είναι μικρότερη από αυτήν που έχει δεχτεί μέχρι τη στιγμή εκείνη η άργιλος από τη μεταβολή του δείκτη κενών όταν η τάση που δέχεται η άργιλος είναι η μεγαλύτερη που έχει δεχτεί μέχρι τώρα. Στο πεδίο, η μείωση του υπερκείμενου φορτίου μπορεί να συμβεί από κάποιους γεωλογικούς λόγους ή από ανθρώπινες επεμβάσεις. Ανάλογα επομένως με το ιστορικό των τάσεων που έχει δεχτεί μια άργιλος, καθορίζεται η συμπεριφορά της σε παραμόρφωση (καθίζηση) και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες.

Κανονικά στερεοποιημένη: Καλείται η άργιλος όταν η τάση που δέχεται στην παρούσα φάση είναι η μεγαλύτερη που έχει δεχτεί ποτέ στην ιστορία ης.

Υπερστερεοποιημένη ή υπερπροφορτισμένη: Καλείται η άργιλος όταν στο παρελθόν έχει δεχτεί μεγαλύτερη τάση απ' αυτήν που δέχεται στην παρούσα φάση. Η μέγιστη τάση που έχει δεχτεί ποτέ καλείται τάση προστερεοποίησης.

Η τάση προστερεοποίησης  $\sigma'_p$  προσδιορίζεται εργαστηριακά από το διάγραμμα  $e - \log \sigma'$  ως εξής:



Εικόνα 13. Προσδιορισμός της τάσης προστερεοποίησης.

1. Βρίσκουμε το σημείο A με τη μεγαλύτερη καμπυλότητα φέρνουμε την οριζόντια ημιευθεία Ax.
2. Φέρνουμε την εφαπτομένη Ae στο A.
3. Προεκτείνουμε το ευθύγραμμο τμήμα ΒΓ της καμπύλης  $e - \log \sigma'$
4. Φέρνουμε τη διχοτόμο Αδ της γωνίας xAε.
5. Το σημείο τομής K της Αδ με την ΓΒζ αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση προστερεοποίησης  $\sigma'_p$ .

Ορίζεται ως λόγος προστερεοποίησης OCR:

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'}$$

όπου:  $\sigma'_p$  η μέγιστη τάση προστερεοποίησης και  $\sigma'$  η παρούσα ενεργός κατακόρυφη τάση

Σχετικά με τον υπολογισμό της καθίζησης λόγω στερεοποίησης γίνεται αναφορά στους συντελεστές συμπίεστικότητας. Από την επεξεργασία του διαγράμματος  $e - \log \sigma'$  παρατηρείται ότι:

- η μεταβολή του δείκτη κενών για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο (ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος ΒΓ) προκύπτει από τη σχέση:

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

Ο συντελεστής  $C_c$  ονομάζεται δείκτης συμπίεστικότητας και είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος ΒΓ της καμπύλης ΑΒΓ. Προσδιορίζεται εργαστηριακά αλλά δίνεται και από εμπειρικές σχέσεις όπως  $C_c = 0.009(w_L - 10)$ , όπου  $w_L$  το όριο υδαρότητας.

- η μεταβολή του δείκτη κενών για υπερστερεοποιημένη άργιλο (καμπύλο τμήμα του διαγράμματος ΑΒ) 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 ΑΒ.

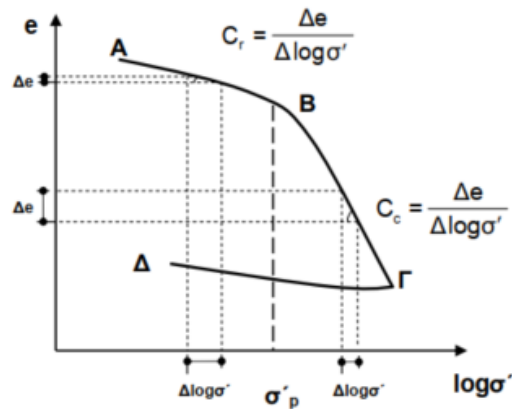
- Κατά τον ίδιο τρόπο ορίζεται ο δείκτης διόγκωσης  $C_s$  :

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

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 το δείκτη συμπίεστικότητας  $C_c$ :

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



Εικόνα 14. Δείκτης συμπίεστος  $C_c$  και δείκτης συμπίεστος σε επαναφόρτιση  $C_r$ .

Η τελική καθίζηση στη δοκιμή συμπίεσομέτρου δίνεται από τη 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) ( $\sigma'_{\text{άρχ}} < \sigma'_{\text{τελ}} < \sigma'_p$ ) η μεταβολή του δείκτη πόρων μπορεί να αντικατασταθεί και η τελική καθίζηση να προκύψει ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H}{H} = \frac{C_r \Delta \log \sigma'}{1+e_0} &\Rightarrow \Delta H = C_r \frac{H_0}{1+e_0} \Delta \log \sigma' = C_r \frac{H_0}{1+e_0} (\log \sigma'_{\text{τελ}} - \log \sigma'_{\text{άρχ}}) \Rightarrow \\ \Delta H &= C_r \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{\text{τελ}}}{\sigma'_{\text{άρχ}}} \end{aligned}$$

Για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους όταν δηλαδή η παρούσα αρχική ενεργός τάση είναι η μεγαλύτερη που έχει δεχτεί ποτέ η άργιλος ( $\sigma'_{\text{άρχ}} = \sigma'_p < \sigma'_{\text{τελ}}$ ) τότε η τελική καθίζηση προκύπτει με ανάλογο τρόπο:

$$\Delta H = C_c \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{\text{τελ}}}{\sigma'_{\text{άρχ}}}$$



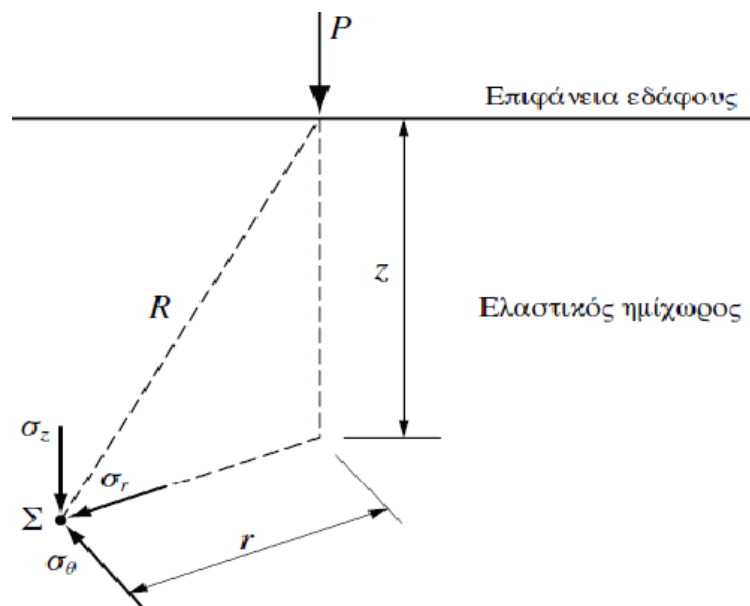
Σε περίπτωση που :  $\sigma'_{\text{αρχ}} < \sigma'_p$  αλλά  $\sigma'_p < \sigma'_{\text{τελ}}$  τότε η καθίζηση δίνεται με επαλληλία των δύο περιπτώσεων:

$$\Delta H = C_r \frac{H_o}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{\text{αρχ}}} + C_c \frac{H_o}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_{\text{τελ}}}{\sigma'_p}$$

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

### 3.9. 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.



Εικόνα 15. Οι τάσεις στον ελαστικό ημιχώρο (Σακελλαρίου, 2003).

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:

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

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

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

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

Όπου:

- $R^2 = r^2 + z^2$
- $\nu$ , 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:

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

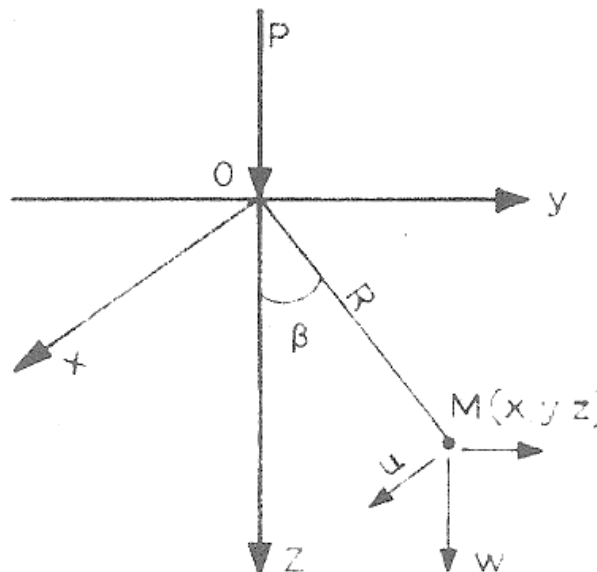
$$v = P \frac{1 + \nu}{2\pi E} \left[ \frac{yz}{R^3} - \frac{(1 - 2\nu)y}{R(R+z)} \right]$$

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

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.



Εικόνα 16. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις σημειακής φόρτισης  $P$ .

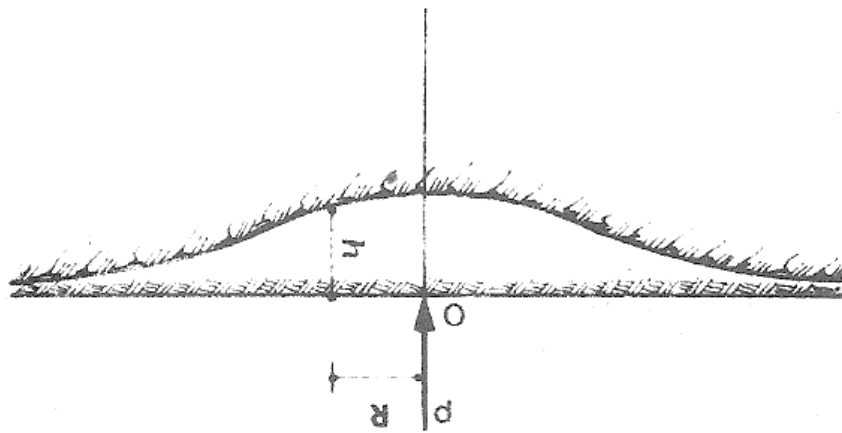
Αν χρησιμοποιηθεί σαν μεταβλητή η γωνία  $\beta$  του τριγώνου (ZOM) η τελευταία εξίσωση γράφεται:

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

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

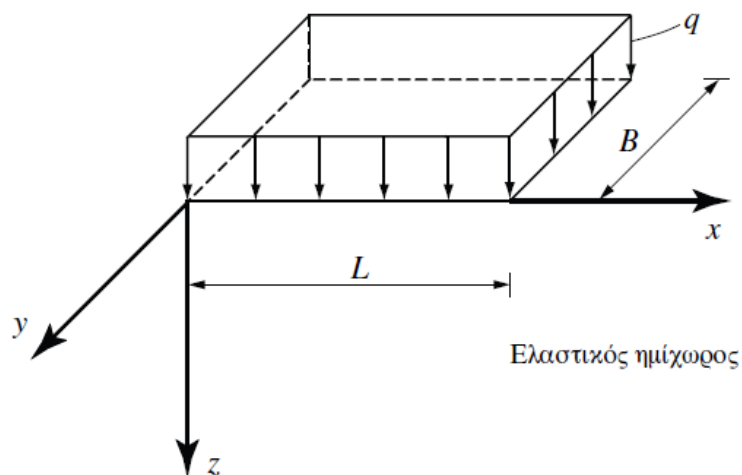
$$w = \frac{1 - \nu}{2\pi GR}$$

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.



