



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της επίδρασης της μεταβολής των υδατικών πιέσεων των
εδαφικών σχηματισμών στα τεχνικά έργα



Σιούτα Λουίζα
Πλαστήρα Βιολέτα

Πειραιάς, Ιούνιος 2010

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Τίτλος: Μελέτη της επίδρασης της μεταβολής των υδατικών πιέσεων των εδαφικών σχηματισμών στα τεχνικά έργα

Συγγραφέας : Σιούτα Λουίζα

Επιμέλεια Έκδοσης : Σιούτα Α.

Επίβλεψη : Πλαστήρα Β.

Φωτογραφία Εξώφυλλου : Cementation Ground Engineering Ltd.
United Kingdom.

Τα δικαιώματα της παρούσας εργασίας ανήκουν στον συγγραφέα. Το βιβλίο εκδόθηκε με δαπάνη του συγγραφέα. Απαγορεύεται η καθιονδήποτε τρόπο ανατύπωση, καταχώρηση σε σύστημα αποθήκευσης και επανάκτησης ή μετάδοσης μέρους ή του συνόλου του βιβλίου χωρίς την έγγραφη άδεια των συγγραφέα.

© 2010 – All rights reserved

Πρόλογος

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η επίδραση της μεταβολής των υδατικών πιέσεων των εδαφικών σχηματισμών στα τεχνικά έργα. Η παρουσία του νερού στους εδαφικούς σχηματισμούς επηρεάζει την αντοχή και γενικότερα τη συμπεριφορά τους απέναντι στα τεχνικά έργα, με τα οποία συσχετίζονται. Ιδιαίτερο ρόλο ασκεί η πίεση του νερού των πόρων, η οποία όταν μεταβάλλεται, κυρίως αυξανόμενη, μπορεί να δημιουργήσει μεγάλο πρόβλημα στην ευστάθεια των γεωτεχνικών κατασκευών. Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβολή της πίεσης των πόρων αποτελεί παραδείγματος χάρη ένα σεισμικό φαινόμενο ή επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου στο έδαφος από μια κτιριακή κατασκευή. Φαινόμενα που εμφανίζονται ως συνέπεια της μεταβολής της κατάστασης του εδάφους αποτελούν το φαινόμενο της ρευστοποίησης και το φαινόμενο της στερεοποίησης.

Στόχος, λοιπόν της μελέτης είναι η εξέταση των αιτιών των μεταβολών αυτών όπως επίσης και το φαινομένων που εμφανίζονται και ότι αυτό συνεπάγεται.

Η εργασία αναπτύσσεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο και δεύτερο κεφάλαιο εισάγονται οι βασικές έννοιες, όπως η διατμητική αντοχή, η ενεργός τάση και οι εδαφικές και μηχανικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της στερεοποίησης, που προκαλείτε από την ύπαρξη νερού στο υπέδαφος. Ενώ το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει δευτερογενές φαινόμενο που δημιουργείτε από την ύπαρξη σεισμικής δραστηριότητας, συγκεκριμένα το φαινόμενο της ρευστοποίησης του εδάφους

Το τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουν την ίδια δομή η οποία είναι:

- Ορισμός του φαινομένου
- Συνέπειες από την ύπαρξη του φαινομένου
- Τρόποι Αντιμετώπισης
- Παραδείγματα εμφάνισης του φαινομένου

Η εργασία είναι βιβλιογραφική και δεν πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες. Παρουσιάζονται αποτελέσματα άλλων μελετών τα στοιχεία των οποίων παρατίθενται με υποσημειώσεις.

Θερμές Ευχαριστίες
στην κ. Β Πλαστήρα
Βιολέτα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Εισαγωγή	9
1.1 Το πορώδες (Porosity)	10
1.2 Υδροπερατοί σχηματισμοί	12
1.3 Αδιαπέρατοι σχηματισμοί	13
1.4 Το υπόγειο νερό	14
1.5 Ακόρεστη ζώνη	17
1.6 Είδη υπόγειου νερού-Υπόγειοι υδροφορείς	18
1.7 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων	21
1.8 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Εισαγωγή	28
2.1 Διατμητική Αντοχή Εδάφους	28
2.2 Ενεργός Τάση	34
2.3 Αστοχία Εδαφικών Υλικών	35
2.3.1 Κοκκώδη εδάφη	35
2.3.2 Συνεκτικά εδάφη	38
2.4 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής Εδάφους	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Εισαγωγή	41
3.1 Τύποι καθιζήσεων	43
3.1.1 Άμεση καθίζηση	46
3.1.2 Καθίζηση λόγω Στερεοποίησης	47
3.1.3 Δευτερογενής Καθίζηση	51
3.2 Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους	55

3.2.1	Βελτίωση του Εδάφους με προφόρτιση	59
3.2.2	Βελτίωση του Εδάφους με βαθιά ανάμειξη	61
3.2.3	Κατακόρυφα Γεωσύνθετα Στραγγιστήρια	64
3.3	Αναφορές καθιζήσεων σε Ελλάδα	72
3.3.1	Καλοχώρι Θεσσαλονίκης	73
3.3.2	Μοσχάτο – Καλλιθέα Αθηνών	75
3.3.3	Κατολισθηση επιχώματος οδοποιίας στον Νομό Καρδίτσας	76
3.3.4	Περιπτώσεις διάβρωσης του εδάφους, στο Νομό Καρδίτσας	78
3.4	Αναφορές καθιζήσεων στο εξωτερικό	81
3.4.1	Τόκιο και Niieata Ιαπωνίας	81
3.4.2	Μιλάνο	85
3.4.3	Σουηδία	86
3.4.4	Κόμο	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

	Εισαγωγή	88
4.1	Ρευστοποιήσιμα Εδάφη	91
4.2	Συνέπειες Ρευστοποίησης σε Τεχνικά Έργα	93
4.2.1	Αστοχία Θεμελιώσεων	94
4.2.2	Ανάδυση Υπόγειων Κατασκευών	95
4.2.3	Αστοχία Φυσικών ή Τεχνητών Πρανών	96
4.2.4	Πλευρική Οριζόντια Εξάπλωση	97
4.2.5	Αστοχία Λιμενικών Κρηπιδότοιχων	98
4.3	Μέθοδοι μείωσης του φορτίου	101
4.4	Μέθοδοι Βελτίωσης του Εδάφους	102
4.5	Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους	103
4.6	Αναφορές του φαινομένου της ρευστοποίησης στην Ελλάδα	107
	Αποτελέσματα Μελέτης	110
	Βιβλιογραφία	112

Εισαγωγή

Η ποσότητα νερού που κατακρατείται στο έδαφος αποτελεί τα «υπόγεια νερά». Το επίπεδο στο οποίο συναντώνται τα υπόγεια νερά ονομάζεται «υδροφόρος ορίζοντας». Το επίπεδο των υπογείων νερών κυμαίνεται ανάλογα με την εποχή. Υδροστατική πίεση ασκείται στην περίπτωση που υδροφόρος ορίζοντας είναι ψηλότερα από την κατώτερη στάθμη των δομικών στοιχείων.

Η παρουσία του νερού στο έδαφος μόνιμη ή περιστασιακή είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Το νερό εμφανίζεται :

- με τη μορφή στατικής εδαφικής υγρασίας
- με τη ροή (που ασκεί υδραστατική πίεση στα δομικά στοιχεία που παρεμβάλλονται σε αυτή τη ροή)

Σχετικά υψηλές πιέσεις του νερού των πόρων είναι χαρακτηριστικό στα τμήματα εκφόρτισης των υπόγειων συστημάτων ροής. Μείωση ή αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων επιδρά στη διαλυτότητα των αερίων, στο βαθμό κορεσμού των αερίων και στην αντοχή και ακεραιότητα του γεωλογικού σχηματισμού. Η αλλαγή της πίεσης του νερού των πόρων στα βαρυτικά συστήματα ροής είναι μια δυναμική διεργασία. Σύμφωνα με τον Terzaghi (1950) αυτές οι αλλαγές οδηγούν στην αύξηση των ενεργών τάσεων στις περιοχές εμπλουτισμού, ενώ μειώνονται στις περιοχές εκφόρτισης. Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη τρωτότητα της επιφάνειας του εδάφους στη διάβρωση, κατολισθήσεις και άλλες μορφές εδαφικής κίνησης σε περιοχές εκφόρτισης.

1.1 Το πορώδες (Porosity)

Το πορώδες (n) είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_k) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος /εδάφους ($V_{ολ}$):

$$n = V_k/V_{ολ}$$

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ψιλόλιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ψύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Πίνακας 1 . Τιμές ολικού πορώδους ¹ , παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους από 0-60%.

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity)

Ως ενεργό πορώδες αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια).

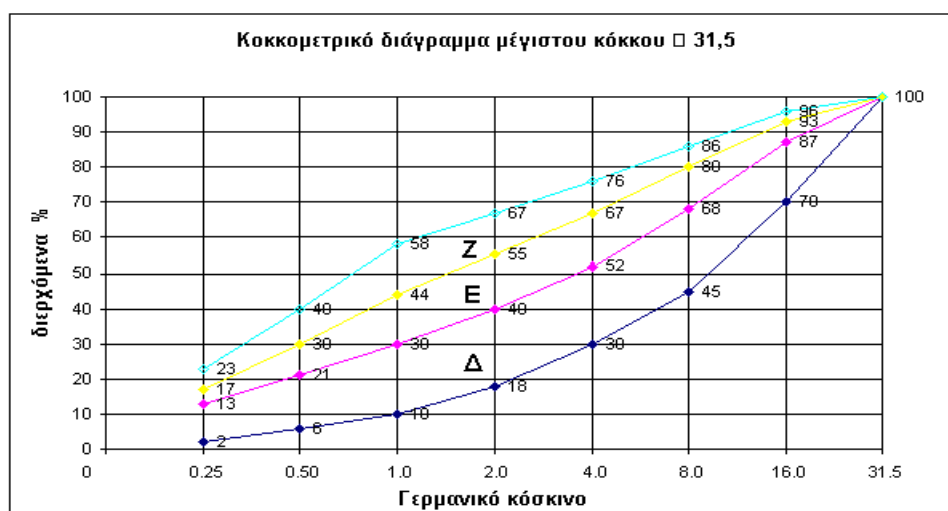
¹ Καλλέργη, 1999

Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν :

Πρωτογενές: το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων.

Δευτερογενές: το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά.

Μετά από κοσκίνισμα με κόσκινα καθορισμένης σειράς ανοίγματος διακένων κατασκευάζονται οι αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες των χαλαρών γεωλογικών υλικών. Από τις καμπύλες αυτές υπολογίζονται χρήσιμα μεγέθη όπως: το ενεργό μέγεθος κόκκων, ο συντελεστής ομοιομορφίας, ο συντελεστής διαβάθμισης κ.ά.



Εικόνα 1. Κοκκομετρικό διάγραμμα αδρανών μέγιστου κόκκου " 31.5²

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί³ ταξινομούνται ανάλογα με τη δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους με την επίδραση της βαρύτητας σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους υδροπερατούς και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς.

² <http://www.teicrete.gr/chemistry/matlab/ask2.htm>

³ http://www.geo.auth.gr/887/PDF/XYTA_1.pdf

1.2 Υδροπερατοί σχηματισμοί

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας των και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Μικροδιαπερατά

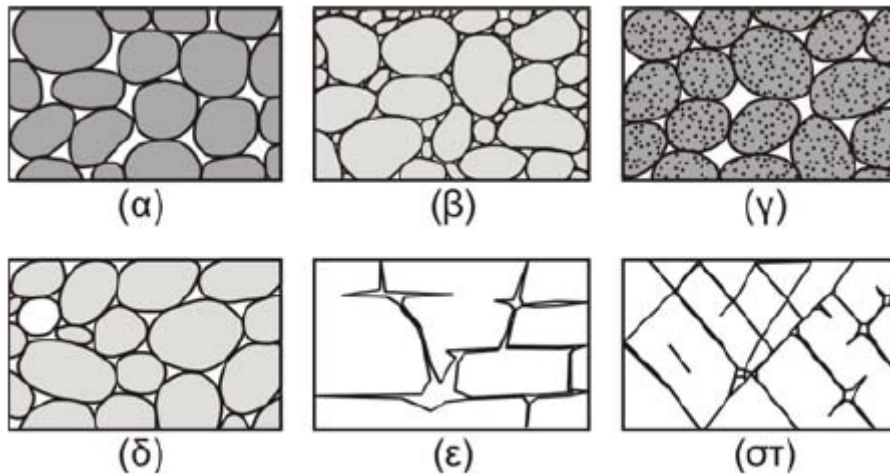
Πρόκειται για χαλαρά υλικά (άμμοι, χάλικες, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

Μακροδιαπερατά

Πρόκειται για πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες. Είναι σύνηθες οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί να είναι μικρο- και μακροδιαπερατοί.

1.3 Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δεν επιτρέπουν την κίνηση των νερών διαμέσου της μάζας των, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης.



Εικόνα. 2 Παραδείγματα διάκενων:

α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες,

β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες,

γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες,

δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο

πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση,

στ) πορώδες από ρηγμάτωση

1.4 Το υπόγειο νερό

Το υπόγειο νερό είναι αυτό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως κατάστασης, βάθους και προέλευσης. Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και αντιστοιχούν σε 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη. Η κυριότερη προέλευσή τους είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο (νεαρό νερό, juvenile). Το συγγενετικό (connate) είναι νερό που δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μαγματικό και το μεταμορφωμένο νερό συνδέονται με την άνοδο του

μάγματος και τις διαδικασίες της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων, αντίστοιχα. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά κινείται αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με τη διαπνοή των φυτών.

Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Η παρουσία του υπόγειου νερού στο υπέδαφος μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες:

Ζώνη αερισμού (*Zone of aeration*)

Η ζώνη αυτή αποτελείται από διάκενα, που κατέχονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα (διφασική ροή). Υποδιαιρείται σε : (βλ. εικόνα 3)

- Υποζώνη εδαφικού νερού μικρού πάχους, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση, όπου η υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες.
- Ενδιάμεση ζώνη όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδείς δυνάμεις και από την οποία το νερό πρέπει να περάσει κινούμενο προς τη ζώνη κορεσμού.
- Τριχοειδή υποζώνη με ύψος που μεταβάλλεται, αντιστρόφως ανάλογα, με το μέγεθος των διακένων (20-πλάσια στη λεπτόκοκκη άμμο από τους χάλικες). Η τριχοειδής ανύψωση (h_c) δίνεται από τη σχέση

$$H_c = (2\tau/\epsilon R)\sigma\eta\phi^4$$

όπου:

τ = η επιφανειακή τάση,

ϵ = το ειδικό βάρος του νερού,

R = η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα και

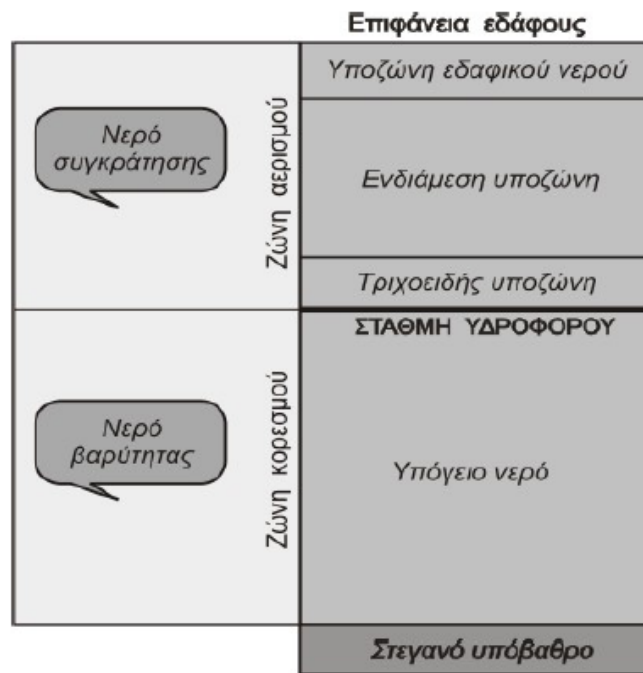
ϕ = η γωνία συνεπαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και το μηνίσκο.

⁴ Στα αργιλώδη εδάφη το αναπτυσσόμενο δυναμικό από τριχοειδή φαινόμενα είναι μεγάλο, σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη στα οποία είναι ασήμαντο.

Για καθαρό νερό στους 20 οC, το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης είναι $h_c=0,153/R$.

Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)

Όλα τα διάκενα της ζώνης αυτής είναι γεμάτα νερό κάτω από υδροστατική πίεση (μονοφασική ροή). Αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα και η επάνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι η ελεύθερη (φρεάτια) επιφάνεια. Η ζώνη αυτή μπορεί να μας τροφοδοτήσει με νερό και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία. Το επιφανειακό νερό με την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης, των τριχοειδών δυνάμεων κ.λπ. διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διακένων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Η κατείσδυση δηλ. αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού στη ζώνη αερισμού και η διήθηση στην κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη.



Εικόνα 3. Ζώνες του υπόγειου νερού.

1.5 Ακόρεστη ζώνη

Η **ακόρεστη ζώνη** ή μερικά κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Με εξαίρεση τμημάτων των τριχοειδών κροσσών, οι πόροι περιέχουν νερό και αέρα. Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ), που ορίζεται ως:

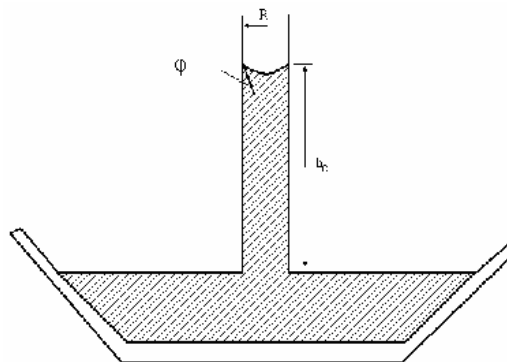
$$\theta = V_w/V_T$$

όπου:

V_w = είναι ο όγκος του νερού και

V_T = είναι ο όγκος του μέσου.

Αν οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι, ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες (n). Συνεπώς στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ $0 \leq \theta \leq n$



Εικόνα 4. Τριχοειδής ανύψωση⁵. Η ροή στην ακόρεστη ζώνη έχει ως κύρια συνιστώσα την κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση). Ο ρόλος της ακόρεστης ζώνης στην εξασθένηση της ρύπανσης και στην τρωτότητα των υπόγειων νερών είναι σημαντικός.

⁵ Fetter, 1994

1.6 Είδη υπόγειου νερού-Υπόγειοι υδροφορείς

Γενικά το υπόγειο νερό που προέρχεται από την κατείδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται σε:

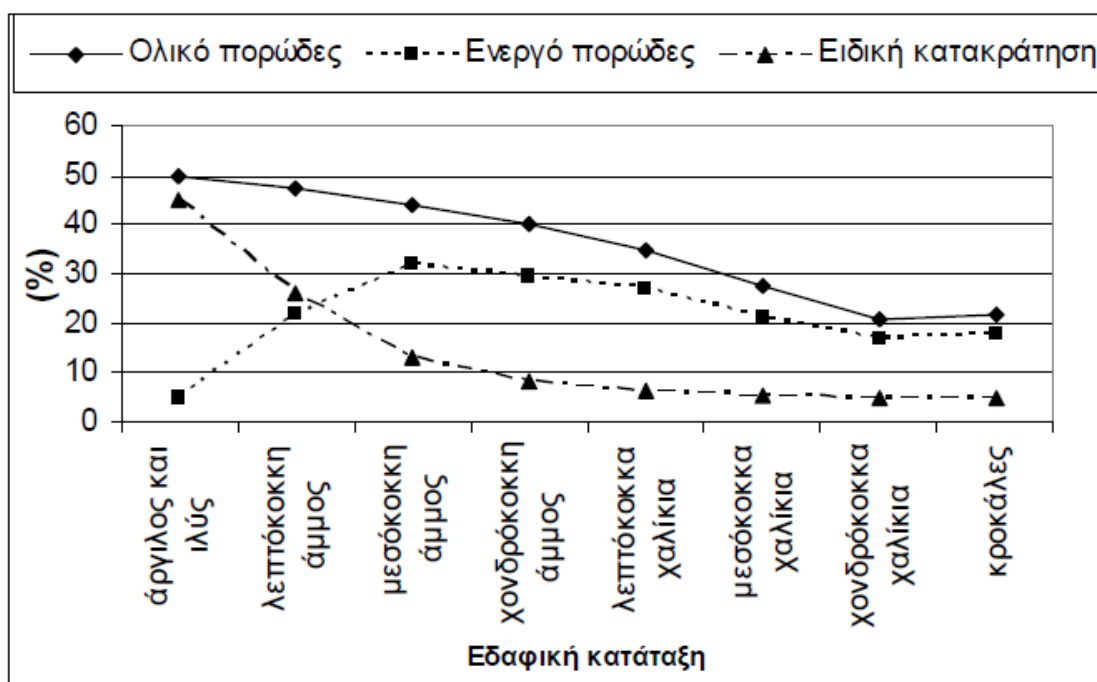
- **Βαρυτικό νερό:** Είναι το νερό που υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Το νερό αυτό μπορεί να ληφθεί άμεσα ή έμμεσα.⁶

- **Νερό κατακράτησης:** Είναι το νερό που δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συνεπώς δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.⁷

Υδροφορείς ή υδροφόροι (aquifers) είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν αρκετό κορεσμένο με νερό υλικό, ώστε να τροφοδοτήσουν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις ή πηγές. Οι υδροφορείς έχουν αυξημένη ικανότητα να αποθηκεύουν και να μεταβιβάζουν νερό. Το υδροφόρο στρώμα αποτελείται από το γεωλογικό σχηματισμό (σκελετό) και το υπεδαφικό νερό, που βρίσκεται σε βαρυτική μορφή και ως νερό συγκράτησης. Ως υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια του υδροφόρου, αν και οι έννοιες υδροφορέας, υδροφόρος, υδροφόρο στρώμα, υδροφόρος ορίζοντας χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν το ίδιο πράγμα.

⁶ **Ειδική απόδοση** S_y (specific yield) ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του βαρυτικού νερού (V_w) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V): $S_y = V_w/V$ Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το **ενεργό πορώδες**.

⁷ **Ειδική κατακράτηση** S_r (specific retention) ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του νερού κατακράτησης (V_r) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V): $S_r = V_r/V$. Στην Εικόνα 4 φαίνεται η μεταβολή του ολικού και ενεργού πορώδους, καθώς και της ειδικής κατακράτησης ανάλογα με την εδαφική κατάσταση των γεωλογικών σχηματισμών



Εικόνα 5. Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με την εδαφική κατάσταση.

Οι κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων είναι:

Ελεύθεροι υδροφορείς

Είναι οι υδροφόροι που έχουν ως δάπεδο στεγανό στρώμα και στην οροφή τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην **ελεύθερη επιφάνεια** (φρεάτια) των υπόγειων νερών η υδροστατική πίεση να είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Οι εταβολές της στάθμης του νερού αντιστοιχούν σε μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφόρο. Ειδική περίπτωση λεύθερων υδροφόρων είναι οι κρεμαστοί ή επικρεμάμενοι υδροφόροι (perched) .

Υπό πίεση υδροφόροι ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί

Στα υδροφόρα αυτά στρώματα το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για τον λόγο αυτό **η πιεζομετρική επιφάνεια**, η οποία είναι μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφόρο, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός).

Ημιαρτεσιανοί (υπό μερική πίεση) υδροφορείς

Πρόκειται για υπόγειους υδροφορείς ανάλογους με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλ. μικρή υδροπερατότητα.

Από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες υδροφορέων:

- 1) **καρστικοί** (karst aquifers), που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και
- 2) **πορώδεις** (porous aquifers), που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς (τεταρτογενείς και αδρομερείς νεογενείς αποθέσεις).

1.7 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων

Τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων είναι:

Το υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head) Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία ανά μονάδα όγκου ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής. Πρακτικά η ενέργεια αυτή (H) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) είναι ίση με το άθροισμα του **φορτίου πίεσης** P/γ (pressure head) και του **φορτίου ύψους** (ή υψομετρικό ή θέσης) της απόστασης δηλ. από το επίπεδο αναφοράς z (elevation head):

$$H=(P/\gamma)+z$$

Όπου:

P = η υδροστατική πίεση

γ = το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Το φορτίο **H** αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς.

Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου (ισοδυναμικές γραμμές) μπορεί να απεικονισθούν με τη βοήθεια χαρτών. Οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές γραμμές.

Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται **υδραυλική κλίση** και δίνεται από τη σχέση:

$$i = dH/dl$$

Το υδραυλικό φορτίο H σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό: $\Phi = Hg$

Με άλλα λόγια το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το H η ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αλλά μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω απωλειών (τριβές).

Διαπερατότητα-Υδροπερατότητα (Permeability-Hydraulic conductivity)

Η **διαπερατότητα** είναι μια σταθερά, που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) με διαστάσεις L^2 .

Η **υδροπερατότητα** ή **υδραυλική αγωγιμότητα** (k) χρησιμοποιείται στην Υδρογεωλογία γιατί το ρευστό είναι το νερό. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλ. του υγρού στη ροή

Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας LT⁻¹ και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy. Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως

- Πολύ υδροπερατοί όταν $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί όταν $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Ίλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Αργίλος	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας. Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας⁸.

Η διαπερατότητα (K_s) συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα (k) με τη σχέση:

$$K_s = k\mu/\gamma$$

όπου :

μ = το δυναμικό ιξώδες

γ = το ειδικό βάρος του ρευστού⁹

⁸ Καλλέργης, 1999

⁹ (N/m³)

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, με εργαστηριακές μεθόδους και με ιχνηθετήσεις. Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, είναι μικρότερη από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο.

Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου (k_{unsat}) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή (k) δίνεται από τη σχέση:

$$k_{unsat} = k [(S_s - S_o) / (1 - S_o)]^3$$

Όπου:

S_s = ο βαθμός κορεσμού

S_o = ο υπολειμματικός κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις

Μεταβιβαστικότητα (Transmissivity)

Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D): $T = kD$. Η μεταβιβαστικότητα εκφράζει τον όγκο νερού που περνά από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Ο **συντελεστής εναποθήκευσης** ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου

στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Έτσι η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση: $S = \Delta V / (A \cdot \Delta h)$ Όπου ΔV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται (ή προστίθεται) από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh . Από τον ανωτέρω ορισμό προκύπτει ότι ο **ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης** ($\Delta h / \Delta t$) σε έναν υδροφορέα επιφάνειας A και συντελεστή αποθηκευτικότητας S , για άντληση με παροχή Q , χωρίς να συμβαίνει εμπλουτισμός, δίνεται από τη σχέση:

$\Delta h / \Delta t = Q / (S \cdot A)$ Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα ανωτέρω είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχομένου σ' αυτόν υπόγειου νερού. Πρακτικά σημαίνει ότι για να πάρουμε αξιόλογες ποσότητες από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση υδροφορέα

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει:

$$S = \gamma D (\alpha + \beta S_y)$$

όπου :

γ = το ειδικό βάρος του νερού,

D = το πάχος του υδροφορέα,

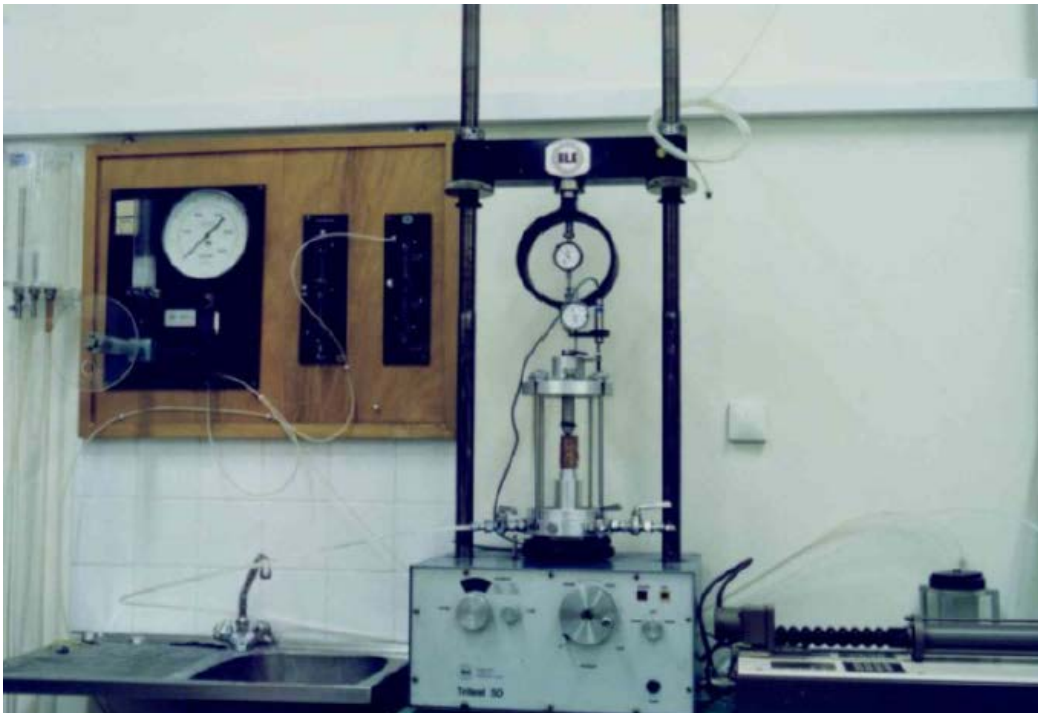
S_y = το ενεργό πορώδες,

A = ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα

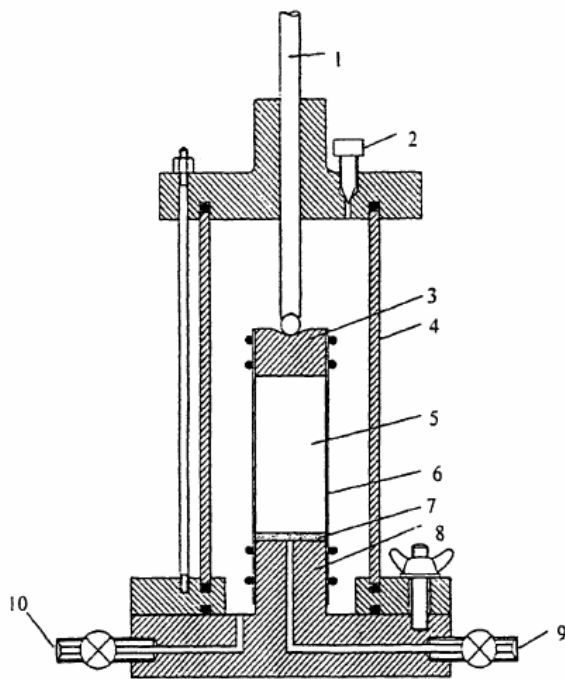
B = ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού.