Εικόνα 17. Καθίζηση σε βάθος  $h$  μετά από επιβολή σημειακής φόρτισης  $P$ .

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



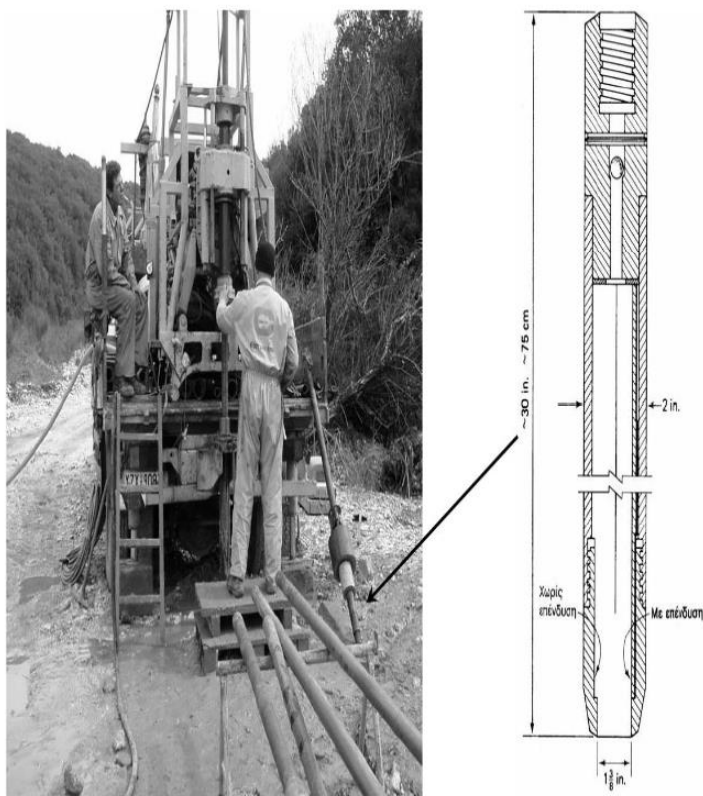
Εικόνα 18. Ο ελαστικός ημίχωρος σε περίπτωση ομοιόμορφης φόρτισης.

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.

## 4. Δοκιμές στο πεδίο

### 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).



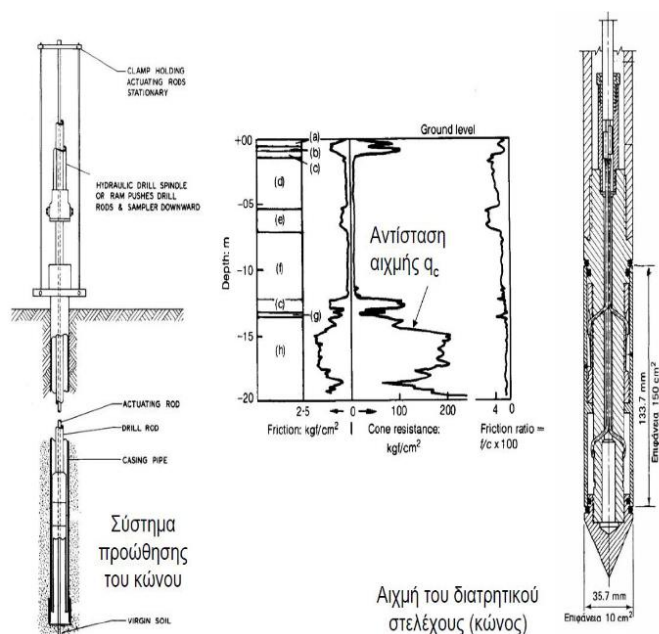
Εικόνα 19. Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) (<https://geotrasi.net>).

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 τ (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 (Σακελλαρίου, 2003).

#### 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



Εικόνα 20. Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου.

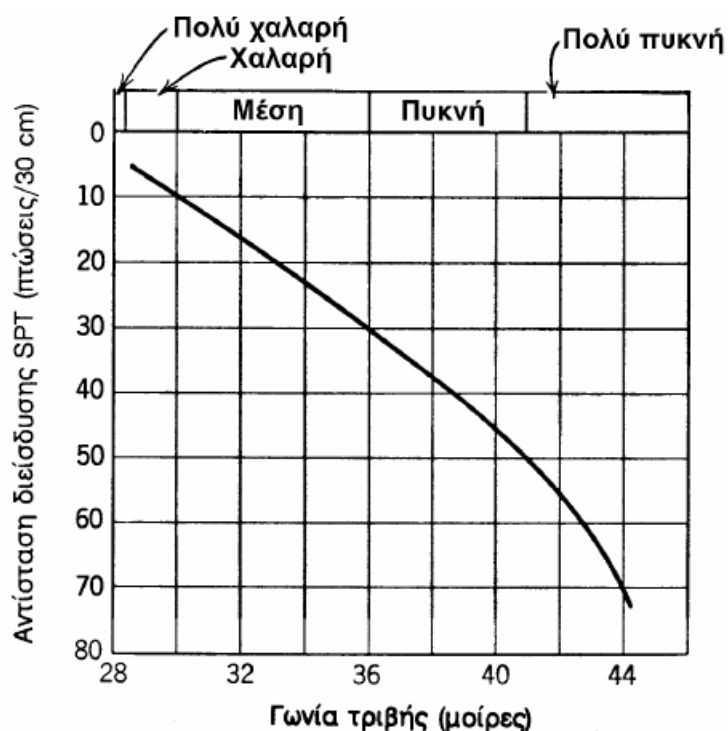
Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη συνεχή προχώρηση με ταχύτητα 1-2 m/min, ενός κώνου με αιχμή 60 μοιρών και διατομή 10 cm<sup>2</sup>. Κατά τη διείσδυση του κώνου μετράται η αντίσταση στην προχώρηση της αιχμής και η αντίσταση (πλευρική τριβή) στην προχώρηση του πλευρικού μανδύα με επιφάνεια 100 cm<sup>2</sup>. 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 21. Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT) (<https://docplayer.gr/4864811-Tehniki-ereyna-toy-ypedafoys.html>)

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 συνδυασμό 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. 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 πρόωξης του κώνου.





Εικόνα 22. Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής

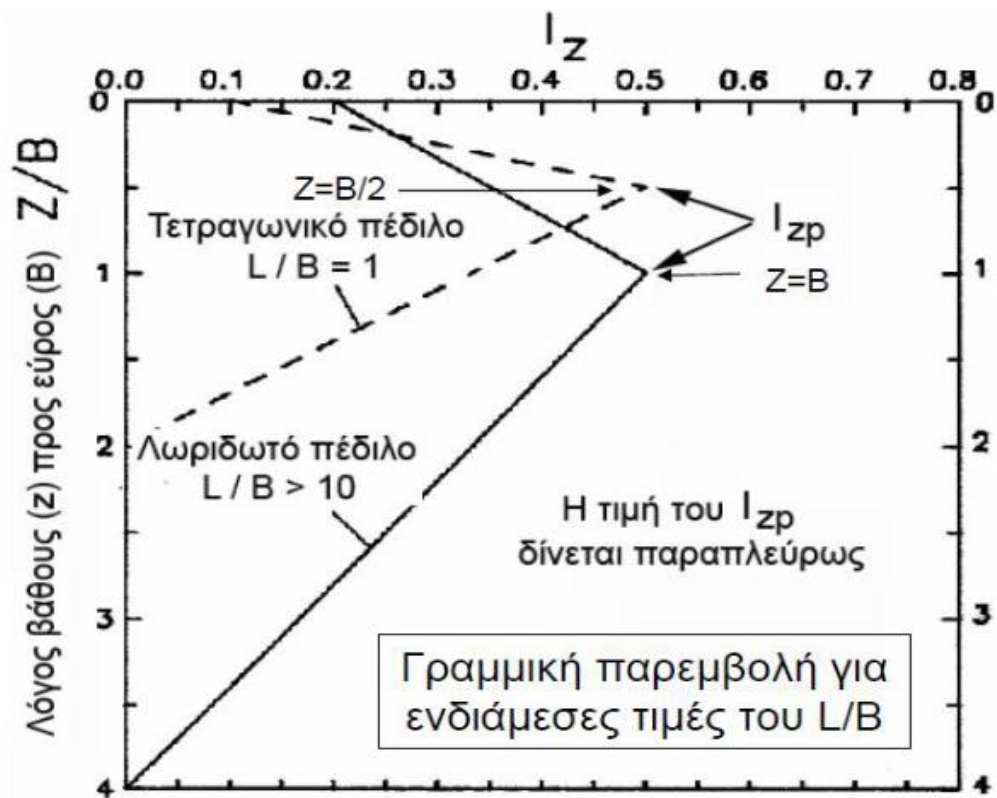
#### 4.1.3. Δοκιμή Πτερυγίου (FVT)

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 συνδυασμό 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 πτερύγιο 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.



Εικόνα 23. Η τριγωνική κατανομή της μεθόδου Schmertmann  
(<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Foundations/06-settlements.pdf>)

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

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

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

$$l_{zp} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{|q - \sigma'_{vD}|}{\sigma'_{vI}}}$$

όπου:

- $\sigma'_{vD}$ : η κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος της έδρασης.
- $\sigma'_{vI}$ : η κατακόρυφη ενεργός τάση σε βάθος  $z$  κάτω από το βάθος έδρασης.

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

- $\sigma_0$ : η προϋπάρχουσα 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 προσυμπίεση 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 (Σακελλαρίου, 2003).

## 5. Μελέτη περίπτωσης: Μέθοδος boussinesq σε excel

### 5.1. Τάσεις εδάφους λόγω εξωτερικού φορτίου

Ο υπολογισμός της εντατικής κατάστασης στο εσωτερικό του εδάφους από φόρτιση στην ελεύθερη επιφάνειά του (θεμέλια, αναχώματα, φράγματα κλπ.) είναι απαραίτητος για τον απολογισμό των καθιζήσεων και τον έλεγχο της αντοχής του εδάφους. Οι συμβατικές μέθοδοι υπολογισμού των τάσεων στο εσωτερικό του εδάφους βασίζονται στην ελαστική θεωρία (θεωρία Boussinesq). Οι παραδοχές της ελαστικής θεωρίας είναι ότι το υλικό θεμελίωσης είναι ισότροπο, ομογενές, εκτείνεται σε ημιάπειρο χώρο, και υπακούει στο νόμο του Hooke.

Τα φυσικά εδάφη σπάνια παρουσιάζουν συμπεριφορά που να ανταποκρίνεται στις παραπάνω παραδοχές. Παρόλα αυτά η θεωρία του Boussinesq είναι η μόνη μαθηματική θεωρία που είναι διαθέσιμη σήμερα, σε εύχρηστους τύπους και νομογραφήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας από τον μηχανικό.

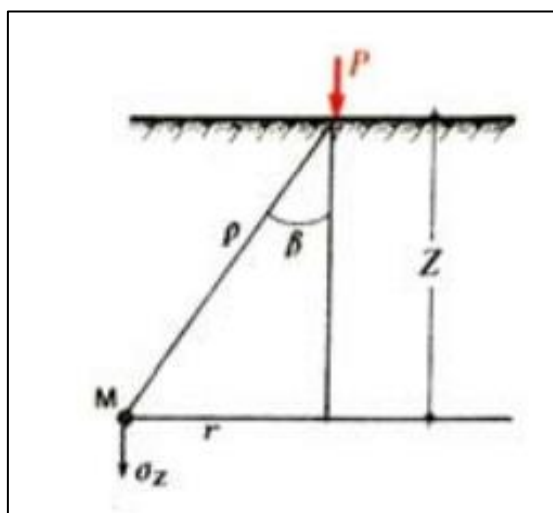
Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι ο απολογισμός των κατακόρυφων τάσεων, όπως υπολογίζονται με την ελαστική θεωρία είναι παραδεκτός σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα ο υπολογισμός των ορθών τάσεων στις άλλες διευθύνσεις και των διατμητικών τάσεων, απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα, ώστε η ελαστική θεωρία να πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή για τις περιπτώσεις αυτές.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών επιτρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των τάσεων και των παραμορφώσεων του εδάφους με μεγαλύτερες δυνατότητες από αυτές που έδινε μέχρι σήμερα η ελαστική θεωρία.

Μεταξύ των μεθόδων αυτών ή πιο πολυδύναμη φαίνεται να είναι ή μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από τη γενικότητά της και από την ευελιξία της, επειδή μπορεί να εφαρμοστεί με μικρές παραλλαγές σε όλα τα προβλήματα της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση προβλημάτων σε ανομοιογενή και ανισότροπα υλικά με μη γραμμικό νόμο τάσεων και παραμορφώσεων. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα για υλικά που παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά.

### 5.1.1. Εξισώσεις της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για κατακόρυφο μοναχικό φορτίο

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προέκυψε από την εφαρμογή των εξισώσεων της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για κατακόρυφο μοναχικό φορτίο με σκοπό τον υπολογισμό των εδαφικών τάσεων λόγω εξωτερικού φορτίου με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων σε πρόγραμμα Excel.



Εικόνα 24. Άσκηση κατακόρυφου μοναχικού φορτίου.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν τις βασικές παραμέτρους για την εφαρμογή των εξισώσεων του Boussinesq.

Εξισώσεις της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για κατακόρυφο μοναχικό φορτίο	
P	Κατακόρυφο μοναχικό φορτίο
r	Οριζόντια απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από το φορτίο
z	Κατακόρυφη απόσταση από το φορτίο στο σημείο ενδιαφέροντος
I <sub>σ</sub>	Συντελεστής τάσης Boussinesq
σ <sub>z</sub>	Κατακόρυφη τάση

Εικόνα 25. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel.

Οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς είναι οι εξής:

<p>Τύπος υπολογισμού της κατακόρυφης τάσης σ<sub>z</sub>:</p> $\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} * \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$	<p>Όπου</p> $I_\sigma = \frac{3}{2\pi} * \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$
--	---

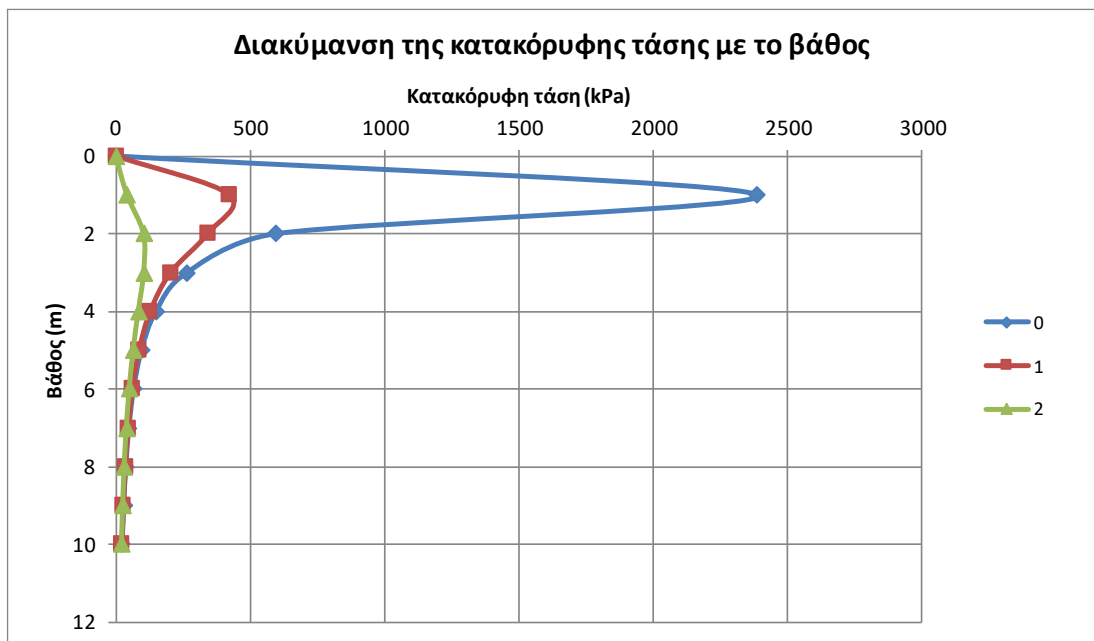
Εικόνα 26. Οι εξισώσεις του Boussinesq σε excel.

Με σκοπό την ανάλυση αυτής της περίπτωσης εφαρμογής της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για κατακόρυφο μοναχικό φορτίο πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για διαφορετικές κατακόρυφες όσο και οριζόντιες αποστάσεις. Συγκεκριμένα, διαχωρίστηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη για σταθερό βάθος εξετάζονται οι διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων για οριζόντιες αποστάσεις από 0 έως 10 ανά 1 μέτρο και η δεύτερη εξετάζει για σταθερή οριζόντια απόσταση τα διαφορετικά αποτελέσματα τάσεων για βάθη από 0 έως 10 με βήμα 1 μέτρο. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, P είναι το φορτίο που ασκείται, r η οριζόντια απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από το φορτίο και z η κατακόρυφη απόσταση από το φορτίο στο σημείο ενδιαφέροντος.

Δεδομένα											
P (kN)	5000										
r (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2387.32	422.02	42.71	7.55	2.00	0.69	0.29	0.14	0.07	0.04	0.02
2	596.83	341.65	105.51	31.34	10.68	4.22	1.89	0.93	0.50	0.29	0.17
3	265.26	203.83	105.78	46.89	20.63	9.56	4.75	2.52	1.42	0.84	0.52
4	149.21	128.22	85.41	48.89	26.38	14.19	7.84	4.49	2.67	1.65	1.05
5	95.49	86.57	65.89	44.27	27.72	16.88	10.27	6.33	3.99	2.58	1.71
6	66.31	61.92	50.96	37.96	26.45	17.74	11.72	7.74	5.16	3.48	2.39
7	48.72	46.32	40.04	31.96	24.04	17.38	12.29	8.61	6.03	4.25	3.02
8	37.30	35.88	32.06	26.85	21.35	16.36	12.22	9.01	6.59	4.83	3.55
9	29.47	28.58	26.13	22.65	18.78	15.04	11.75	9.03	6.87	5.21	3.95
10	23.87	23.29	21.64	19.25	16.47	13.67	11.07	8.81	6.93	5.42	4.22

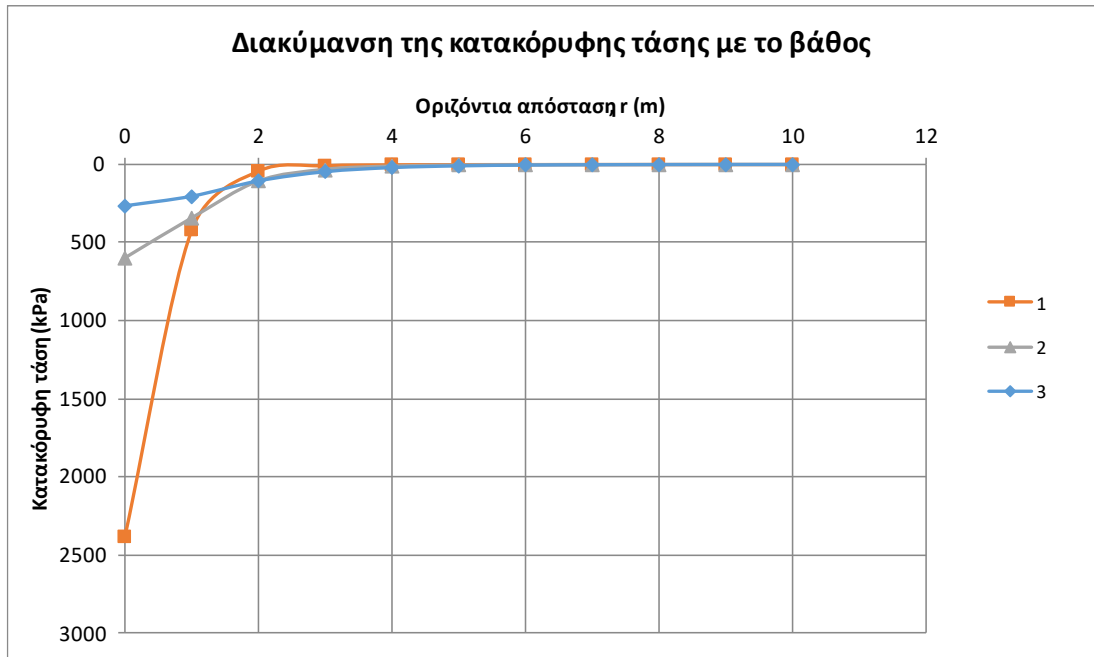
Εικόνα 27. Οι υπολογισμοί των κατακόρυφων τάσεων για διαφορετικές οριζόντιες αποστάσεις και βάθη από την επιβολή μοναχικού φορτίου.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα που δείχνουν τη διακύμανση της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια για τις περιπτώσεις των αποστάσεων για 0,1 και 2 μέτρα.



Εικόνα 28. Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης όπου φαίνεται η διακύμανση της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος.