1.8 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης είναι ουσιαστικά μία εξέλιξη της μονοαξονικής δοκιμής, όπου είναι δυνατός ο έλεγχος της παράπλευρης τάσης - πίεσης ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$). Είναι έτσι δυνατή η διενέργεια πολλών δοκιμών με διαφορετικά σετ (σ_1, σ_3) που οδηγούν στην αστοχία, σχεδιασμός των αντίστοιχων κύκλων Mohr, της περιβάλλουσας αστοχίας και τέλος της εκτίμησης των παραμέτρων ϕ, c . Επιπλέον είναι δυνατός ο έλεγχος της πίεσης - υπερπίεσης πόρων και των συνθηκών στράγγισης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη τριαξονικής δοκιμής.



Εικόνα 6. Διάταξη τριαξονικής δοκιμής, κυψέλη + συστήματα πίεσης.



Εικόνα 7. Διάταξη τριαξονικής δοκιμής – κυψέλη, σχεδιάγραμμα (α) (Craig, Soil Mechanics), φωτογραφία (β) Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής.Τ

Τα μέρη της παραπάνω διάταξης: Κυψέλη (4), ένας αεροστεγής κύλινδρος όπου τοποθετείται το δείγμα (5). Η κυψέλη είναι γεμάτη νερό το οποίο ελέγχει την παράπλευρη πίεση. Το δείγμα υποβάλλεται σε θλίψη μέσω του εμβόλου (1). Στο έμβολο (1) συνδέεται μετρητής φορτίου. Το δείγμα τοποθετείται σε αδιαπέρατη μεμβράνη (6) ώστε να εξασφαλιστεί η στεγανότητα του δείγματος. Το δείγμα υποβάλλεται σε θλίψη μέσω των μεταλλικών πλακών (3, 8) οι οποίες έχουν οπές που επιτρέπουν την στράγγιση, την επιβολή υπερπίεσης πόρων ή την μέτρηση της πίεσης πόρων. Μεταξύ των πλακών και του δείγματος τοποθετείται διαπερατός πωρόλιθος (7). Η βαλβίδα (9) επικοινωνεί με το σύστημα επιβολής υπερπίεσης πόρων και με τον μετρητή πίεσης πόρων. Τοποθετούνται τα κατάλληλα o-rings (φλάντζες - λάστιχα) που εξασφαλίζουν την στεγανοποίηση της κυψέλης, του δείγματος κλπ.

Εισαγωγή

Το παρών κεφάλαιο αναλύει τις βασικές παραμέτρους και έννοιες που ορίζουν την ισορροπία του εδάφους. Αναλύει λοιπόν την αντοχή του και τις επιτρεπόμενες φορτίσεις που μπορεί αυτό να δέχεται, όπως επίσης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πιθανή αστοχία του εδάφους. Τέλος αναλύονται μέθοδοι αύξησης αντοχής του εδάφους .

2.1 Διατμητική Αντοχή Εδάφους¹⁰

Σε όλα τα προβλήματα ευστάθειας των εδαφών, όπως ο σχεδιασμός των θεμελιώσεων, τοίχων αντιστήριξης και αναχωμάτων, είναι απαραίτητη η γνώση της αντοχής των εδαφών που σχετίζονται με αυτά. Ο προσδιορισμός της αντοχής αποτελείται ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα Εδαφομηχανικής και ιδιαίτερα αν το έδαφος είναι συνεκτικό. Γενικά, αντοχή σε διάτμηση ονομάζεται η διατμητική τάση, η οποία μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση δύο εσωτερικών επιφανειών του εδάφους. Η (διατμητική) αντοχή του εδάφους αναφέρεται ¹¹στην ικανότητα του εδάφους να φέρει φορτία χωρίς να αστοχεί. Η αστοχία του εδάφους είναι συνήθως διατμητική, παρουσιάζοντας επίπεδο ολίσθησης.

¹⁰ Διατμητική Αντοχή των Εδαφών

¹¹ Καμάρης Α. Προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και φέρουσας ικανότητας των εδαφών μέσω απλών εμπειρικών συσχετίσεων.

Το μοντέλο διατμητικής αντοχής που χρησιμοποιείται ευρέως είναι των Mohr - Coulomb με την χρήση δύο παραμέτρων: ϕ (γωνία τριβής) και c (συνοχή) και εκφράζεται ως:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

όπου :

Φ : είναι η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

τ : είναι η διατμητική δύναμη

c : συνοχή (kPa)

σ :Ορθή τάση (kPa)

Ο προσδιορισμός της αντοχής γίνεται εργαστηριακά, οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι δοκιμή διάτμησης είναι:

- Η απευθείας (ή άμεση) διάτμηση
- Η κυλινδρική (ή τριαξονική) θλίψη, και
- Η διάτμηση από στρέψη
- Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Στη δοκιμή¹² της απευθείας διάτμησης, το έδαφος υπόκειται σε θραύση, με κίνηση, του ενός τμήματος του υποδοχέα του εδάφους, ως προς το άλλο.

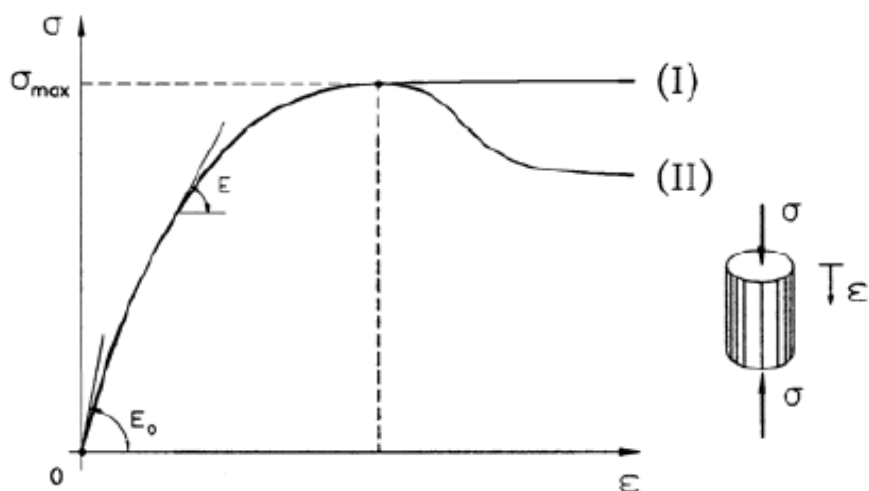
Στη δοκιμή της διάτμησης με στρέψη, μια κυλινδρική στήλη εδάφους υπόκειται σε περιστροφική κίνηση η οποία μέσω ενός δίσκου, στην κορυφή ή στον πυθμένα.

Στην κυλινδρική ή τριαξονική θλίψη, φορτίζεται αξονικά ένα κυλινδρικό δοχείο μέχρι τη θραύση του. Το δοκίμιο καλύπτεται με μια ελαστική μεμβράνη και γύρο από αυτό εφαρμόζεται μια ομοιόμορφη πίεση με τη

¹² Καμάρης Α. Προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και φέρουσας ικανότητας των εδαφών μέσω απλών εμπειρικών συσχετίσεων.

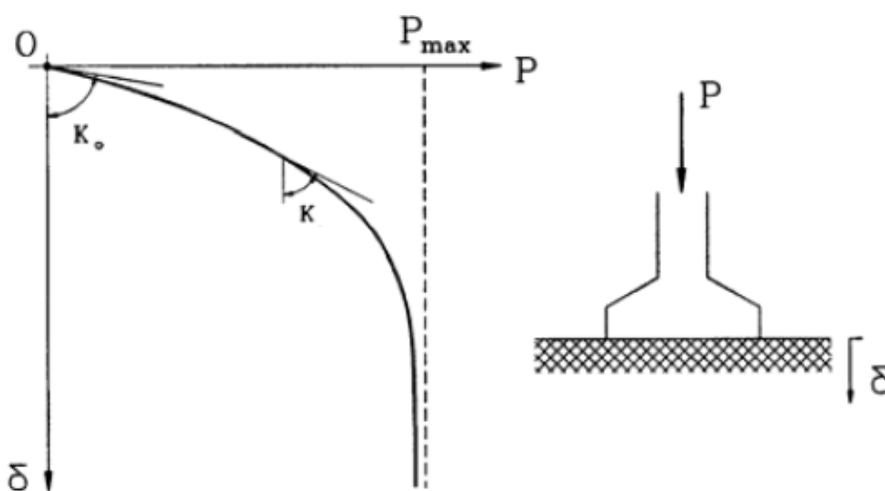
βοήθεια ενός ρευστού. Η δοκιμή που προτιμάται για καλύτερα εργαστηριακά αποτελέσματα, είναι αυτή της απευθείας (ή άμεσης) διάτμησης.

Όταν σε ένα εδαφικό υλικό (όπως και σε οποιοδήποτε άλλο υλικό) επιβληθούν εξωτερικά φορτία, αναπτύσσονται εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις.



Εικόνα 8. Η εικόνα παρουσιάζει τη μορφή μιας τυπικής καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων που προκύπτει κατά τη μοναξονική θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου αργίλου. Η καμπύλη είναι όμοια με αντίστοιχες καμπύλες άλλων υλικών όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας, τα πλαστικά υλικά κλπ. Το αρχικό τμήμα της είναι πρακτικά ευθύγραμμο με μέτρο ελαστικότητας E_0 , ενώ στη συνέχεια η θλιπτική τάση αυξάνει με βαθμιαία **μειούμενο** ρυθμό, οπότε το μέτρο ελαστικότητας E μικραίνει. Με περαιτέρω αύξηση της παραμόρφωσης, το υλικό φθάνει σε μία κατάσταση στην οποία η παραμόρφωση δεν συνοδεύεται πλέον από αντίστοιχη αύξηση της τάσης, αλλά είτε η τάση παραμένει σταθερή (I) είτε βαθμιαία μειώνεται (II). Η κατάσταση αυτή ονομάζεται **κατάσταση αστοχίας** και αντιστοιχεί στη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να αναληφθεί από το υλικό. Η κατάσταση αστοχίας του εδάφους έχει καταστροφικές συνέπειες στα έργα Πολιτικού Μηχανικού, επειδή συνοδεύεται από σημαντικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν τις ανοχές των συνήθων κατασκευών.

Στο πρώτο παράδειγμα (εικόνα 8) η αστοχία αφορά ένα εδαφικό στοιχείο στο οποίο επιβάλλεται μία ορισμένη εντατική κατάσταση¹³ ή, ακριβέστερα, η αστοχία αφορά όλα τα εδαφικά στοιχεία του δοκιμίου επειδή έχουν την ίδια εντατική κατάσταση. Στο δεύτερο παράδειγμα που ακολουθεί (εικόνα 9.) η φόρτιση του θεμελίου προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων στο έδαφος κάτω από το θεμέλιο, αλλά η ένταση των αναπτυσσόμενων τάσεων ποικίλει από θέση σε θέση.



Εικόνα 9. Η εικόνα παρουσιάζει την καμπύλη φορτίου-υποχώρησης ενός θεμελίου με αξονική φόρτιση το οποίο εδράζεται σε αμμώδες εδαφικό υλικό. Η μορφή της καμπύλης είναι όμοια με την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων της εικόνας 1. Με την αύξηση του φορτίου η υποχώρηση αυξάνει με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό, δηλαδή η κλίση K της καμπύλης μειώνεται. Όταν τελικά το φορτίο φθάσει την τιμή P_{max} , το έδαφος θεμελίωσης **αστοχεί**, δηλαδή η υποχώρηση αυξάνει ανεξέλεγκτα και το θεμέλιο "βυθίζεται" στο έδαφος.

¹³ $\sigma'_{zz} = \sigma'_{max}$, $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{xy} = \sigma'_{yz} = \sigma'_{xz} = 0$

Στην δεύτερη περίπτωση ¹⁴ η αστοχία του εδάφους συνδέεται με την αστοχία πολλών εδαφικών στοιχείων σε μια εκτεταμένη περιοχή κάτω από το θεμέλιο. Τα στοιχεία αυτά έχουν διαφορετικές εντατικές καταστάσεις, οι οποίες όμως είναι όλες καταστάσεις αστοχίας, δηλαδή κάθε εδαφικό στοιχείο στη ζώνη αστοχίας δεν μπορεί να αναλάβει μεγαλύτερες τάσεις αλλά παραμορφώνεται απεριόριστα με το συγκεκριμένο συνδυασμό τάσεων της κατάστασης στην οποία ευρίσκεται.