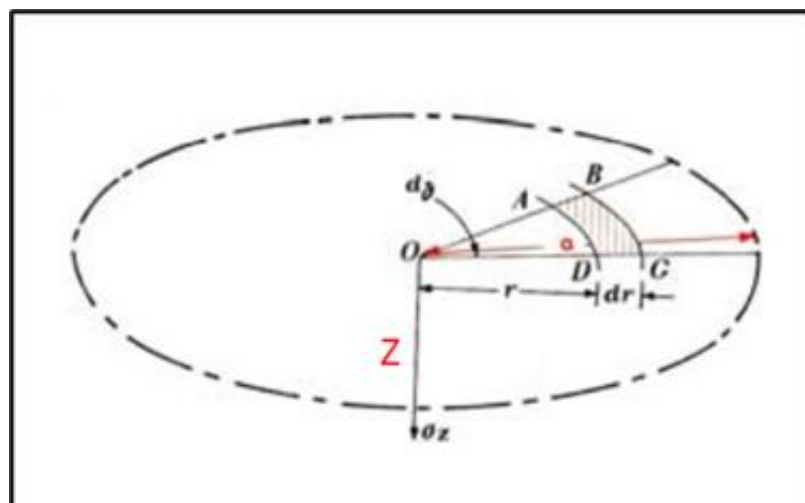




Εικόνα 29. Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης όπου φαίνεται η διακύμανση της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με την οριζόντια.

### 5.1.2. Τάσεις κάτω από το κέντρο κυκλικής επιφάνειας που φορτίζεται ομοιόμορφα

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προέκυψε από την εφαρμογή των εξισώσεων για τάσεις κάτω από το κέντρο κυκλικής επιφάνειας που φορτίζεται ομοιόμορφα με σκοπό τον υπολογισμό των εδαφικών τάσεων με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων σε πρόγραμμα Excel.



Εικόνα 30. Άσκηση κατακόρυφης τάσης κάτω από το κέντρο O κυκλικής επιφάνειας.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν τις βασικές παραμέτρους για την εφαρμογή της εξίσωσης υπολογισμού της κατακόρυφης τάσης.

Τάσεις κάτω από το κέντρο κυκλικής επιφάνειας που φορτίζεται ομοιόμορφα	
P	Κατακόρυφο φορτίο
$\alpha$	Ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας
z	Βάθος
$I_\sigma$	Συντελεστής τάσης Boussinesq
$\sigma_z$	Κατακόρυφη τάση κάτω από το κέντρο

Εικόνα 31. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel.

Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ήδη πίνακας ο οποίος διευκολύνει τους υπολογισμούς καθώς παρουσιάζει τιμές του συντελεστής τάσης  $I_\sigma$  ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών του πηλίκου  $z/\alpha$  όπου z είναι το βάθος και  $\alpha$  είναι η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας.

$z/\alpha$	$I_\sigma$	$z/\alpha$	$I_\sigma$	$z/\alpha$	$I_\sigma$
0	1	1	0.646	2	0.284
0.1	0.999	1.1	0.595	2.1	0.264
0.2	0.992	1.2	0.547	2.2	0.245
0.3	0.97	1.3	0.502	2.3	0.229
0.4	0.949	1.4	0.461	2.4	0.214
0.5	0.911	1.5	0.424	2.5	0.2
0.6	0.864	1.6	0.39	3	0.146
0.7	0.818	1.7	0.36	4	0.087
0.8	0.756	1.8	0.332	5	0.057
0.9	0.701	1.9	0.307	10	0.015

Εικόνα 32. Πίνακας με τις τιμές του συντελεστής τάσης  $I_\sigma$  ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών του πηλίκου  $z/\alpha$ .

Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για κυκλική επιφάνεια ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

Τύπος υπολογισμού της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = I_\sigma * P$$

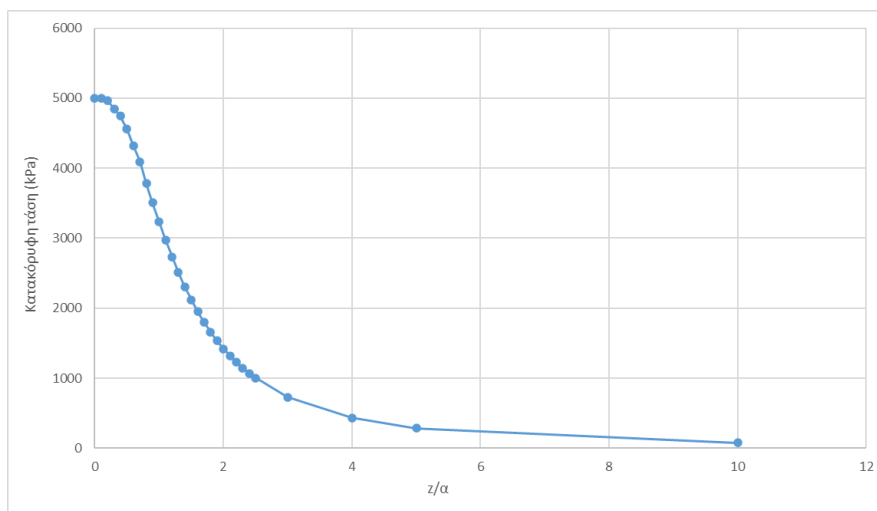
Εικόνα 33. Ο τύπος Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για κυκλική επιφάνεια.

Με βάση τον παραπάνω τύπο και τον παραπάνω πίνακα με τις τιμές του συντελεστή τάσης  $I_\sigma$  ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών του πηλίκου  $z/\alpha$  πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί όπως φαίνονται στη συνέχεια.

$z/\alpha$	$\sigma_z$	$z/\alpha$	$\sigma_z$	$z/\alpha$	$\sigma_z$
0	5000	1	3230	2	1420
0.1	4995	1.1	2975	2.1	1320
0.2	4960	1.2	2735	2.2	1225
0.3	4850	1.3	2510	2.3	1145
0.4	4745	1.4	2305	2.4	1070
0.5	4555	1.5	2120	2.5	1000
0.6	4320	1.6	1950	3	730
0.7	4090	1.7	1800	4	435
0.8	3780	1.8	1660	5	285
0.9	3505	1.9	1535	10	75

Εικόνα 34. Οι υπολογισμοί των κατακόρυφων τάσεων για κυκλική επιφάνεια.

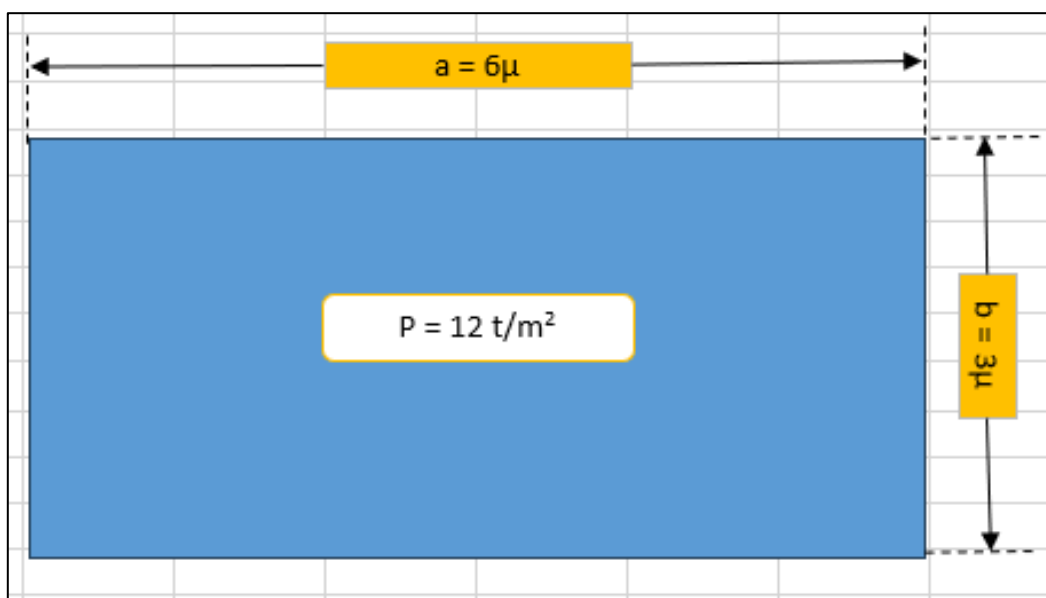
Οι υπολογισμοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία διαγράμματος το οποίο απεικονίζει την κατακόρυφη τάση για τις διαφορετικές τιμές του πηλίκου  $z/\alpha$ .



Εικόνα 35. Διάγραμμα απεικόνισης της κατακόρυφης τάσης για τις διαφορετικές τιμές του πηλίκου  $z/\alpha$ .

### 5.1.3. Τάσεις κάτω από ορθογωνική επιφάνεια που φορτίζεται με συνεχές φορτίο

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προέκυψε από την εφαρμογή των εξισώσεων της ελαστικής μεθόδου του Boussinesq για τάσεις κάτω από ορθογωνική επιφάνεια που φορτίζεται με συνεχές φορτίο με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων σε πρόγραμμα Excel.



Εικόνα 36. Φόρτιση ορθογωνικής επιφάνειας με ομοιόμορφο φορτίο.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν τις βασικές παραμέτρους για την εφαρμογή της εξίσωσης υπολογισμού της κατακόρυφης τάσης.

Τάσεις κάτω από ορθογωνική επιφάνεια που φορτίζεται με συνεχές φορτίο	
P	Κατακόρυφο φορτίο
a	Μήκος
b	Πλάτος
z	Βάθος
$I_0$	Συντελεστής τάσης Boussinesq
$\sigma_z$	Κατακόρυφη τάση κάτω από το κέντρο

Εικόνα 37. Βασικές παράμετροι της μεθόδου σε excel.

<b>Δεδομένα</b>			
<b>P (t/m<sup>2</sup>)</b>	12	<b>z/b</b>	<b>a/b</b>
<b>a (m)</b>	6	1.00	2.00
<b>b (m)</b>	3		
<b>z (m)</b>	3		

Εικόνα 38. Δεδομένα για τον υπολογισμό των τάσεων.

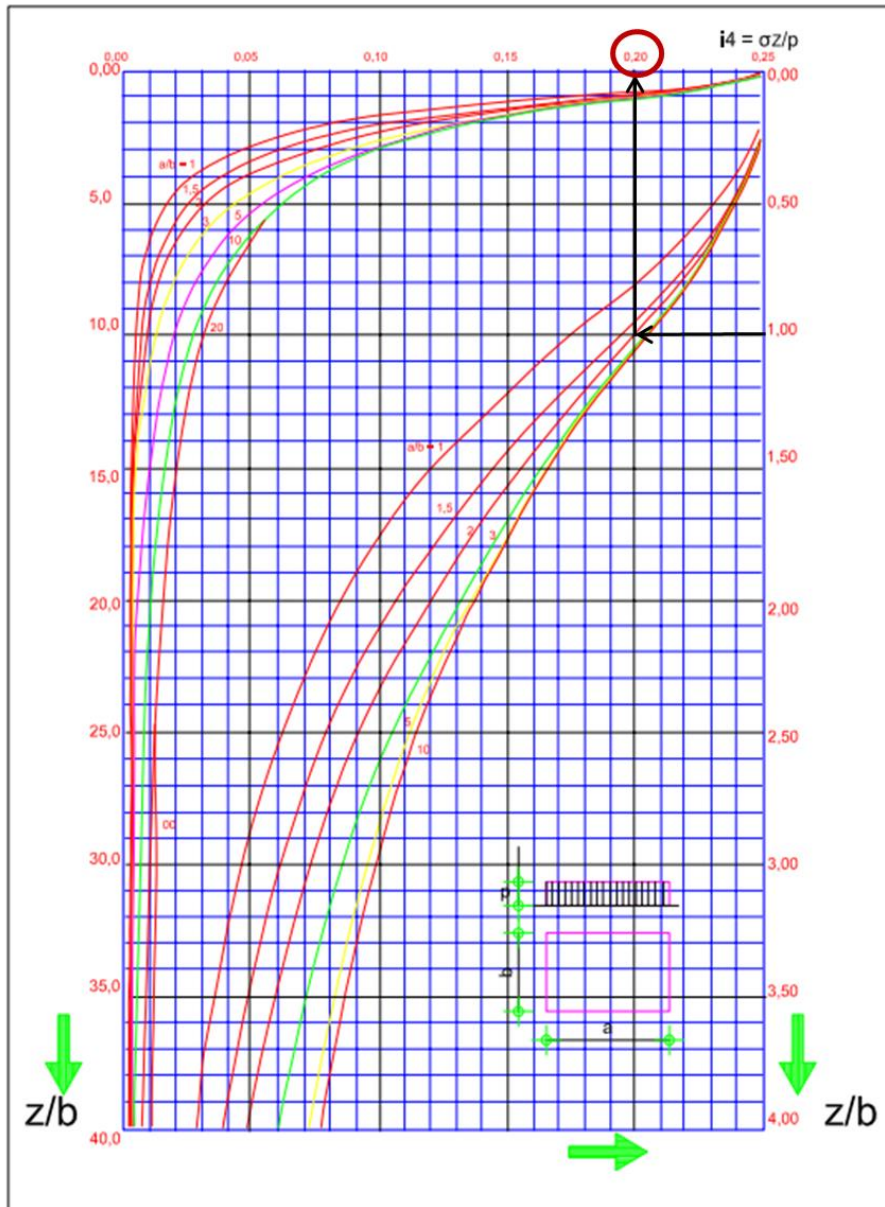
Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για ορθογωνική επιφάνεια ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

Τύπος υπολογισμού της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = I_\sigma * P$$

Εικόνα 39. Ο τύπος Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης για ορθογωνική επιφάνεια.

Σε αυτήν την περίπτωση έχει δημιουργηθεί νομογράφημα το οποίο διευκολύνει τους υπολογισμούς καθώς παρουσιάζει τιμές του συντελεστής τάσης  $I_\sigma$  ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών των πηλίκων  $z/b$  όπου  $z$  είναι το βάθος και  $a$  είναι το μήκος και  $a/b$  όπου  $a$  είναι το μήκος και  $b$  το πλάτος της ορθογωνικής επιφάνειας.

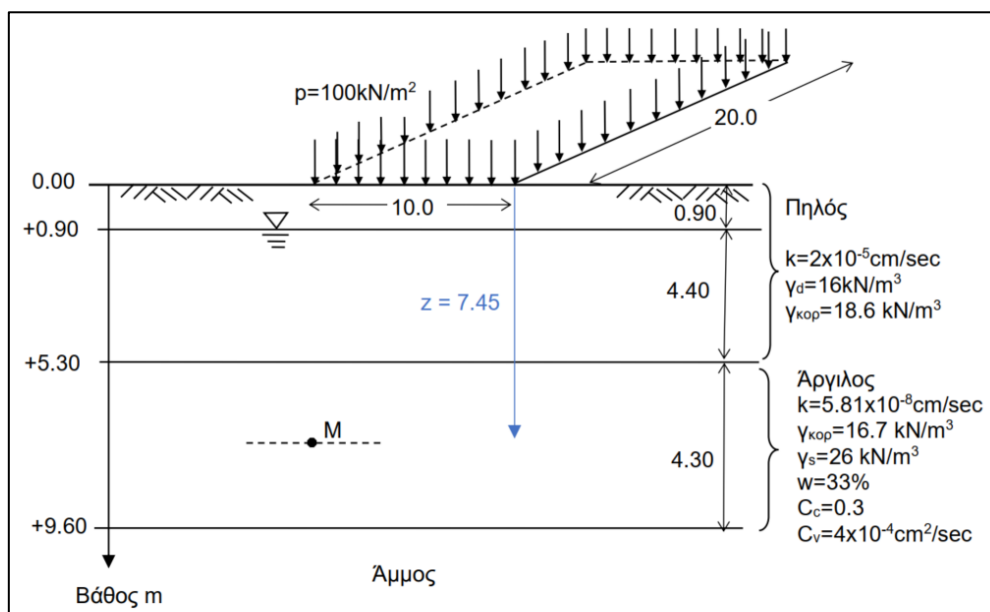


Εικόνα 40. Νομογράφημα για την εύρεση των τιμών του συντελεστή τάσης  $i_4$  ως αντιστοιχία διαφορετικών τιμών των πηλίκων  $z/b$  και  $a/b$ .

Στο παράδειγμα που έχει υπολογισθεί όπως φαίνεται και στο νομογράφημα η τιμή του συντελεστή  $i_4$  είναι ίση με 0,20. Επομένως εφαρμόζοντας τον τύπο η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται ίση με 2,4 (t/m<sup>2</sup>).

#### 5.1.4. Υπολογισμός καθιζήσεων σε περίπτωση ορθογωνικού φορτίου σε έδαφος με στρώσεις πηλού και αργίλου

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι ο υπολογισμός με τη χρήση προγράμματος excel της καθίζησης σε περίπτωση που ασκείται φορτίο από ορθογωνική επιφάνεια στο έδαφος με διαστάσεις 10x20m και σε βάθος 7,45m από την ελεύθερη επιφάνεια (στο μέσο της αργιλικής στρώσης). Η φόρτιση που ασκείται στην ελεύθερη επιφάνεια είναι ίση με 100 kN/m<sup>2</sup>. Ο υπόγειος υδάτινος ορίζοντας είναι σε βάθος 0,90m από την ελεύθερη επιφάνεια. Το έδαφος αποτελείται από μία στρώση πηλού έως το βάθος +5,30m (πάχος ολόκληρης της στρώσης 5,30m – ξηρής και κορεσμένης) και στη συνέχεια από στρώση αργίλου μέχρι το βάθος +9,60m με πάχος 4,30m. Η στρώση του πηλού πάνω από τον υδροφόρο έχει φαινόμενο βάρος  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$  και το κορεσμένο τμήμα κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου έχει φαινόμενο βάρος ίσο με  $\gamma_{\text{κορ}} = 16,7 \text{ kN/m}^3$ . Η περιεκτικότητα της αργιλικής στρώσης σε νερό είναι ίση με  $w = 33\%$ , το φαινόμενο βάρος των στερεών συστατικών είναι ίσο με  $\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$ , το φαινόμενο βάρος είναι ίσο με  $\gamma_{\text{κορ}} = 16,7 \text{ kN/m}^3$ . Παρακάτω παρουσιάζεται το σχήμα που αντιπροσωπεύει τα παραπάνω στοιχεία.



Εικόνα 41. Σχηματική απεικόνιση της τομής του εδάφους στο οποίο θα υπολογιστεί η καθίζηση από την φόρτιση ορθογωνικής επιφάνειας.

Το πρώτο βήμα αποτελεί η εισαγωγή των υψών που αφορούν τις στρώσεις και την επιφάνεια του υδροφόρου και ο υπολογισμός του πάχους με κριτήριο το γεγονός ότι οι υπολογισμοί των τάσεων θα γίνουν στο μέση της αργλικής στρώσης.

	Στάθμη 1	Στάθμη 2	Στάθμη 3	Στάθμη 4
Βάθη γεώτρησης	0	0.9	5.3	9.6
Ύψος νερού (m)	6.55			
Ύψος φορτίου-μέσο αργ.στρώσης (m)	7.45			

Εικόνα 42. Ο διαχωρισμός των στρώσεων για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακα τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων οι οποίες έχουν διαχωριστεί με κριτήριο το είδος του υλικού αλλά και την ύπαρξη του υδροφόρου ορίζοντα.

Στοιχεία φορτίου	
P (kN/m <sup>2</sup> )	100
a (m)	20
b (m)	10
<b>Στρώση 1 (Πηλός ξηρός)</b>	
k (cm/sec)	2.00E-05
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	16
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18.6
πάχος (m)	0.9
<b>Στρώση 2 (Πηλός κορ.)</b>	
k (cm/sec)	2.00E-05
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	16
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18.6
πάχος (m)	4.4
<b>Στρώση 3 (Αργιλος)</b>	
k (cm/sec)	5.81E-08
γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	26
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	16.7
πάχος (m)	2.15
w (%)	0.33
C <sub>c</sub>	0.3
C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /sec)	4.00E-04

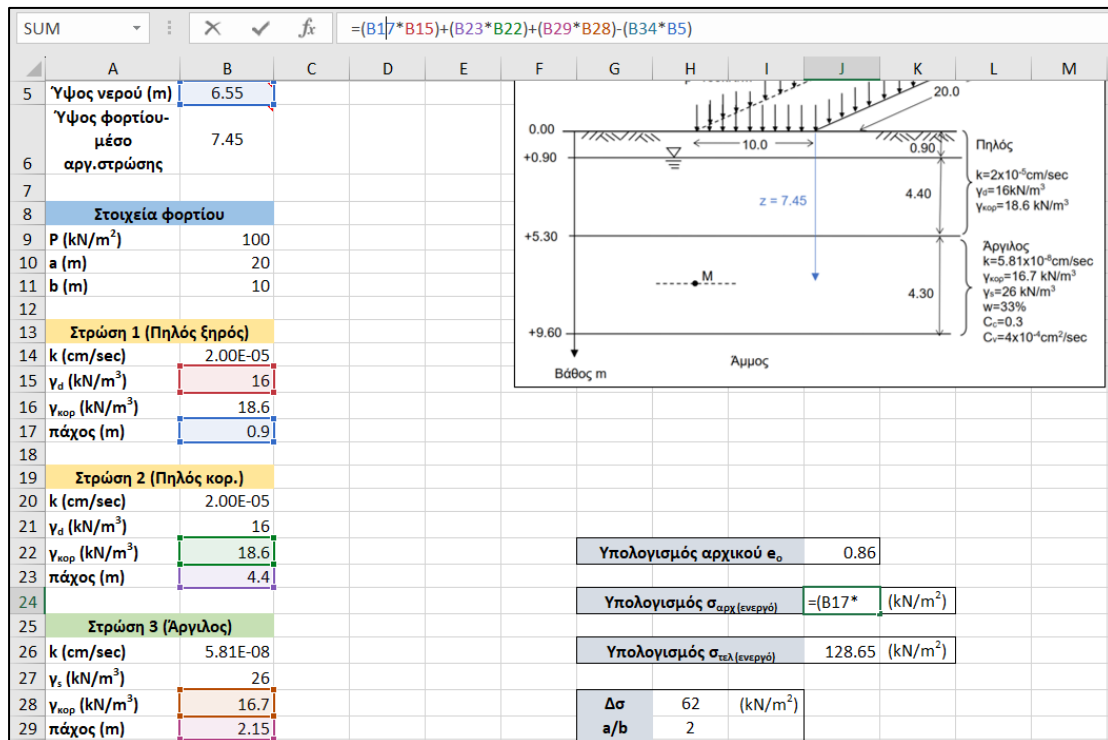
Εικόνα 43. Τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων.