Εντατικές Καταστάσεις Αστοχίας. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι για κάθε (εδαφικό) υλικό υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν σε απεριόριστες παραμορφώσεις. Οι συνδυασμοί αυτοί ονομάζονται *εντατικές καταστάσεις αστοχίας*.

Περιβάλλουσα Αστοχίας. Το σύνολο των εντατικών καταστάσεων αστοχίας (δηλαδή το σύνολο των σημείων στον εξαδιάστατο χώρο των τάσεων) σχηματίζει μία "επιφάνεια" που ονομάζεται *περιβάλλουσα των καταστάσεων αστοχίας* ή, απλά, *περιβάλλουσα αστοχίας*.

¹⁴ Διατμητική Αντοχή και Μηχανική Συμπεριφορά Άμμων Ενισχυμένων με Γεωφάσματα

Ο προσδιορισμός του συνόλου των εντατικών καταστάσεων αστοχίας ενός εδαφικού υλικού είναι πολύ σημαντικός για την ασφάλεια των έργων, επειδή η σύγκριση των εντατικών καταστάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων με τις αντίστοιχες καταστάσεις αστοχίας δίνει το βαθμό ασφαλείας του έργου, δηλαδή τα περιθώρια ασφαλείας του έργου σε σχέση με την κατάσταση αστοχίας. Θα πρέπει να τονισθεί ότι υπάρχουν συνδυασμοί τάσεων που δεν οδηγούν σε αστοχία, όσο και αν αυξηθούν οι τάσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η *ισότροπη συμπίεση*, δηλαδή η κατάσταση κατά την οποία:

$$\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{zz} = p, \sigma'_{xy} = \sigma'_{zx} = \sigma'_{yz} = 0$$

Στην περίπτωση αυτή, όσο και αν αυξηθεί η ισότροπη πίεση p , το υλικό δεν αστοχεί (δηλαδή δεν παραμορφώνεται απεριόριστα). Μία άλλη εντατική κατάσταση που δεν οδηγεί σε αστοχία είναι η μονοδιάστατη συμπίεση, που μελετήθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Στην περίπτωση αυτή με την αύξηση του φορτίου το υλικό "σκληραίνει" (η παραμορφωσιμότητά του μειώνεται) και δεν αστοχεί. Αντίθετα, η μοναξονική θλίψη αλλά και άπειροι άλλοι συνδυασμοί τάσεων οδηγούν σε αστοχία, όταν οι τάσεις αυξηθούν "επαρκώς".

2.2 Ενεργός Τάση

Η παρακάτω σχέση δηλώνει ότι η ολική μακροσκοπική ορθή τάση ισούται με το άθροισμα της πίεσης του νερού των πόρων (u) και ενός άλλου όρου (σ'), ο οποίος καλείται **ενεργός τάση**¹⁵ και εκφράζει την ορθή δύναμη που μεταφέρεται μεταξύ των επαφών των κόκκων ($\sigma_s \Delta S_s$), ανηγμένη στη συνολική επιφάνεια του εδάφους (ΔS).

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

Η επόμενη σχέση δείχνει ότι η μακροσκοπική διατμητική τάση ισούται με τη διατμητική τάση που μεταφέρεται μεταξύ των επαφών των κόκκων, δηλαδή ότι η ολική διατμητική τάση ισούται με την ενεργό (επειδή το νερό των πόρων δεν μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις).

$$\tau = \tau'$$

Η ενεργός τάση (σ'), έχει κάποιο φυσικό νόημα (είναι η ορθή δύναμη που μεταφέρεται μεταξύ των επαφών των κόκκων, ανηγμένη στη συνολική επιφάνεια του εδάφους), κυρίως όμως, είναι ένα παράγωγο μέγεθος που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ δύο εύκολα μετρήσιμων μεγεθών: της ολικής τάσης (σ) και της πίεσης των πόρων (u).

$$\tau = C + (\sigma - u)\epsilon\phi$$

Η σχέση αποτελεί την τροποποιημένη εξίσωση της διατμητικής αντοχής (του Terzaghi) η οποία ισχύει όταν υπάρχει πίεση πόρων με αποτέλεσμα η τάση σ να γίνεται ενεργός¹⁶

¹⁵ Η σχέση $\sigma = \sigma' + u$ διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον K. Terzaghi περί το 1920 και αποτέλεσε την αρχή της εξέλιξης της μοντέρνας Εδαφομηχανικής. Η σχέση εφαρμόζεται και ισχύει μόνο για κορεσμένα εδάφη.

¹⁶ δηλ. $\sigma - u$, όπου u η πίεση των πόρων

2.3 Αστοχία Εδαφικών Υλικών

Στα επόμενα εξετάζεται χωριστά η συμπεριφορά των κοκκωδών (αμμωδών) και των συνεκτικών (αργιλικών) εδαφών

2.3.1 Κοκκώδη εδάφη

Τα κοκκώδη εδαφικά υλικά αποτελούνται από ασύνδετους ή χαλαρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους που σχηματίζουν τον εδαφικό σκελετό. Τα εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό με την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων και οδηγούν σε παραμορφώσεις που κυρίως οφείλονται σε ολισθήσεις και κυλίσεις μεταξύ των κόκκων. Είναι προφανές ότι η **τριβή** μεταξύ των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση των εδαφικών υλικών. Ένας άλλος παράγοντας που επίσης συντελεί στην παραμόρφωση των εδαφών είναι η **πραγματική συνοχή**, η "συγκόλληση" δηλαδή των κόκκων λόγω ηλεκτροχημικών ή άλλων δυνάμεων. Στα αμμώδη εδαφικά υλικά η τριβή αποτελεί τον κύριο παράγοντα παραμορφώσεων, επειδή η επιρροή της πραγματικής συνοχής είναι αμελητέα, με εξαίρεση τις λεγόμενες "σιμεντωμένες" άμμους.

Στα κοκκώδη εδάφη η αστοχία συμβαίνει με γενικευμένη ολίσθηση μεταξύ των κόκκων και μακροσκοπικά εμφανίζεται σαν σχετική ολίσθηση (κίνηση) σε κάποιο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται **επίπεδο αστοχίας**.

Νόμος αστοχίας (νόμος Coulomb), που καθορίζει τους κρίσιμους συνδυασμούς αστοχίας των ενεργών τάσεων:

$$\tau = \sigma' \tan \varphi$$

όπου :

φ : είναι η γωνία τριβής του εδαφικού υλικού.

Συνεπώς, αν σε **όλα** τα επίπεδα του εδαφικού στοιχείου οι ορθές και διατμητικές τάσεις σ' , τ είναι τέτοιες ώστε:

$$\tau - \sigma' \tan \varphi < 0$$

το εδαφικό στοιχείο **δεν** αστοχεί. Αν, αντίθετα, σε **κάποιο** επίπεδο του εδαφικού στοιχείου ισχύει:

$$\tau - \sigma' \tan \varphi = 0$$

το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και μάλιστα η αστοχία (γενικευμένη ολίσθηση) συμβαίνει στο επίπεδο αυτό. Τέλος, η περίπτωση

$$\tau - \sigma' \tan \varphi > 0$$

δεν είναι δυνατόν να συμβεί, επειδή το υλικό θα έχει ήδη αστοχήσει.

Κατά το νόμο του Coulomb η αστοχία των κοκκωδών εδαφών διέπεται από τα γνωστά χαρακτηριστικά των νόμων της μηχανικής τριβής. Ειδικότερα, σε κάθε επίπεδο του εδαφικού στοιχείου ορίζεται η διαθέσιμη **διατμητική αντοχή** (τ_u) στο επίπεδο αυτό από τη σχέση:

$$\tau_u = \sigma' \tan \varphi$$

οπότε το εδαφικό στοιχείο αστοχεί όταν σε κάποιο επίπεδο (το επίπεδο αστοχίας) η διατμητική τάση (τ) γίνει ίση με τη διαθέσιμη διατμητική

αντοχή (τ_u). Η αστοχία του εδάφους εκδηλώνεται με τη μορφή γενικευμένης ολίσθησης κατά μήκος του συγκεκριμένου επιπέδου αστοχίας. Αντίθετα, ένα εδαφικό στοιχείο **δεν** αστοχεί όταν σε **όλα** τα επίπεδα η διαθέσιμη διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα διατμητική τάση.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι, κατά το νόμο του Coulomb για τα κοκκώδη εδάφη, το έδαφος **δεν** αστοχεί κατά μήκος του επιπέδου στο οποίο αναπτύσσεται η **μέγιστη διατμητική τάση** (όπως ίσως θα αναμενόταν) αλλά κατά μήκος ενός επιπέδου στο οποίο ο λόγος της διατμητικής τάσης (τ) προς την ορθή τάση (σ') έχει μια ορισμένη τιμή (είναι ίσος με $\tan\varphi$).

2.3.2 Συνεκτικά εδάφη

Στα συνεκτικά ή αργιλικά εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται αφενός μεν στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων, αφετέρου δε στην πραγματική συγκόλληση (συνοχή) των κόκκων. Η συνοχή αυτή αναπτύσσεται είτε λόγω της πραγματικής σιμέντωσης μεταξύ των κόκκων είτε, γενικότερα, λόγω ηλεκτροχημικών δυνάμεων συνάφειας μεταξύ των προσροφημένων διπλών στρώσεων και των αργιλικών πλακιδίων. Αντίθετα, στα κοκκώδη εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται αποκλειστικά στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων. Από τα ανωτέρω εξηγείται και η διαφορετική συμπεριφορά των άμμων και των αργίλων κατά την αστοχία. Ειδικότερα, η διατμητική αντοχή των αμμωδών εδαφών εξαρτάται αποκλειστικά από την ύπαρξη ορθής ενεργού τάσης (πίεσης), οπότε όταν η τάση αυτή μηδενισθεί μηδενίζεται και η αντοχή τους. Αντίθετα, τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν (όχι όμως πάντοτε, όπως θα αναφερθεί στα επόμενα) **πραγματική συνοχή** και έτσι εμφανίζουν διατμητική αντοχή ακόμη και όταν η ορθή τάση είναι μηδέν (παράδειγμα: τα κατακόρυφα πρηνή ύψους αρκετών μέτρων σε αργιλικά εδάφη κατά τις εκσκαφές για την κατασκευή υπογείων χώρων). Εργαστηριακές μετρήσεις της διατμητικής αντοχής συνεκτικών εδαφών (όπως π.χ. τα κλασσικά πειράματα του Hvorslev στην άργιλο Wiener Tegel) οδηγούν στην ακόλουθη έκφραση του **νόμου αστοχίας** των αργιλικών εδαφών¹⁷

Η γωνία τριβής και η συνοχή ονομάζονται **παράμετροι διατμητικής αντοχής**. Όπως η γωνία τριβής έτσι και η πραγματική συνοχή **δεν** είναι ιδιότητα του υλικού και, συνεπώς, δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την προϊστορία των φορτίσεων και άλλους παράγοντες (όπως θα

¹⁷ $\tau = c + \sigma' \tan \varphi$

αναφερθεί στα επόμενα). Όπως στις άμμους έτσι και στις αργίλους, όταν η διατμητική τάση (τ) σε **όλα** τα επίπεδα ενός εδαφικού στοιχείου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη διαθέσιμη διατμητική αντοχή ($\tau \leq c + \sigma \tan \varphi$), το εδαφικό στοιχείο δεν αστοχεί. Αντίθετα, αν σε **κάποιο** επίπεδο του εδαφικού στοιχείου η διατμητική τάση είναι ίση με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή (δηλαδή ικανοποιείται η εξίσωση 9.9), τότε το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και μάλιστα η αστοχία εκδηλώνεται με ολίσθηση κατά μήκος του επιπέδου αυτού (επίπεδο αστοχίας). Ανάλογη διαδικασία με αυτήν που αναπτύχθηκε προηγουμένως για τα αμμώδη υλικά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συνάρτηση:

$$f(\theta) = \tau - \{c + \sigma \tan \varphi\}$$

έχει και πάλι μέγιστη τιμή, όταν δηλαδή το κρίσιμο επίπεδο (επίπεδο αστοχίας) σχηματίζει και πάλι γωνία $\theta = \varphi$ ως προς το επίπεδο της μέγιστης κύριας τάσης. Τέλος, η εξίσωση $f(\theta) = 0$ καταλήγει στην έκφραση του νόμου αστοχίας ως προς τις κύριες τάσεις (για την περίπτωση επιπέδων παράλληλων προς τον άξονα της σ_2):

2.4 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής Εδάφους

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής είναι εφικτό να επιτευχθεί μέσα απο την εφαρμογή των εξής μεθόδων

- **Συμπύκνωση με δονήσεις με ή χωρίς ταυτόχρονη εκτόπιση εδαφικού υλικού.** Η παρούσα μέθοδος επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητικών οδοστρωτήρων, εκρήξεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους, δονήσεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους πασσάλων συμπύκνωσης, ισχυρών κρούσεων στην επιφάνεια του εδάφους και vibroflotation.
- **Συμπύεση ή στερεοποίηση πριν από την κατασκευή** Για να επιτευχθεί η μέθοδος ακολουθείται η διαδικασία προφόρτισης, υπερφόρτισης έμπηξης αμμοπασσάλων ,δυναμικής στερεοποίησης και ηλεκτρώσμωσης.
- **Θερμικές διεργασίες** Η διαδικασία αυτή γίνεται είτε με ξήρανση ή υπερθέρμανση είτε με πάγωμα του εδάφους.
- **Ενίσχυση.** Η μέθοδος ενίσχυσης εφαρμόζεται με προσθήκη πασσάλων ή διαφραγμάτων με επι τόπου ανάμιξη εδάφους και σταθεροποιητικό υλικού, έμπηξη χαλικοπασσάλων και με όπλιση με κατάλληλα υλικά (οπλισμένο έδαφος)
- **Ενέσεις.** Στη παρούσα μέθοδο εφαρμόζονται ενέσεις που περιέχουν κοκκώδη, χημικά διαλύματα, ενέσεις εκτόπισης εδαφικού υλικού και ηλεκτροκίνητα φαινόμενα.

Η κάθε μέθοδος αποτελεί διαφορετικό αντικείμενο μελέτης και δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί στο παρών κεφάλαιο. Στα επόμενα κεφάλαια, (Στερεοποίησης και Ρευστοποίησης) θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα

Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά το υπόγειο νερό αποτελεί το 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη και είναι ένας σημαντικός γεωλογικός παράγοντας. Οι δύο θεμελιώδεις αιτίες για τον ενεργό ρόλο του υπόγειου νερού είναι:

1. Η ικανότητά του να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον που το περιέχει
2. Η συστηματική χωρική κατανομή της ροής του

Αλληλεπίδραση και ροή συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλες τις κλίμακες του χωρόχρονου, αν και ποικίλλουν σε ρυθμό και ένταση. Έτσι τα αποτελέσματα της ροής του υπόγειου νερού γίνονται ορατά από την επιφάνεια του εδάφους έως τα μεγαλύτερα βάθη και από τη διάρκεια μιας ημέρας μέχρι την κλίμακα του γεωλογικού χρόνου.