Αρχικά, υπολογίζεται ο δείκτης κενών από την παρακάτω σχέση ίσος με 0,86.

$$e_o = \frac{w \gamma_s}{\gamma_w}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η αρχική ενεργή τάση στο μέσο M της αργιλικής στρώσης μέσω excel όπως φαίνεται παρακάτω:



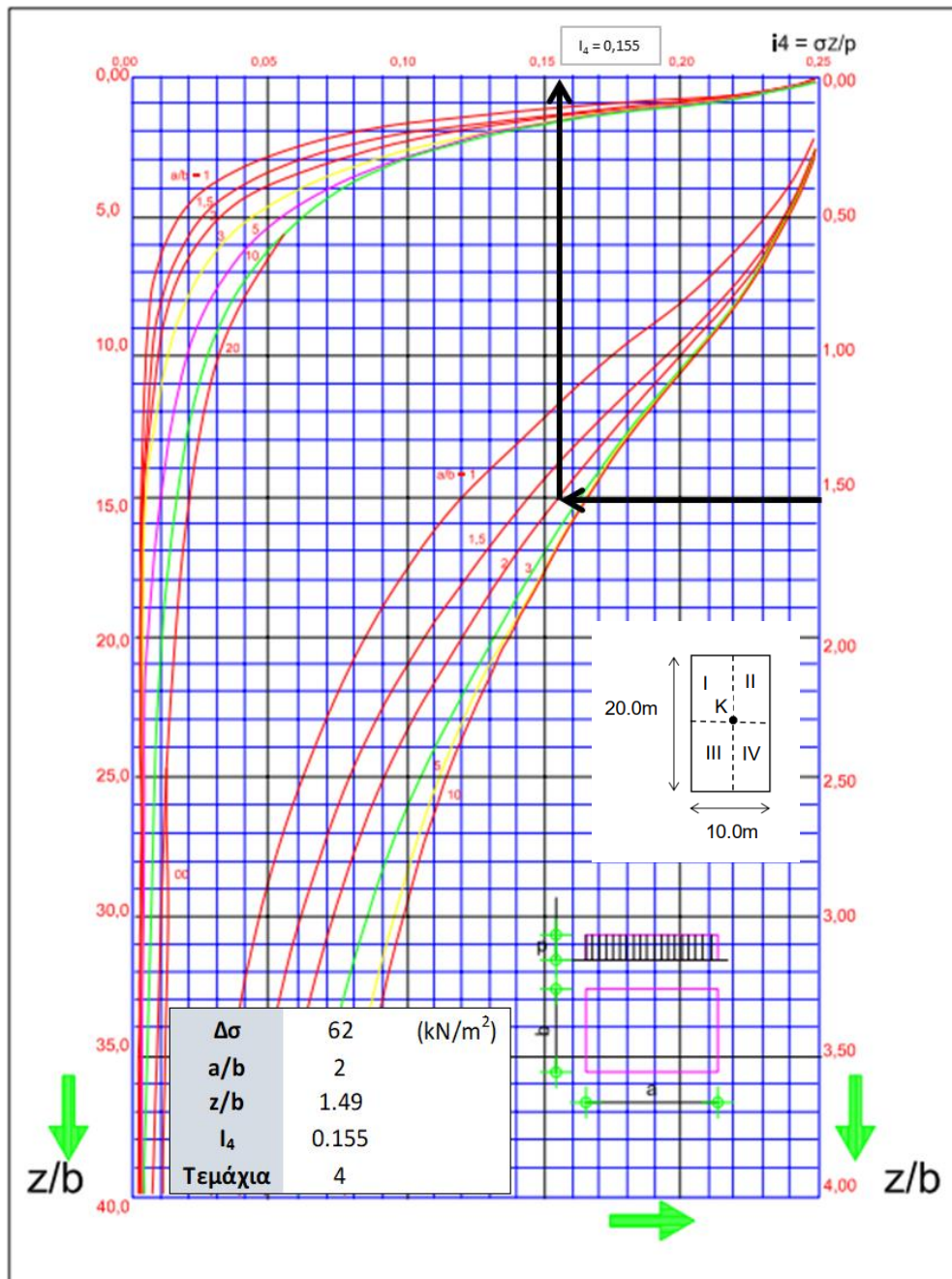
Εικόνα 44. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της αρχικής ενεργής τάσης.

Η τελική ενεργός τάση  $\bar{\sigma}_{τελ}$  είναι η αρχική συν την τάση λόγω του εξωτερικού φορτίου:

$$\bar{\sigma}_{τελ} = \bar{\sigma}_{αρχ} + \Delta\sigma$$

Επομένως, υπολογίζεται πρώτα η κατακόρυφη τάση λόγω άσκησης εξωτερικού φορτίου ορθογωνικής επιφάνειας. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρώτα υπολογίζονται τα πηλικά a/b και z/b ώστε μέσω του νομογραφήματος να υπολογιστεί ο συντελεστής Iσ και στη συνέχεια μέσω του τύπου  $\sigma_z = I\sigma * P$  να υπολογιστεί η κατακόρυφη τάση. Σημειώνεται ότι ως προς την τελική ενεργή τάση έχουμε ανάλογα με το σημείο που ψάχνουμε να βρούμε

την τάση, θα έχουμε και τις ανάλογες διαστάσεις στο φορτίο, ώστε το σημείο στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την τάση να είναι στη γωνία του ορθογωνίου φορτίου, οπότε διαφοροποιούνται οι διαστάσεις  $a$  &  $b$  και τα τεμάχια. Ο υπολογισμός του  $\Delta\sigma$  γίνεται κάτω από το μέσο της ορθογωνικής επιφάνειας του φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζεται το νομογράφημα για τον υπολογισμό του συντελεστή  $I_4$  και ο πίνακας με τις υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων  $a/b$ ,  $z/b$ ,  $I_4$  και  $\Delta\sigma$ .



Εικόνα 45. Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή  $I_4$ .

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της καθίζησης μέσω του παρακάτω τύπου:

Τύπος υπολογισμού της ολική καθίζησης  $S_{\infty}$  ( $\Delta H$ ) :

$$\Delta H = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma_{τελ}}{\sigma_{αρχ}}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται απόσπασμα από το φύλλο του excel στο οποίο υπολογίζεται η καθίζηση αρχικά σε μέτρα και στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή σε εκατοστά με τελική τιμή ίση με 19,83 εκατοστά.

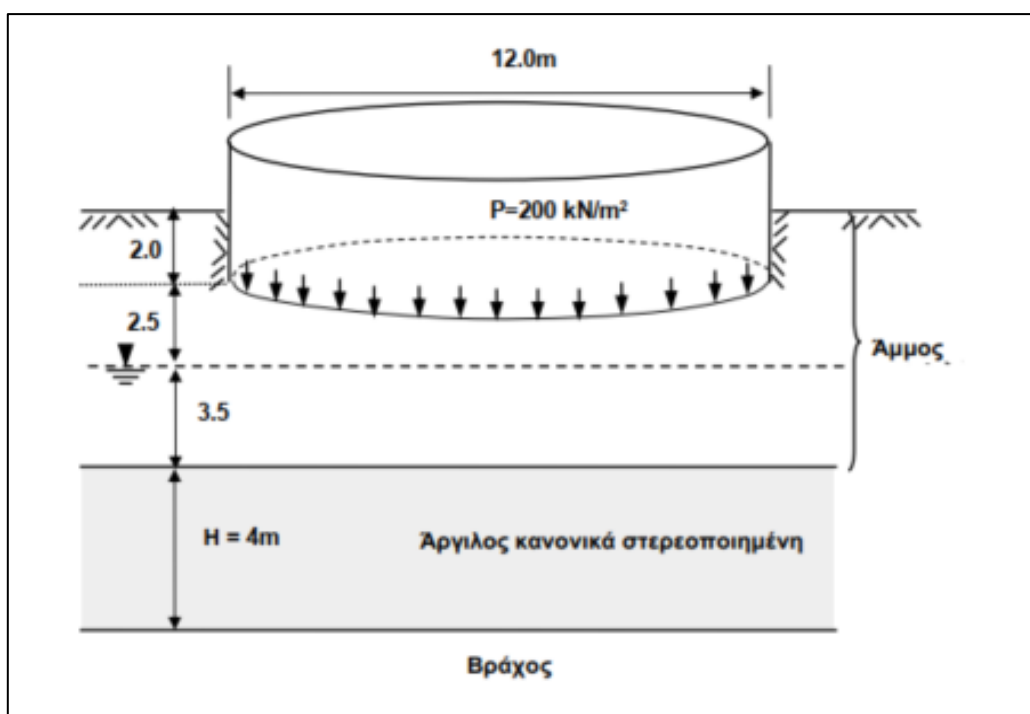
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K										
21	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	16																			
22	$\gamma_{κορ}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.6					Υπολογισμός αρχικού $e_0$			0.86											
23	πάχος (m)	4.4					Υπολογισμός $\sigma_{αρχ}$ (ενεργό)			66.65	(kN/m <sup>2</sup> )										
24							Υπολογισμός $\sigma_{τελ}$ (ενεργό)			128.65	(kN/m <sup>2</sup> )										
25	Στρώση 3 (Αργίλος)																				
26	k (cm/sec)	5.81E-08					$\Delta\sigma$	62		(kN/m <sup>2</sup> )											
27	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26					a/b	2													
28	$\gamma_{κορ}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.7					z/b	1.49													
29	πάχος (m)	2.15					$I_4$	0.155													
30	w (%)	0.33					Τεμάχια	4													
31	$C_c$	0.3																			
32	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	4.00E-04																			
33																					
34	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10																			
35																					
36	<p>Ο διαχωρισμός των στρώσεων γίνεται:                      -Σύμφωνα με τον υδροφόρο ορίζοντα και                      -Με το είδος του υλικού                      Στη στρώση της αργίλου η καθίζηση υπολογίζεται στο μέσο της στρώσης</p>						<p>Ως προς την τελική ενεργή τάση έχουμε:                      Ανάλογα με το σημείο που ψάχνουμε να βρούμε την τάση, θα έχουμε και τις ανάλογες διαστάσεις στο φορτίο, ώστε το σημείο στο οποίο ψάχνουμε την τάση να είναι στη γωνία του ορθογωνίου φορτίου.                      Οπότε διαφοροποιούνται οι διαστάσεις a &amp; b και τα τεμάχια.                      Για τον υπολογισμό του <math>\Delta\sigma</math> το <math>I_4</math> προκύπτει από το νομογράφημα</p>														
37																					
38																					
39																					
40																					
41																					
42																					
43																					
44																					
45																					
46																					
47							$\Delta H$	J24))		m											
48							$\Delta H$	19.83		cm											
49																					

Εικόνα 46. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της καθίζησης.

### 5.1.5. Υπολογισμός καθιζήσεων σε περίπτωση φορτίου κυκλικής επιφάνειας σε έδαφος με στρώσεις άμμου και αργίλου

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι ο υπολογισμός με τη χρήση προγράμματος excel της καθίζησης σε περίπτωση που ασκείται φορτίο από κυκλική επιφάνεια στο έδαφος. Συγκεκριμένα, αναλύεται η περίπτωση της κατασκευής κυλινδρικής

δεξαμενής διαμέτρου 12.0m. Η δεξαμενή θα θεμελιωθεί σε βάθος 2m από την επιφάνεια του εδάφους. Η στρώση της άμμου έχει πάχος 7 μέτρα ενώ το πάχος της αργίλου είναι 4 μέτρα. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 4,5 μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το φαινόμενο βάρος της άμμου είναι ίσο με  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ , το φαινόμενο βάρος της κορεσμένης άμμου είναι ίσο με  $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ . Το φαινόμενο βάρος της αργίλου είναι ίσο με  $\gamma_{sat} = 22 \text{ kN/m}^3$  ενώ ο δείκτης πόρων ισούται με  $e_o = 0,83$ , και ο δείκτης συμπίεσης και ο συντελεστής στερεοποίησης  $C_c = 0,25$  και  $C_v = 9,8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 47. Σχηματική απεικόνιση της τομής του εδάφους στο οποίο θα υπολογιστεί η καθίζηση από την φόρτιση κυκλικής επιφάνειας.

Το πρώτο βήμα αποτελεί η εισαγωγή των υψών που αφορούν τις στρώσεις και την επιφάνεια του υδροφόρου και ο υπολογισμός του πάχους με κριτήριο το γεγονός ότι οι υπολογισμοί των τάσεων θα γίνουν στο μέση της αργιλικής στρώσης.

	Στάθμη 1	Στάθμη 2	Στάθμη 3	Στάθμη 4
Βάθη γεώτρησης	0	4.5	8	12
Βάθος εκσκαφής	2			
Ύψος νερού (m)	5.5			
Ύψος φορτίου-μέσο αργ.στρώσης (m)	8			

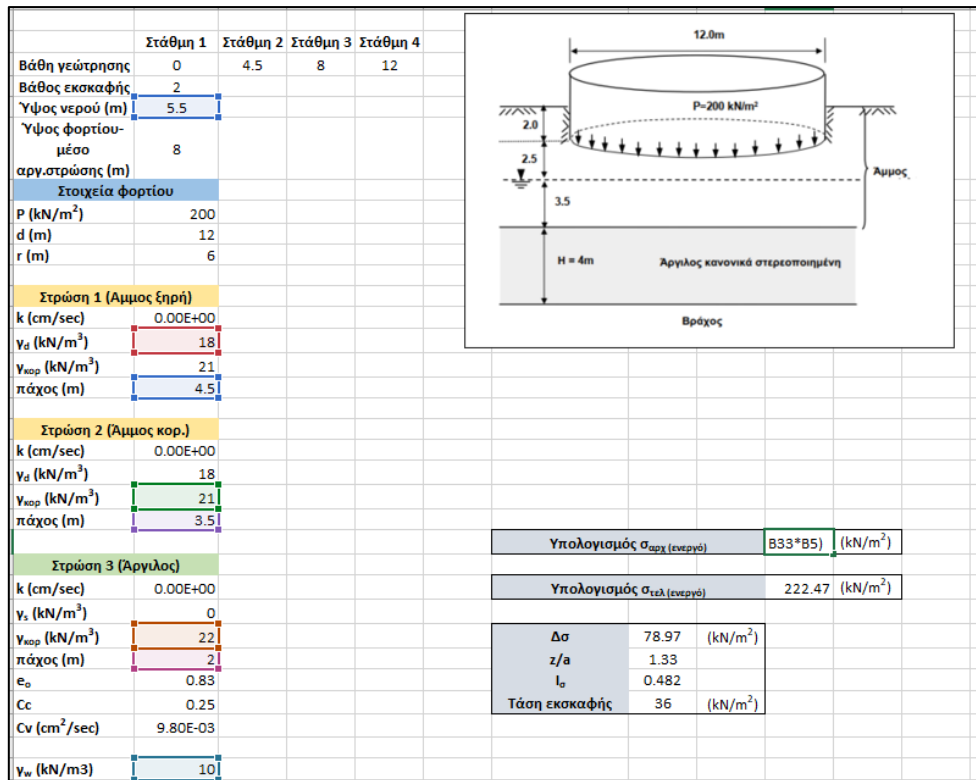
Εικόνα 48. Ο διαχωρισμός των στρώσεων για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακα τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων οι οποίες έχουν διαχωριστεί με κριτήριο το είδος του υλικού (άμμος & άργιλος) αλλά και την ύπαρξη του υδροφόρου ορίζοντα.

Στοιχεία φορτίου	
P (kN/m <sup>2</sup> )	200
d (m)	12
r (m)	6
<b>Στρώση 1 (Άμμος ξηρή)</b>	
k (cm/sec)	0.00E+00
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	21
πάχος (m)	4.5
<b>Στρώση 2 (Άμμος κορ.)</b>	
k (cm/sec)	0.00E+00
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	21
πάχος (m)	3.5
<b>Στρώση 3 (Άργιλος)</b>	
k (cm/sec)	0.00E+00
γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	0
γ <sub>κορ</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	22
πάχος (m)	2
e <sub>o</sub>	0.83
C <sub>c</sub>	0.25
C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /sec)	9.80E-03

Εικόνα 49. Τα στοιχεία του φορτίου καθώς και των επιμέρους στρώσεων.

Στην περίπτωση αυτή δίνεται ο δείκτης κενών απευθείας οπότε το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αρχικής ενεργής τάσης μέσω excel όπως φαίνεται παρακάτω η οποία υπολογίστηκε ίση με 143,5 kN/m<sup>3</sup>:



Εικόνα 50. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της αρχικής ενεργής τάσης.

Η τελική ενεργός τάση  $\bar{\sigma}_{τελ}$  είναι η αρχική συν την τάση λόγω του εξωτερικού φορτίου:

$$\bar{\sigma}_{τελ} = \bar{\sigma}_{αρχ} + \Delta\sigma$$

Επομένως, υπολογίζεται πρώτα η κατακόρυφη τάση λόγω άσκησης εξωτερικού φορτίου κυκλικής επιφάνειας στο μέσο της αργιλικής στρώσης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρώτα υπολογίζεται το πηλίκο  $z/a$  όπου  $z$  είναι το βάθος μέχρι το οποίο υπολογίζουμε το φορτίο και  $a$  η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής  $I_{\sigma}$  χρησιμοποιείται πίνακας ο οποίος για διαφορετικές τιμές  $z/a$  δίνει τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή  $I_{\sigma}$ , όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Εφόσον το πηλίκο  $z/a$  είναι ίσο με 1,33 παίρνουμε τον μέσο όρο των τιμών του συντελεστή  $I_{\sigma}$  για  $z/a$  ίσο με 1,3 και 1,4 οπότε η τελική τιμή του συντελεστή  $I_{\sigma}$  είναι ίση με 0,482.

z/α	I <sub>σ</sub>	z/α	I <sub>σ</sub>	z/α	I <sub>σ</sub>
0	1	1	0.646	2	0.284
0.1	0.999	1.1	0.595	2.1	0.264
0.2	0.992	1.2	0.547	2.2	0.245
0.3	0.97	1.3	0.502	2.3	0.229
0.4	0.949	1.4	0.461	2.4	0.214
0.5	0.911	1.5	0.424	2.5	0.2
0.6	0.864	1.6	0.39	3	0.146
0.7	0.818	1.7	0.36	4	0.087
0.8	0.756	1.8	0.332	5	0.057
0.9	0.701	1.9	0.307	10	0.015

Εικόνα 51. Πίνακας υπολογισμού I<sub>σ</sub>.

Στη συνέχεια μέσω του τύπου  $\sigma z = I\sigma * P$  να υπολογιστεί η κατακόρυφη τάση αφού αφαιρεθεί η τάση της εκσκαφής.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Στρώση 1 (Άμμος ξηρή)	Στρώση 2 (Άμμος κορ.)	Στρώση 3 (Αργιλος)
k (cm/sec): 0.00E+00	k (cm/sec): 0.00E+00	k (cm/sec): 0.00E+00
γs (kN/m³): 18	γs (kN/m³): 18	γs (kN/m³): 22
γsat (kN/m³): 21	γsat (kN/m³): 21	γsat (kN/m³): 22
πάχος (m): 4.5	πάχος (m): 3.5	πάχος (m): 2
εs: 0	εs: 0.83	εs: 0.25
εc: 0	εc: 0.83	εc: 0.25

Calculated values:

- Υπολογισμός σ<sub>zH</sub> (σεργά): 143.50 (kN/m<sup>2</sup>)
- Υπολογισμός σ'<sub>zH</sub> (σεργά): 222.47 (kN/m<sup>2</sup>)
- Δσ: H30)\* (kN/m<sup>2</sup>)
- z/a: 1.33
- I<sub>σ</sub>: 0.482
- Τάση εκσκαφής: 36 (kN/m<sup>2</sup>)

Εικόνα 52. Απόσπασμα φύλλου excel από τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της καθίζησης μέσω του παρακάτω τύπου:

$$\text{Τύπος υπολογισμού της ολική καθίζηση } S_{\infty} (\Delta H) :$$

$$\Delta H = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma_{\text{τελ}}}{\sigma_{\text{αρχ}}}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται απόσπασμα από το φύλλο του excel στο οποίο υπολογίζεται η καθίζηση αρχικά σε μέτρα και στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή σε εκατοστά με τελική τιμή ίση με 10,41 εκατοστά.