Οι ποικίλες εκδηλώσεις που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση υπόγειων νερών και περιβάλλοντος σε μια περιοχή ονομάζονται «επιτόπια περιβαλλοντικά αποτελέσματα του υπόγειου νερού» (*in situ environmental effects of groundwater*).

Η παρουσία του υπόγειου νερού ελαττώνει την ενεργό τάση μεταξύ των κόκκων, μειώνει τη διατμητική αντοχή και συνεπώς την ευστάθεια των πρανών. Σαν αποτέλεσμα κινήσεις εδαφικής ύλης μπορεί να προκληθούν κατά μήκος ασυνεχειών με μεγέθη που κυμαίνονται από επανατοποθετήσεις κόκκων μέχρι ολισθήσεις. Η διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική σε περιοχές, όπου ευρείες μεταβολές στο ύψος των βροχοπτώσεων προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στη στάθμη του υπόγειου νερού. Το νερό μειώνει τη συνοχή των γεωλογικών

σχηματισμών και το συντελεστή τριβής ανάμεσα στις επαπτόμενες επιφάνειες με αποτέλεσμα τη μείωση της ευστάθειας των πρανών. Τα ανωτέρω σε συνδυασμό με ανθρώπινες παρεμβάσεις (πλημμελής κατασκευή τεχνικών έργων) οδηγούν σε φαινόμενα, όπως: ολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, καθίζησης, ρευστοποίησης, λασπορροών, ερπυσμούς εδαφών, κατολισθήσεων.

Η διατμητική αντοχή, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι αυτή που αντιστέκεται στη θραύση και/ή στην ολίσθηση του εδάφους κατά μήκος μιας επιφάνειας (επίπεδο θραύσης). Τα ανωτέρω μεγέθη συνδέονται με την εξίσωση του Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

όπου :

Φ : είναι η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

τ : είναι η διατμητική δύναμη

c : συνοχή (kPa)

σ :Ορθή τάση (kPa)

Για αδρομερή, μη συνεκτικά εδάφη η συνοχή c είναι μηδενική. Η γωνία τριβής φ εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα των εδαφών. Καθώς οι περισσότερες κατολισθήσεις σχετίζονται με την αύξηση της υδροστατικής πίεσης σημαίνει ότι απαιτείται επιφανειακή και υπόγεια αποστράγγιση ή αποχέτευση για την αποτροπή τους.

3.1 Τύποι καθιζήσεων

Τα φορτία των κατασκευών έχουν ως αποτέλεσμα τη συμπίεση του εδάφους. Η συμπίεση αυτή προκαλείται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- α) αποβολή αέρα ή νερού των πόρων,
- β) αναδιάταξη στοιχείων του εδάφους,
- γ) παραμόρφωση ή θραύση στοιχείων του εδάφους.

Γενικά, η καθίζηση του εδάφους που προκαλείται από την επιβολή φορτίων μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες:

1. **Άμεση καθίζηση.** Είναι η καθίζηση η οποία λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου. Η άμεση καθίζηση οφείλεται στην ελαστική παραμόρφωση του ξηρού εδάφους, καθώς επίσης και του υγρού και του κορεσμένου εδάφους, χωρίς μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας.
2. **Πρωτογενής καθίζηση ή καθίζηση λόγω στερεοποίησης.** Οφείλεται στην αποβολή του νερού των πόρων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στερεοποίηση.
3. **Δευτερογενής καθίζηση.** Παρατηρείται στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη, και οφείλεται στην πλαστική αναδιάταξη της υφής τους. Είναι μία πρόσθετη συμπύκνωση που λαμβάνει χώρα υπό σταθερό φορτίο, όπως στο φαινόμενο του ερπυσμού. Το φαινόμενο της δευτερογενούς καθίζησης έπεται του φαινομένου της στερεοποίησης.

Ανάλογα με τα αίτια που προκαλούν τις καθιζήσεις, αυτές διαχωρίζονται σε: α) ενεργές και β) παθητικές καθιζήσεις. Οι ενεργές καθιζήσεις οφείλονται στα φορτία της ίδιας της κατασκευής ενώ οι παθητικές σε επιρροές που δεν έχουν σχέση με αυτήν.

Ενεργές Καθιζήσεις. Οι ενεργές καθιζήσεις μπορεί να οφείλονται:

- Στην ελαστική συμπίεση που προκαλείται από τα στατικά φορτία της κατασκευής.
- Σε παραμένουσες παραμορφώσεις που προκαλούν τα στατικά ή δυναμικά φορτία της κατασκευής (από τη λειτουργία μηχανών σε εργοστάσια για παράδειγμα). Προέρχονται κυρίως από τη συμπίεση ενός βράχου χαλαρής συναρμογής, από το κλείσιμο των ασυνεχειών ή από την έκθλιψη των υλικών πλήρωσης που περιέχονται στις ασυνέχειες και τη διείσδυση τους σε παρακείμενα ανοικτά ρήγματα ή όταν η δυνατότητα έκθλιψης τους δεν υπάρχει από τη στερεοποίηση των υλικών πλήρωσης.
- Σε ερπυστικά φαινόμενα που προκαλούν τα φορτία της κατασκευής.
- Σε ολισθητικές κινήσεις κατά μήκος παρακείμενων γεωλογικών ασυνεχειών.

Παθητικές Καθιζήσεις. Οι παθητικές καθιζήσεις μπορεί να οφείλονται:

- Σε ελαστικές παραμορφώσεις οι οποίες προκαλούνται από την εφαρμογή φορτίων στη γειτονική περιοχή. Αποφορτίσεις της γειτονικής περιοχής μπορεί να οδηγήσουν σε ανυψώσεις (διάνοιξη εκσκαφής μιας γειτονικής θεμελίωσης για παράδειγμα).
- Σε παραμένουσες παραμορφώσεις εξαιτίας μεταβολών στη γειτονική περιοχή.
- Σε ερπυστικές ιδιοκινήσεις, ιδιαίτερα όταν η κατασκευή είναι θεμελιωμένη σε πρηνή.
- Ολισθητικές κινήσεις που δεν οφείλονται στην κατασκευή αλλά σε διαβρωτικά φαινόμενα του βραχώδους υπόβαθρου.
- Επιδράσεις δυναμικών φορτίων, για παράδειγμα κυκλοφοριακές δονήσεις, σεισμοί, ανατινάξεις σε κοντινά λατομεία.
- Είσοδος νερού στα υλικά πλήρωσης με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση των παραμέτρων αντοχής των συνεχειών και ολισθητικές κινήσεις.
- Μεταβολές όγκου, όπως για παράδειγμα εξαιτίας του ανυδρίτη σε γύψο ή εξαιτίας απορρόφησης ή απομάκρυνσης νερού από αργιλικά πετρώματα ή υλικά πλήρωσης.
- Διακυμάνσεις της στάθμης του φρεατίου ορίζοντα: οι αυξομειώσεις του ενεργού βάρους του βράχου που προκαλούν οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε παθητικές καθιζήσεις.
- Επιδράσεις παγετού μπορούν να προκαλέσουν παθητικές ανυψώσεις ή παθητικές καθιζήσεις.
- Επιδράσεις από παρακείμενα υπόγεια μεταλλεία.
- Διαλυτότητα του πετρώματος, για παράδειγμα καρστικά πετρώματα.

3.1.1 Άμεση καθίζηση

Ονομάζεται και αστράγγιστη καθίζηση, επειδή συμβαίνει χωρίς εισροή ή εκροή νερού στο έδαφος. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί πως στα κορεσμένα αργιλικά εδάφη δεν φεύγει νερό. Στα μερικώς κορεσμένα ή ξηρά αργιλικά, καθώς και στα χοντρόκοκκα, έχουμε αποβολή νερού στην άμεση καθίζηση (που είναι και η μοναδική που παρατηρείται). Το ότι ο όγκος δεν μεταβάλλεται σημαίνει ότι ο λόγος του Poisson είναι $\nu = 0.50$. Οι καθιζήσεις προκαλούνται από τις διατμητικές παραμορφώσεις μέσα στο έδαφος, και αναγκάζουν την επιφάνεια του να αλλάξει σχήμα. Αυτές οι παραμορφώσεις υποτίθεται ότι είναι ελαστικές, έτσι οι καθιζήσεις θα αναιρεθούν όταν αφαιρεθεί το φορτίο.

Οι άμεσες καθιζήσεις πραγματοποιούνται σχεδόν αμέσως με την εφαρμογή της φόρτισης, γι' αυτό συμβαίνουν κυρίως κατά το χρόνο της κατασκευής. Για πολλές κατασκευές, αυτές οι καθιζήσεις 'ενσωματώνονται' στα έργα, πριν από την προσθήκη ευπαθών στοιχείων, όπως η επένδυση ή οι χρωματισμοί. Όμως για τις κατασκευές που τα ευπαθή στοιχεία κατασκευάζονται στην αρχή ή κατά τη διάρκεια, όπως οι φέροντες τοίχοι, οι άμεσες καθιζήσεις μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση. Το θεμέλιο ή η φορτιζόμενη επιφάνεια υποτίθεται ότι είναι εύκαμπτη και προκαλεί μια καθίζηση με δισκοειδές καμπύλο σχήμα με μέγιστο στο κέντρο του θεμελίου. Μια ακριβής λύση για τις άμεσες καθιζήσεις, δόθηκε από τους Ueshita και Meyerhof (1968). Χρησιμοποιείται η έκφραση:

$$\rho_i = (qB / Eu) \times I$$

όπου,

ρ_i η άμεση καθίζηση στη γωνία της φορτιζόμενης επιφάνειας

q η ομοιόμορφα ασκούμενη πίεση

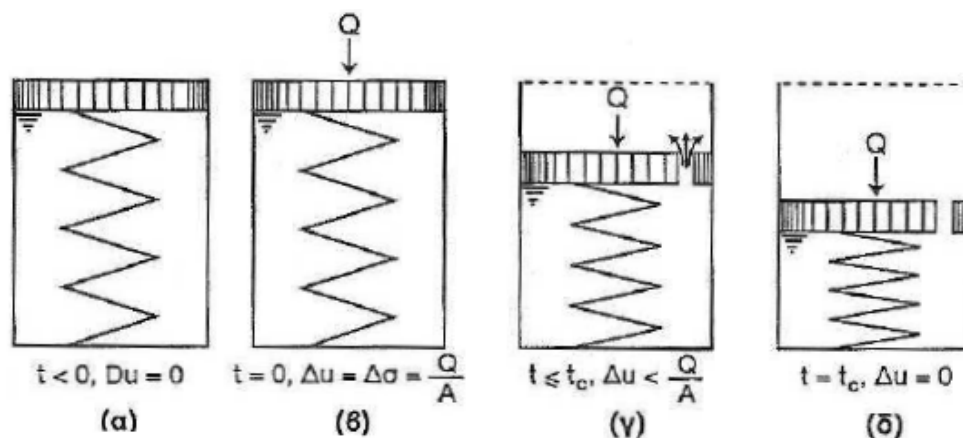
B το πλάτος της φορτιζόμενης επιφάνειας

I ο συντελεστής επιρροής,

Eu το μέτρο ελαστικότητας του αστράγγιστου εδάφους

3.1.2 Καθίζηση λόγω Στερεοποίησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα αμμώδη εδάφη η αύξηση του φορτίου επιφέρει γρήγορη αποβολή του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα η άμεση καθίζηση και η στερεοποίηση να συμβαίνουν ταυτόχρονα. Όταν όμως ένα στρώμα κορεσμένης, συμπιεστής αργίλου υφίσταται μια αύξηση του φορτίου, η μεν άμεση (ελαστική) καθίζηση συμβαίνει αμέσως, η δε στερεοποίηση συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η καθίζηση της αργίλου, που προκαλείται από τη στερεοποίηση, είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την άμεση καθίζηση.



Εικόνα 10. Μηχανικό ανάλογο της στερεοποίησης

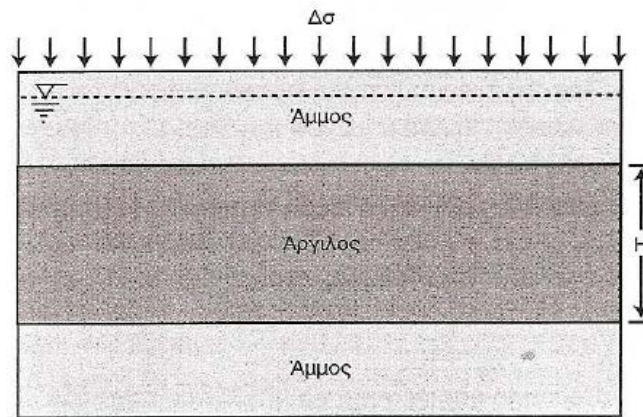
Η παραμόρφωση της κορεσμένης αργίλου λόγω στερεοποίησης μπορεί να γίνει κατανοητή θεωρώντας ένα απλό μηχανικό ανάλογο, το αποτελείται από έναν κύλινδρο με ελατήριο στο κέντρο του (βλ. εικόνα.). Γεμίζουμε τον κύλινδρο με νερό, και στην επιφάνεια του εφαρμόζουμε, έσω υδατοστεγούς εμβόλου, ένα φορτίο Q . Εάν η εσωτερική επιφάνεια της διατομής του κυλίνδρου είναι A , η αναπτυσσόμενη τάση είναι

$$*\sigma = Q/A.$$

Αμέσως μετά την εφαρμογή του φορτίου (ενώ η βαλβίδα διαφυγής του νερού είναι κλειστή), η τάση σ^* παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το νερό, επειδή το νερό είναι ασυμπίεστο, είναι δηλαδή: $\sigma^* = \Delta u$. Όταν ανοίξουμε την βαλβίδα, αρχίζει η εκροή του νερού, μειώνεται η πίεση του, είναι δηλαδή

$$A_u < \sigma^*,$$

ενώ το υπόλοιπο του φορτίου Q παραλαμβάνεται από το συμπιεζόμενο ελατήριο. Αυτό συνεχίζεται μέχρι που θα μηδενιστεί η πίεση του νερού ($A_u = 0$), οπότε το φορτίο παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το ελατήριο (βλ. εικόνα.).



Εικόνα 11. Στρώση κορεσμένης, συμπιεστής αργίλου, μεταξύ στρώσεων άμμου. Έχοντας κατά νου το παραπάνω μηχανικό ανάλογο, μπορούμε να αναλύσουμε την παραμόρφωση μιας στρώσης κορεσμένης αργίλου, πάχους H , η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ δύο στρώσεων άμμου και η οποία υφίσταται ξαφνικά μια πρόσθετη ολική τάση σ^* . Η τάση αυτή παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων και από το στερεό σκελετό του εδάφους, πράγμα που σημαίνει ότι η ολική τάση μοιράζεται μεταξύ της ενεργού τάσης σ' και της πίεσης του νερού των πόρων Δu , δηλαδή:

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

όπως στο μηχανικό ανάλογο, όπου το ελατήριο ενεργεί κατ' αναλογία,

όπως ο στερεός σκελετός του εδάφους.

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

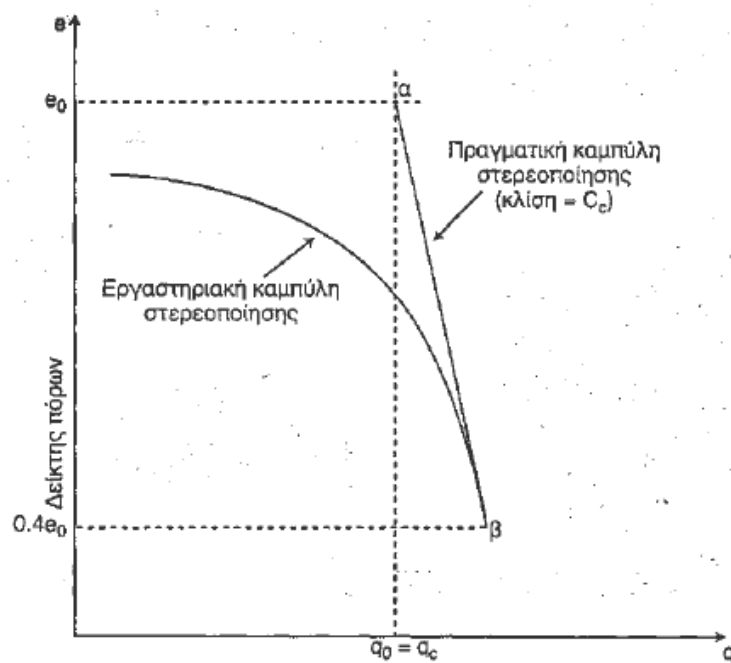
$$*\sigma = *\sigma' + *u.$$

Η διαδικασία αυτή της μεταφοράς του φορτίου από την υγρή φάση στη στερεά φάση, το φαινόμενο δηλαδή της στερεοποίησης, διαρκεί μέχρι να ολοκληρωθεί η αποβολή του νερού, μέχρι να ολοκληρωθεί δηλαδή η στράγγιση της αργίλου. Θεωρητικά, η διάρκεια της στερεοποίησης είναι άπειρη, $t = \infty$. Πρακτικά, ο χρόνος της στερεοποίησης, $t = t_c$, είναι πεπερασμένος, εξαρτώμενος προφανώς από την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους. Όταν ολοκληρωθεί η στράγγιση, η πίεση του νερού των πόρων μηδενίζεται, δηλ. $u = 0$, οπότε η ολική τάση $*\sigma$ παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το στερεό σκελετό του εδάφους, δηλαδή:

$$*\sigma = *\sigma'$$

Συνέπεια της στερεοποίησης είναι η καθίζηση της αργιλικής στρώσης, η οποία συμπαρασύρει την υπερκείμενη κατασκευή. Η καθίζηση αυτή είναι σχετικά ακίνδυνη, εάν είναι ομοιόμορφη. Γίνεται όμως επικίνδυνη, όταν είναι ανομοιόμορφη (διαφορική καθίζηση). Ο βαθμός του κινδύνου ή επικινδύνου εξαρτάται, προφανώς, από το μέγεθος των τιμών των καθιζήσεων.

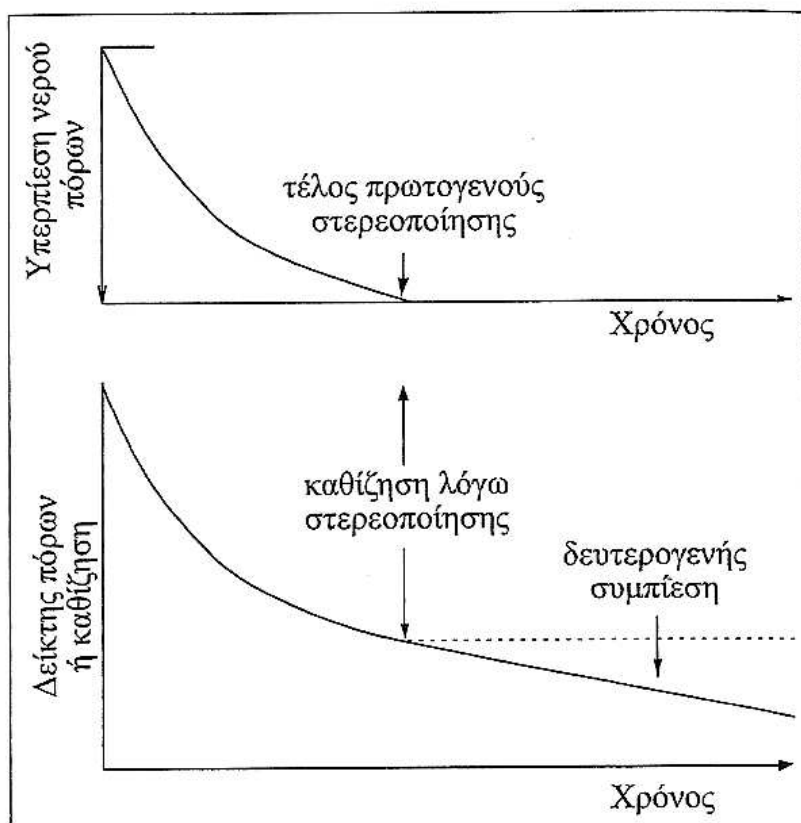
- Πραγματοποιείται βαθμιαία, μετά το τέλος της αρχικής καθίζησης, με βαθμιαία απομάκρυνση του νερού των πόρων από το έδαφος και μεταφορά της φόρτισης από το νερό στο στερεό σκελετό.
- Η παρακολούθηση του φαινομένου γίνεται με τη μέτρηση της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων.
- Το φαινόμενο τελειώνει όταν η πίεση του νερού των πόρων εξισωθεί με τις υπάρχουσες οριακές υδραυλικές συνθήκες.



Εικόνα 12. Γραφική μέθοδος προσδιορισμού της πραγματικής καμπύλης στερεοποίησης. (Das, 1998)

3.1.3 Δευτερογενής Καθίζηση

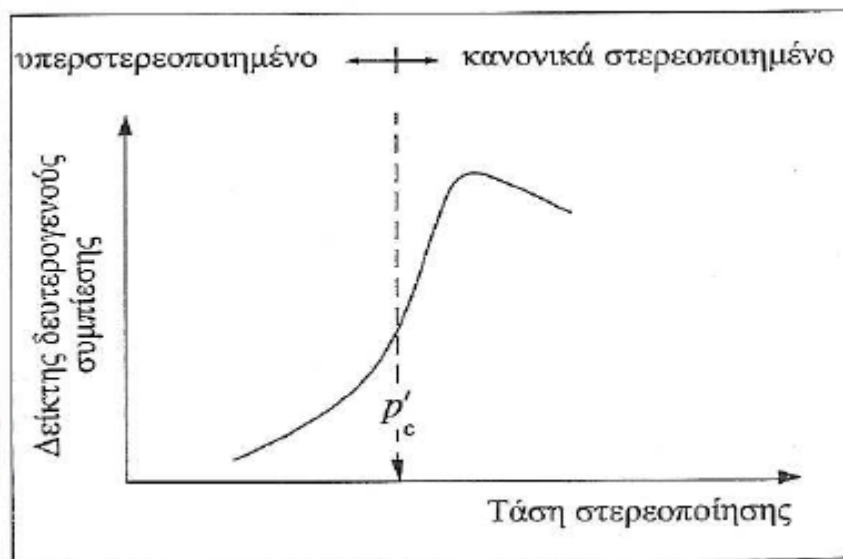
Σε μερικούς τύπους εδαφών, έχει διαπιστωθεί ότι οι μειώσεις του όγκου άρα, και οι καθιζήσεις συνεχίζονται ακόμη και αφού ολοκληρωθεί η πρωτογενής στερεοποίηση και εκτονωθούν όλες οι πιέσεις του νερού των πόρων



Εικόνα 13. Οι καθιζήσεις από αυτές τις ογκομετρικές παραμορφώσεις αναφέρονται ως δευτερογενής συμπίεση. Ο ερπυσμός λόγω στράγγισης μπορεί να αποτελείται και από ογκομετρικές και από διατμητικές παραμορφώσεις.

Έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί και προσομοιώματα για την ερμηνεία του φαινομένου, αλλά φαίνεται πιο πιθανό ότι σχετίζεται με μια ανακατανομή της αλληλεπίδρασης (δυνάμεων) μεταξύ των κόκκων, η οποία ακολουθεί τις μεγάλες δομικές αναδιατάξεις που συμβαίνουν στη

διάρκεια του σταδίου φόρτισης της κανονικής στερεοποίησης. Αυτή η υπόθεση ενισχύεται από το γεγονός ότι οι δευτερογενείς καθιζήσεις είναι ασήμαντες για πιέσεις κάτω από το επίπεδο προστερεοποίησης (όταν το έδαφος είναι υπερστερεοποιημένο και συμβαίνουν κυρίως ελαστικές παραμορφώσεις). Στα οργανικά όμως εδάφη, όπως επίσης και στα υψηλής συμπιεστότητας ανόργανα εδάφη, μπορούν να είναι μεγάλες όταν οι τάσεις υπερβούν την πίεση προστερεοποίησης και συμβούν πλαστικές παραμορφώσεις (δείτε το Σχήμα 1.10).



Εικόνα 14. Επίδραση της πίεσης προστερεοποίησης. Ο λόγος της δευτερογενούς καθίζησης προς την πρωτογενή είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το λόγο $*q/q_c$.

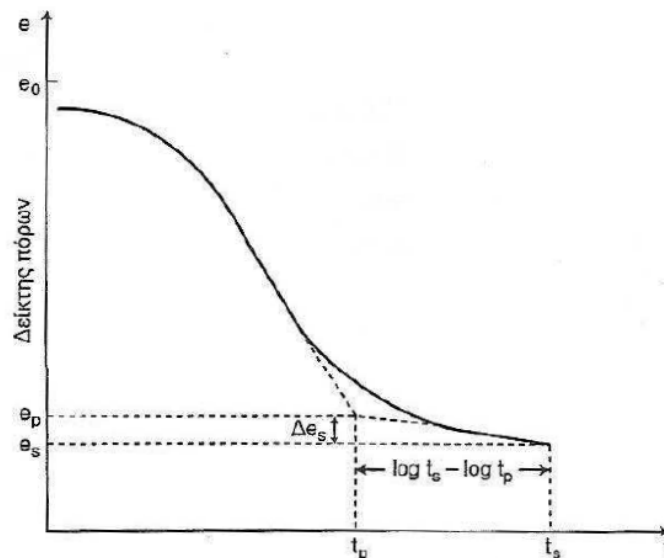
Για μεταβολές όγκου λόγω αποβολής του νερού των πόρων μπορεί να υπάρχουν αλλαγές της πίεσης των πόρων στο έδαφος, αλλά εωρούνται ότι είναι μικρές και συμβαίνουν με τόσο αργό ρυθμό ώστε δεν μπορούν να μετρηθούν. Στο διάγραμμα, όπου φαίνεται η χρονική μεταβολή του δείκτη πόρων κατά τη διάρκεια της δευτερογενούς στερεοποίησης. Η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος, $C\alpha$, που αντιστοιχεί στη δευτερογενή στερεοποίηση, ονομάζεται *είκτης δευτερογενούς συμπίεσης, ο οποίος, όπως προκύπτει από τις ενδείξεις του Σχ. 1.11, δίνεται από τη σχέση:

$$Ca = \frac{\Delta e_s}{\log \left(\frac{t_s}{t_p} \right)}$$

όπου:

e_p, e_s : δείκτες πόρων κατά την αρχή και το τέλος της δευτερογενούς στερεοποίησης

t_p, t_s : αντίστοιχοι χρόνοι



Εικόνα 15. Μεταβολή του δείκτη πόρων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, σε ημιλογαριθμική κλίμακα

Οι δευτερογενείς καθιζήσεις e_s μπορούν τότε να ληφθούν από τα

αποτελέσματα της εργαστηριακής δοκιμής ως:

$$\rho_s = H \frac{c_a}{1+e_p} \log \frac{t_s}{t_p}$$

όπου:

e_p : ο αρχικός δείκτης πόρων του εδάφους

H: το πάχος του εδαφικού στρώματος

Η τιμή της δευτερογενούς καθίζησης εξαρτάται από τις τιμές του χρόνου που επιλέχθηκαν. Για ευκολία, ίσως είναι αρκετά ακριβές να υιοθετηθεί χρόνος $t_p = 1$ έτος για την περίοδο κατασκευής και την πρωταρχική στερεοποίηση, και t_s ίσος με το χρόνο ζωής της κατασκευής.

Η παραπάνω έκφραση προϋποθέτει ότι θα συμβούν ίσες καθιζήσεις για κάθε κύκλο λογαρίθμου του χρόνου, δηλαδή καθίζηση από 1 έως 10 μήνες (πρώτο έτος) = καθίζηση από 10 έως 100 μήνες (πρώτη δεκαετία) = καθίζηση από 100 έως 1000 μήνες (πρώτος αιώνας) και ούτω καθεξής.

Δευτερογενής καθίζηση

- Παρατηρείται μετά το τέλος της καθίζησης λόγω στερεοποίησης, σε συνάρτηση με το χρόνο, και δεν έχει σχέση με την μεταβολή της πίεσης των πόρων.
- Τα αίτια και ο μηχανισμός ανάπτυξης της δευτερογενούς καθίζησης φαίνεται ότι ποικίλλουν στα διάφορα εδάφη.