SUM     $=((4*B30)/(1+B29))*(LOG(J25/J23))$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L											
23							Υπολογισμός $\sigma_{αρχ}$ (ενεργό)			143.50	(kN/m <sup>2</sup> )												
24	Στρώση 3 (Αργίλος)						Υπολογισμός $\sigma_{τελ}$ (ενεργό)			222.47	(kN/m <sup>2</sup> )												
25	k (cm/sec)	0.00E+00																					
26	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	0																					
27	$\gamma_{ωαρ}$ (kN/m <sup>3</sup> )	22					$\Delta\sigma$	78.97	(kN/m <sup>2</sup> )														
28	πάχος (m)	2					z/a	1.33															
29	$e_o$	0.83					$I_\sigma$	0.482															
30	Cc	0.25					Τάση εκσκαφής	36	(kN/m <sup>2</sup> )														
31	Cv (m <sup>2</sup> /sec)	9.80E-03																					
32																							
33	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10																					
34	<p>Ο διαχωρισμός των στρώσεων γίνεται:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Σύμφωνα με τον υδροφόρο ορίζοντα και</li> <li>-Με το είδος του υλικού</li> </ul> <p>Στη στρώση της αργίλου η καθίζηση υπολογίζεται στο μέσο της στρώσης</p>						<p>Ως προς την τελική ενεργή τάση έχουμε: Το <math>I_\sigma</math> προκύπτει από τον Πίνακα. Το βάθος Z είναι από την στάθμη εφαρμογής του φορτίου μέχρι το μέσο της αργιλικής στρώσης. Αφαιρούμε την τάση λόγω της εκσκαφής.</p>																
35																							
36																							
37																							
38																							
39																							
40																							
41	<p>Τύπος υπολογισμού της ολική καθίζησης <math>S_w</math> (<math>\Delta H</math>):</p> $\Delta H = H_o \frac{C_c}{1 + e_o} + \log \frac{\sigma_{τελ}}{\sigma_{αρχ}}$						<table border="1"> <tr> <td><math>\Delta H</math></td> <td><math>/(1+B29)</math></td> <td>m</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta H</math></td> <td>10.41</td> <td>cm</td> </tr> </table>						$\Delta H$	$/(1+B29)$	m	$\Delta H$	10.41	cm					
$\Delta H$													$/(1+B29)$	m									
$\Delta H$													10.41	cm									
42																							
43																							
44																							
45																							
46																							
47																							
48																							
49																							
50																							
51																							

Εικόνα 53. Απόσπασμα από το φύλλο excel για τον υπολογισμό της καθίζησης.



## Συμπεράσματα

Η καθίζηση του εδάφους είναι μια κρίσιμη πτυχή της γεωτεχνικής μηχανικής με βαθιές επιπτώσεις για την ασφάλεια και τη μακροζωία των κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Η πρόβλεψη και η ανάλυσή του είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της σταθερότητας και της απόδοσης διαφόρων έργων.

Η ανάλυση εδαφικών οικισμών είναι μια πολύπλευρη προσπάθεια λόγω των διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο. Οι ιδιότητες του εδάφους, τα εξωτερικά φορτία και οι δομικές διαμορφώσεις συμβάλλουν στην πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς των οικισμών. Ως εκ τούτου, απαιτούνται περιεκτικές και αξιόπιστες μέθοδοι ανάλυσης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Η μέθοδος Boussinesq, μια κλασική αναλυτική προσέγγιση, έχει χρησιμοποιηθεί για πάνω από έναν αιώνα για την εκτίμηση της καθίζησης του εδάφους σε γεωτεχνικά σενάρια. Αξιοποιεί τις αρχές της ελαστικότητας για τον υπολογισμό των τιμών καθίζησης που προκαλούνται από εξωτερικά φορτία. Αυτή η μέθοδος εξακολουθεί να είναι ένα θεμελιώδες εργαλείο στη γεωτεχνική μηχανική, προσφέροντας πολύτιμες γνώσεις για τα φαινόμενα καθίζησης του εδάφους.

Οι πρωταρχικοί στόχοι αυτής της πτυχιακής ήταν η κατανόηση των θεωρητικών θεμελίων της μεθόδου Boussinesq, η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας της στον πραγματικό κόσμο και η προώθηση της γνώσης στην ανάλυση των οικισμών του εδάφους. Η έρευνα εμβαθύνει στις παραδοχές, τους περιορισμούς και την ακρίβεια της μεθόδου για να παράσχει στους μηχανικούς και στους επαγγελματίες γεωτεχνικούς βελτιωμένα εργαλεία για την πρόβλεψη και τον μετριασμό των προβλημάτων καθίζησης του εδάφους.

Αυτή η έρευνα, μέσω της κριτικής της αξιολόγησης της μεθόδου Boussinesq, θέτει το υπόβαθρο για μελλοντικές εξελίξεις στην ανάλυση των οικισμών του εδάφους. Οι μηχανικοί και οι ερευνητές μπορούν να επωφεληθούν από τα ευρήματα αυτής της μελέτης λαμβάνοντας υπόψη τα δυνατά σημεία και τους περιορισμούς της μεθόδου κατά την αντιμετώπιση πραγματικών γεωτεχνικών σεναρίων.

Τελικά, η παρούσα πτυχιακή συμβάλλει στο ευρύτερο πεδίο της γεωτεχνικής μηχανικής διευρύνοντας την κατανόησή μας για τα φαινόμενα καθίζησης του εδάφους. Με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων excel και τον εντοπισμό περιοχών προς βελτίωση, χρησιμεύει ως πολύτιμος πόρος για μηχανικούς και ερευνητές που προσπαθούν να ενισχύσουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των κατασκευών πολιτικού μηχανικού ενόψει των προκλήσεων των οικισμών του εδάφους.

## **Βιβλιογραφία**

### **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

Elzea, J. M., & Murray, H. H. (1990). Variation in the mineralogical, chemical and physical properties of the Cretaceous Clay Spur bentonite in Wyoming and Montana (USA). *Applied Clay Science*, 5(3), 229-248.

US Geological Survey (2008) Mineral Commodity Summaries 2008. United States Government Printing Office, Washington, DC, 199

Williams LB, Haydel SE, Ferrell RE (2009) Bentonite, band aids, and borborygmi. *Elements* 5: 99-104

Wan, K. W. (2008). Bentonite bound for success. *Industrial Minerals*, (490), 32-39.

Robertson, R. H. S. (1986). Fullers earth: a history of calcium montmorillonite. Volturna Press, Hythe Kent, UK, 421.

Torok A, Thompson TD (1972) Activated bleaching clay for the future. *Transactions SME-AIME* 252: 15-17

Sanders CA (1973) Foundry Sand Practice. 6th ed. American Colloid Company, Skokie, Illinois.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. John Wiley, New York

Burland, J. B., Broms, B. B., and de Mello, V. F. B. (1977). Behaviour of foundations and structures. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mechs. Found. Eng. Tokyo, Vol. 1, 495–549.

Poulos, H.G, Carter, J.P., and Small, J.C. (2001). "Foundations and retaining structures –Research and Practice." General Report, Proc. 15th I.C.S.M.G.E, Istanbul, Vol. 4, 2527–2606

Davis, E. H., and Poulos, H. G. (1972). Rate of settlement under three dimensional conditions. *Géotechnique* 22, No. 1, 95–114.

Foott, R., and Ladd, C. C. (1981). Undrained settlement of plastic and organic clays. *J. Geotech. Eng. Div.* 107, No. 8, 1079–1094.

Christian, J. T., and Carrier, W. D. (1978). Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted. *Can. Geotech. J.* 15, 123–128.

Kondner, R. L. (1963). Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils. *J. Soil Mech. And Found. Div.* 89, Vol. 1, 115–143.

D' Appolonia, D. J., and Lambe, T. W. (1970). Method for predicting initial settlement. *J. Soil Mech. And Found. Div.* 96, No. 2, 523–544.

Simon, R. M., Christian, J. T., and Ladd, C. C. (1974). Analysis of undrained behaviour of loads on clay. *Soils and Foundations: Analysis and design in geotechnical engineering*, Austin, Tex., ASCE, New York, 51–84

Kinner, E. B., and Ladd, C. C. (1973). Undrained bearing capacity of footing on clay. *Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. Moscow*, Springer, New York, 209–215.

Foye, K. C., Basu, P., and Prezzi, M. (2008). Immediate settlement of shallow foundations bearing on clay. *International Journal of Geomechanics* 8, No. 5, 300–310.

Buisman, A. S. (1936). Results of long duration settlement tests. *Proc. 1th ICSMFE*. Cambridge, Mass., Vol. 1, 103–106.

Mesri, G., and Godlewski, P. M. (1977). Time and stress–compressibility interrelationship. *J. Ged. ASCE*, Vol. 103, No. GT5, 417–430

Mesri, G., Lo, D.O.K., and Feng, T.-W. (1994). Settlement of Embankments on soft clays. *Geot. Spec. Pub. 40*, ASCE, Vol. 1, 8–56

Padfield, C. J., and Sharrock, M. J. (1983). Settlements of structures on clay soils. *CIRIA Spec. Pub. 27*, CIRIA, London U. K., 132

Jardine, R. J., Lehane, B. M., Smith, P. R., and Gildea, P. A. (1995). Vertical loading experiments on rigid pad foundations at Bothkenar. *Géotechnique*, London, U. K., 45, No. 4, 575–597.

Berardi, R., Jamiolkowski, M., and Lancellotta, R. (1991). Settlements of shallow foundations in sands: selection of stiffness on the basis of penetration resistance. *Geotech. Eng. Congress 1991*, ASCE, Reston, Va., 1, 185–200.

Moorhouse, D. C. (1972). Shallow foundations. *Proc. Conf. Performance of Earth and Earth – Supported Structures*, Purdue Univ., Lafayette, Ind., 71–109.

Holzlohner, U. (1984). Settlement of shallow foundations on sand. *Jpn. Soc. Soil Mech. Found. Eng.* 24, No. 4, 58–70.

Bowles, J. E. (1987). Elastic foundation settlements on sand deposits. *J. Geotech. Eng.* 113, 846–860.

Papadopoulos, B. P., and Anagnostopoulos, A. G. (1987). Ground water effects on settlement estimation. *Proc. X ECSMFE*, Dublin, Vol. 2, 725–729.

Diaz FV, Souza-Santos P (2001) Studies on the acid activation of Brazilian smectitic clays. *Quimica Nova* 24: 345-353.

Darley HCH, Gray GR (1988) *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, 5th ed. Butterworth-Heinemann, Woburn, Massachusetts, 643

Güven N (2009) *Bentonites – Clays for molecular engineering*. Elements 5

Güven N (1992) Molecular aspects of clay-water interactions. In: Güven N, Pollastro RM (eds) *Clay-Water Interface and its Rheological Implications*. Workshop Lecture Series, volume 4, The Clay Minerals Society, Chantilly, VA, pp 2-79

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Σακελλαρίου, 2003. Εργαστηριακές Δοκιμές Εδαφομηχανικής. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής

Βγενοπούλου Ειρήνη, 2020. Σημειώσεις για το μάθημα Εδαφομηχανική Ι. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.

## **Ιστοσελίδες**

[https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TGH222/Lecture\\_1\\_Ardeuseis\\_2019.pdf](https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TGH222/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf)

<http://charalampakis.com/e-learning/ntua/texnikh-mhxanikh.pdf>