3.2 Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

Στον τομέα της αντιμετώπισης των καθιζήσεων δύο είναι οι κύριες κατηγορίες μέτρων που διακρίνονται. Πρόκειται για

α) τα μέτρα πρόληψης και τα

β) μέτρα ανάσχεσης - ανακοπής. Η επιτυχία και των δύο ειδών μέτρων εξαρτάται από την επαρκή γνώση των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- Της γεωλογικής δομής της περιοχής.
- Των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν.
- Των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζονται.
- Των εδαφοτεχνικών και βραχομηχανικών μεγεθών των σχηματισμών που καθιζάνουν ή υπάρχει περίπτωση να καθιζήσουν.

Να σημειωθεί επίσης ότι οποιοδήποτε έργο αντιμετώπισης και αν εφαρμοστεί, αυτό μπορεί να αχρηστευτεί αν δε συντηρείται επαρκώς. Πολύ συχνά είναι τα φαινόμενα της απόφραξης των αγωγών αποστράγγισης, και επακόλουθη μείωση των συντελεστών ασφαλείας ενός έργου.

Η κατασκευή υψηλών οδικών επιχωμάτων παρουσιάζει προβλήματα, όταν το έδαφος αποτελείται από συμπιεστά υλικά: αργιλώδη, ιλυώδη και οργανικά εδάφη. Το μέγεθος της καθίζησης είναι σημαντικό και η διάρκεια του φαινομένου μπορεί να ξεπεράσει τα 5 χρόνια σε υλικά μικρής διαπερατότητας και συμπιεστά στρώματα μεγάλου πάχους. Για την αντιμετώπιση ανάλογων καταστάσεων, εφαρμόζονται βελτιωτικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν στόχο να αποκαταστήσουν την ισορροπία του συστήματος "επίχωμα-υπέδαφος" στο βραχύτερο δυνατό χρόνο, περιορίζοντας ταυτόχρονα το μέγεθος των καθιζήσεων. Οι κυριότερες από τις μεθόδους αυτές, οι οποίες εκ παραλλήλου, μπορεί να αυξάνουν τη μηχανική αντοχή και να μειώνουν κινδύνους ολίσθησης ή ρευστοποίησης του υπεδάφους, είναι:

- Η μερική ή ολική αντικατάσταση του υπεδάφους. Εκτελείται, πριν αρχίσουν οι εργασίες επιχωμάτωσης, εκσκαφή σε βάθος ανάλογο με το πάχος του συμπιεστού στρώματος και απομάκρυνση του υλικού. Στη συνέχεια τοποθετείται στη θέση του υγιές υλικό, συνήθως θραυστό λατομείου ή κροκάλες, μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και για τον λόγο αυτόν, η τεχνική αυτή ονομάζεται και εξυγίανση του υπεδάφους. Η μέθοδος είναι δυνατό να συνδυασθεί με την τεχνική των εκρήξεων, όπου η απομάκρυνση του υλικού επιτυγχάνεται δια πυροδότησης εκρηκτικών που έχουν τοποθετηθεί στον πυθμένα του συμπιεστού στρώματος και συγχρόνως το θραυστό υλικό που ευρίσκεται στην επιφάνεια μετατοπίζεται κατακόρυφα λόγω ιδίου βάρους

- Η δονητική συμπύκνωση που εφαρμόζεται για αύξηση της φέρουσας ικανότητας χονδρόκοκκων εδαφών. Καταλληλότερα για εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι εδάφη με μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων (< 15%). Η τεχνική απαιτεί ειδικό εξοπλισμό που αποτελείται από ένα δονούμενο έμβολο μεγάλου βάρους ανηρτημένου σε έναν ερπυστριοφόρο γερανό. Το έμβολο διεισδύει λόγω ασκούμενης πίεσης στο έδαφος και, μέσω της

δόνησης, προκαλεί συμπύκνωση σε μια ακτίνα 2,50 m. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για βελτίωση χαρακτηριστικών υπεδάφους μέχρι βάθος 10 m (Σχ. 6.1).

- Η δυναμική συμπύκνωση χρησιμοποιείται για βελτίωση αμμωδών εδαφών. Η τεχνική συνίσταται στην πτώση ενός μεγάλου φορτίου (5-101) από ένα υψος 5-10 m. Το φορτίο είναι ανηρτημένο σε ερπυστριοφόρο γερανό και αφήνεται να προσπέσει στην επιφάνεια του προς συμπύκνωση υπεδάφους. Η τεχνική είναι αρκετά δημοφιλής στη Γαλλία όπου πολύ μεγάλα φορτία χρησιμοποιούνται για συμπύκνωση αμμωδών, αμμοϊλυωδών και αργιλοϊλυωδών εδαφών. Η ενέργεια ανά κτύπο είναι $E = mgh$, όπου h το ύψος πτώσης του φορτίου. Η ακτίνα εμβέλειας της τεχνικής είναι $a = n \sqrt{lmh}$, όπου n εμπειρικός συντελεστής με τιμές $n = 0,5-1$ για αμμώδη εδάφη, $n = 0,3-0,5$ για αργιλικά εδάφη

- Η προφόρτιση που εφαρμόζεται για να επιταχυνθεί η διαδικασία της στερεοποίησης συνεκτικών εδαφών υπό την επίδραση αυξημένου κατακόρυφου φορτίου. Το πρόσθετο φορτίο $*\zeta$, συνήθως από εδαφικά ή θραυστά υλικά επί της στέψης του επιχώματος, αφαιρείται στην τελική φάση κατασκευής για να τοποθετηθεί το οδόστρωμα (Σχ. 6.3). Για την εκτέλεση της προφόρτισης απαιτείται προηγουμένως έλεγχος της ευστάθειας του επιχώματος το οποίο κινδυνεύει να ολισθήσει υπό την επίδραση αυξημένου φορτίου αν η διατμητική αντοχή του υπεδάφους είναι μικρή.

- Η κατασκευή πλευρικών αναχωμάτων. Πρόκειται για τεχνική που χρησιμοποιείται για αποτροπή της ολίσθησης του επιχώματος, μέσω της αύξησης των δυνάμεων και της ροπής ανύψωσης (Σχ. 6.4).

- Η σταδιακή κατασκευή. Όταν το συνολικό φορτίο του επιχώματος είναι μεγάλο, ο κίνδυνος ολίσθησης είναι σημαντικός σε υπεδάφη μικρής

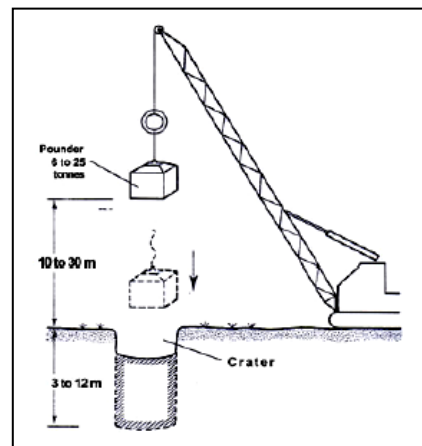
διατμητικής αντοχής ($c_u < 0,5 \text{ kg/cm}^2$). *Για της σταδιακής κατασκευής επιχώματος επί συνεκτικού υπεδάφους, εξασφαλίζεται προοδευτική αύξηση της διατμητικής αντοχής στο υπέδαφος παράλληλα με την αύξηση της ενεργού κατακόρυφης τάσης σ' .

- Η εκτέλεση αμμοστραγγιστηρίων και χαλικοπασσάλων που ενδείκνυται για βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής η αποστράγγιση εκτελείται προς δυο διευθύνσεις: με συντελεστή C_y για την κατακόρυφη αποστράγγιση και συντελεστή C_r για την ακτινική αποστράγγιση (Σχήμα 6.5). Οι χαλικοπάσσαλοι, παράλληλα με την παραπάνω ευεργετική επίδραση, παραλαμβάνοντας ένα μέρος του φορτίου, μειώνουν κατά ένα ποσοστό το μέγεθος της τελικής καθίζησης.

- Η χημική επεξεργασία. Είναι μέθοδος που αποσκοπεί στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους έδρασης του επιχώματος μέσω διάχυσης καταλλήλων ενεμάτων (τσιμέντου, ασφαλτοϋδαρών, μπεντονίνη). Συνήθως η τεχνική των ενεμάτων χρησιμοποιείται σε χονδρόκοκκα εδάφη και κατακερματισμένους βράχους. Πολλές από τις ως άνω μεθόδους, αλλά και ορισμένες άλλες, συνδυάζονται με χρήση γεωσυνθετικών υλικών που αποτελούν πλέον ένα ικανότατο εργαλείο για αντιμετώπιση προβλημάτων μηχανικής συμπεριφοράς σε γεωκατασκευές οδοποιίας.

3.2.1 Βελτίωση του Εδάφους με Προφόρτιση

Κατά τη μέθοδο αυτή η περιοχή του έργου προφορτίζεται (δηλαδή φορτίζεται **πριν** από την κατασκευή του έργου). Τούτο πραγματοποιείται συνήθως με απόθεση στην περιοχή του έργου εδαφικών υλικών σε ικανό πάχος, ώστε το υποκείμενο έδαφος να φορτισθεί σε βαθμό ανάλογο με την αναμενόμενη φόρτιση από τη μελλοντική κατασκευή. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι το σύνολο σχεδόν των παραμορφώσεων του εδάφους είναι μη-αντιστρεπτές, δηλαδή δεν αναιρούνται με την απομάκρυνση του αιτίου που τις προκάλεσε (του επιχώματος προφόρτισης στην προκείμενη περίπτωση). Έτσι, εκτιμάται ότι το σύνολο σχεδόν των υποχωρήσεων του εδάφους θα συμβούν κατά το χρόνο της προφόρτισης και όχι μετά την κατασκευή του έργου.



Εικόνα 16. Σχεδιαστική απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου

Βεβαίως, η μέθοδος της προφόρτισης έχει και μειονεκτήματα που σε αρκετές περιπτώσεις περιορίζουν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- η χρονική καθυστέρηση, που σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντική επειδή οι υποχωρήσεις του εδάφους λόγω της προφόρτισης δεν συμβαίνουν ακαριαία,
- η δυσκολία να διατεθούν οι αναγκαίες ποσότητες εδαφικού υλικού για την κατασκευή του επιχώματος προφόρτισης για περιβαλλοντικούς κυρίως λόγους.



Εικόνα 17. Αποτύπωση εργασιών προφόρτισης του εδάφους σε τεχνικό έργο στην Αμερική

3.2.2 Βελτίωση του Εδάφους με βαθιά ανάμιξη¹⁸

Η μέθοδος ορίζεται ως εξής : Βελτίωση μαλακών εδαφών με την προσθήκη σε αυτά βελτιωτικών υλικών (κονίες) τα οποία μειώνουν τις καθιζήσεις και συμβάλουν στην εν γένει σταθεροποίηση των εδαφών αυτών

Η εισαγωγή γίνεται με κυλινδρικά μηχανήματα τα οποία τοποθετούν το υλικό ακτινωτά καθ' όλο το ύψος του εδάφους εξ ου και ο όρος εδαφοπασσάλοι. Συνήθη βελτιωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται: τριμέντο Portland, ασβέστης μπετονίτης ιπτάμενη τέφρα γύψος κ.α. Τα βελτιωτικά υλικά εισάγονται στο έδαφος με τη χρήση ειδικών τρυπανιών/ αναμεικτήρων σε ξηρή ή σε υγρή μορφή και αναμιγνύονται με το προς βελτίωση έδαφος



Φιλοσοφία της Μεθόδου. Σκοπός είναι να επιτευχθεί ένα σταθερότερο έδαφος το οποίο να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον μαλακό έδαφος με αποτέλεσμα η επιβαλλόμενη φόρτιση να διαμοιράζεται μεταξύ του βελτιωμένου και του ασθενούς εδάφους.

¹⁸ Καλιουδάκης Κ. Βελτίωση του εδάφους με βαθειά ανάμιξη Ε.Μ.Π.

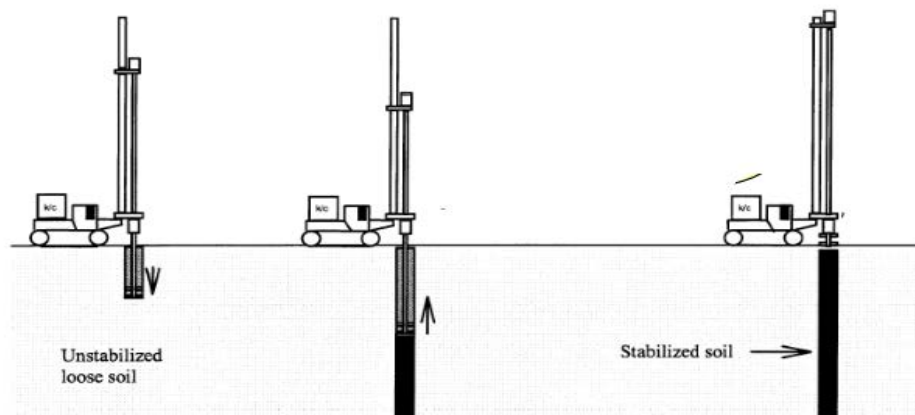
Η εφαρμογή της μεθόδου της βαθιάς ανάμειξης συνεισφέρει :

- Αύξηση της ευστάθειας των επιχωμάτων
- Αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους
- Προστασία απο ρευστοποίηση
- Μειώνει το χρόνο των καθιζήσεων
- Περιορισμός μολυσμένων εδαφών

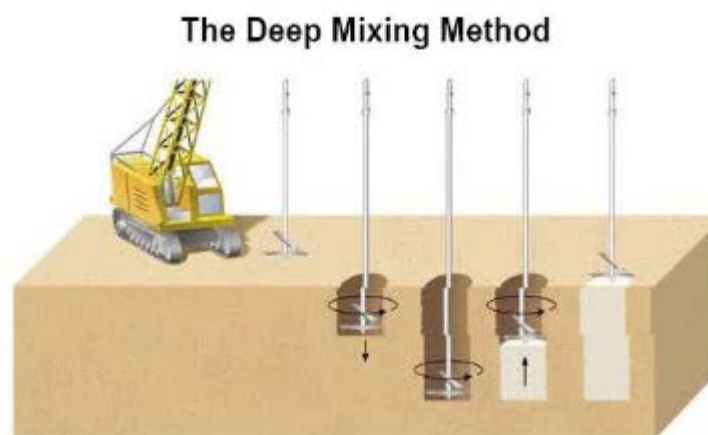
Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάμειξη

- Η δυνατότητα ροής μέσω του εδαφικού υλικού (συνήθως άργιλος) το βελτιωτικό υλικό και η ποσότητα που χρησιμοποιείται
- Οι συνθήκες πίεσης στο έδαφος κατά την τοποθέτηση της στήλης
- Η πίεση και η ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται
- Η γεωμετρία του διατρητικού μηχανήματος / αναμικτήρα
- Η ενέργεια ανάμειξης: η ταχύτητα περιστροφής του μηχανήματος
- Η τάση στερεοποίησης, η θερμοκρασία, η παρουσία του νερού, φαινόμενα διήθησης, τα οποία επηρεάζουν την 3^η φάση της μοριακής διάχυσης.

Ανάλυση της διαδικασίας Ανάμειξης



1. Δείσδυση του τρυπανιού αναμικτήρα στο απαιτούμενο βάθος
2. Διασπορά του βελτιωτικού υλικού στο προς βελτίωση έδαφος
 - 2.1 Διασπορά του υλικού
 - 2.2 Διαβροχή υλικού
 - 2.3 Σπάσιμο συσσωματωμάτων
 - 2.4 Ανακατανομή υλικού συσσωματωμάτων
3. Μοριακή διάχυση – πρόκειται για χημική διεργασία που γίνεται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής



Εικόνα 18. Η διαδικασία της μεθόδου της βαθιάς ανάμειξης.

3.2.3 Κατακόρυφα Γεωσύνθετα Στραγγιστήρια

Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερες υποβαθμισμένες από πλευράς εδαφικών χαρακτηριστικών περιοχές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έργων, είτε λόγω έλλειψης χώρων (περιαστικές περιοχές) είτε λόγω αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής (οδοποιία, λιμένες, αεροδρόμια, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, κλπ.). Αποτέλεσμα αυτού είναι μία παρατηρούμενη αύξηση στη χρήση μεθόδων βελτίωσης των χαρακτηριστικών του υπεδάφους προκειμένου να αυξηθεί και να μειωθεί η συμπιεστότητά του. Μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, αφ' ενός για τη μείωση της συμπιεστότητας του υπεδάφους και κατ' επέκταση των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής ενός



έργου και αφ' ετέρου για την αύξηση της διατμητικής του αντοχής, είναι και η προφόρτιση, κυρίως αργιλικών εδαφών, με σκοπό την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων από στερεοποίηση και την επίτευξη ικανοποιητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης πριν από την κατασκευή του έργου. Η διαδικασία της προφόρτισης συχνά επιταχύνεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή/και αύξηση προφόρτισης, εφ' όσον η φέρουσα ικανότητα του εδάφους το επιτρέπει.

Εικόνα. Γερανός τοποθέτησης κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων.

Τα στραγγιστήρια αυτά μπορεί να αποτελούνται είτε από αμμοπασσάλους / χαλικοπασσάλους διαμέτρου συνήθως 0 m είτε από γεωσύνθετα στραγγιστήρια μορφής λωρίδας πλάτους 100 mm συνήθως.



Cementation Ground Engineering Ltd, United Kingdom.

Εικόνα 19. Τοποθέτηση κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων στη θάλασσα.

3.2.3.1 Αρχή λειτουργίας σταρραγιστήριων¹⁹

«Καθίζηση» δεν σημαίνει τίποτα περισσότερο από μείωση του όγκου των κενών του εδάφους. Στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους, καθίζηση μπορεί να προκύψει μόνο με την απομάκρυνση του νερού που βρίσκεται μέσα στους πόρους του. Λαμβάνοντας υπόψη την πολύ χαμηλή διαπερατότητα των αργιλικών εδαφών αντιλαμβάνεται κανείς ότι ο χρόνος που απαιτείται για να στραγγίσει το νερό από τους πόρους του εδάφους και να ολοκληρωθεί το φαινόμενο της στερεοποίησης μπορεί να είναι πολύ μεγάλος (ακόμα και δεκαετίες). Ο χρόνος αυτός είναι ανάλογος του τετραγώνου της απόστασης που πρέπει να διανύσει το νερό για να φθάσει σε ένα ελεύθερα στραγγιζόμενο στρώμα (π.χ. ένα πολύ εκτεταμένο στρώμα άμμου ή στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους). Κατά συνέπεια ένας τρόπος για να μειωθεί δραστικά ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της στερεοποίησης (άρα και των καθιζήσεων), είναι η μείωση του μήκους της διαδρομής που θα πρέπει να διανύσει το νερό για να απομακρυνθεί από τους πόρους του εδάφους. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα εδάφη έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα κατά την οριζόντια διεύθυνση¹ ότι κατά την κατακόρυφη (συνήθως 2-5 φορές) λόγω της στρωσιγένειας που εμφανίζουν και της παρουσίας πολλών λεπτών ενστρώσεων ιλύος ή λεπτής άμμου. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο καλύτερος τρόπος για να μειωθεί ο χρόνος στερεοποίησης είναι να δοθεί η δυνατότητα στο νερό να αποστραγγίζει οριζόντια και σε μικρή απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται πολύ αποτελεσματικά με την τοποθέτηση εντός του εδάφους κατακόρυφων σταρραγιστήριων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, τα οποία επικοινωνούν με ένα οριζόντιο στρώμα μεγάλης διαπερατότητας (π.χ. ένα κοκκώδες στρώμα) στην επιφάνεια του εδάφους, κάτω από το επίχωμα προφόρτισης.

¹⁹ ΠΛΑΤΗΣ, Α.Δ. Κατακόρυφα Γεωσύνθετα Σταρραγιστήρια Prefabricated Vertical Drains (PVD)

3.2.3.2 **Είδη κατακόρυφων στραγγιστήριων** ²⁰

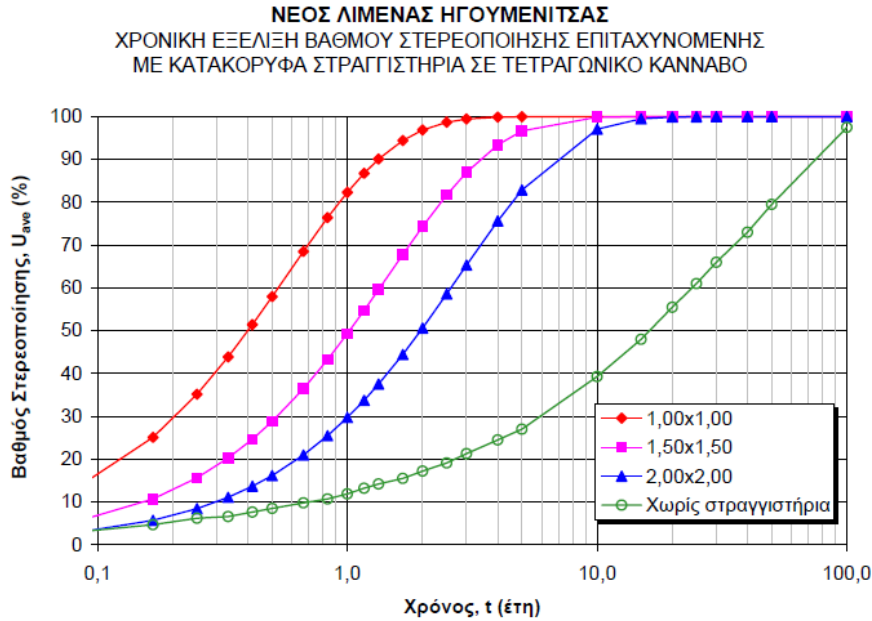
Η χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων για την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης και την ταχύτερη ολοκλήρωση των καθιζήσεων και αύξηση της αντοχής του εδάφους δεν είναι κάτι καινούργιο. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί από τη 1930, ο Barron δε το 1948 δημοσίευσε αναλυτική λύση της εξέλιξης της στερεοποίησης λόγω ακτινικής ροής του νερού των πόρων προς ένα κατακόρυφο φρέαρ.

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί και στην Ελλάδα επί τουλάχιστον 40 χρόνια. Για παράδειγμα ο διάδρομος προσαπογειώσεων του αεροδρομίου της Κέρκυρας έχει κατασκευαστεί τη διάρκεια του 1960 επί επιχώματος εντός της λιμνοθάλασσας Χαλκιοπούλου πάνω σε μαλακές αργίλους, όπου η εξέλιξη της στερεοποίησης επιτυγχάνθηκε με τη βοήθεια αμμοπασσάλων.²¹

Από τη δεκαετία του 1950 έχει αρχίσει διεθνώς η εφαρμογή κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων ως εναλλακτική λύση αυτής των παραδοσιακά χρησιμοποιούμενων αμμοπασσάλων παλαιότερα και χαλικοπασσάλων πιο πρόσφατα. Πιο συγκεκριμένα, τα γεωσύνθετα στραγγιστήρια αποτελούνται από ένα πολυμερή πυρήνα, η μορφή του οποίου επιτρέπει την ευχερή κατακόρυφη ροή του νερού, ο οποίος περιβάλλεται από ένα πολυμερές (ή και χάρτινο στο παρελθόν) φίλτρο (συνήθως γεώφασμα), το οποίο εμποδίζει τη διέλευση των κόκκων του εδάφους και την απόφραξη του στραγγιστηρίου.

²⁰ Πλατής Α.Δ. (2007). «Κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια». 2/16 Ημερίδα «Γεωτεχνικές Εφαρμογές Γεωσυνθετικών Υλικών», ΕΒΕΑ, 11-1-2007, Αθήνα.

²¹ Τζίτζας 1968

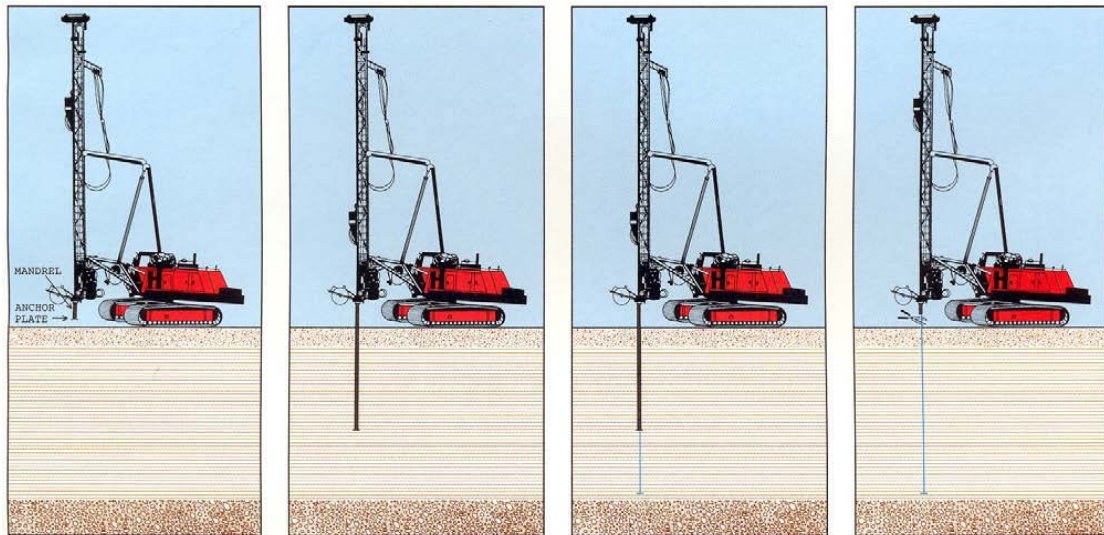


Εικόνα 20. Χρονική εξέλιξη στερεοποίησης με και χωρίς κατακόρυφα στραγγιστήρια

Τα πλεονεκτήματα των κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων έχουν επιβάλλει τη χρήση τους έναντι των μοπασσάλων τα τελευταία 20 χρόνια, είναι

- Καθαρότερο εργοτάξιο.
- Μικρότερη διατάραξη του εδάφους (ιδιαίτερα σημαντικό σε ευαίσθητες αργίλους).
- Χαμηλό κόστος.
- Μεγάλη ταχύτητα τοποθέτησης.
- Εξασφάλιση συνέχειας στραγγιστήριου.
- Μικρότερη διακίνηση αδρανών υλικών.

Έτσι το νερό των πόρων ρέει οριζόντια προς το πλησιέστερο στραγγιστήριο και από εκεί κατακόρυφα προς τη στρώση αποστράγγισης.



Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας τοποθέτησης κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων στο α πρέπει εδώ να αναφερθούν ορισμένοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τόσο τη χρονική εξέλιξη όσο και το μέγεθος των καθιζήσεων και που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της προφόρτισης. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού συνεχών ενστρώσεων άμμου ή αμμοϊλύος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική επιτάχυνση της στερεοποίησης λόγω οριζόντιας στράγγισης ακόμα και χωρίς τη χρήση στραγγιστηρίων. Η ευεργετική παρουσία αυτών των ενστρώσεων, εφ' όσον εντοπιστούν με βεβαιότητα, μπορεί να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό της προφόρτισης με ή χωρίς στραγγιστήρια, λαμβάνοντας υπόψη τη μικτή ροή που προκύπτει (τόσο κατακόρυφη προς τις ενστρώσεις όσο και οριζόντια προς τα στραγγιστήρια).

Αν οι προαναφερθείσες ενστρώσεις δεν είναι συνεχείς, ο μόνος τρόπος για να αξιοποιηθούν είναι μέσω κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή ανακουφιστικών φρεάτων. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να αραιωθεί ο κάρναβος των στραγγιστηρίων μετά από προσεκτικό σχεδιασμό (η έκταση της πληροφορίας που χρειάζεται για τις ενστρώσεις είναι σ' αυτή την περίπτωση σημαντική).

Η παρουσία σκληρών/ πυκνών ενστρώ-σεων εντός του μαλακού υπεδάφους μπο-ρεί να οδηγήσει σε δυσκολίες έμπηξης ή και σε στρέβλωση του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος (ιδιαίτερα σημαντικό σε θα-λάσσια έργα όπου το μήκος λυγισμού είναι μεγάλο). Η αύξηση των διαστάσεων του περιβλήματος προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή και η ακαμψία του έχει σαν αποτέ-λεσμα την αύξηση της διαμέτρου της ζώ-νης αναζύμωσης με αποτέλεσμα τη μείω-ση της απόδοσης των στραγγιστηρίων (αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται κατάλληλα υπόψη στο σχεδιασμό των στραγγιστηρί-ων). Μία λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι η προδιάτρηση ή η χρήση νερού εκτοξευόμενου με πίεση από το κάτω άκρο (jet), αλλά αυτό βέβαια συνεπάγεται αύξηση του κόστους και του χρόνου τοποθέτησης των στραγγιστηρίων.

Σε οργανικά εδάφη και τύρφες ένα μεγάλο μέρος των καθιζήσεων (πολλές φορές το μεγαλύτερο) προέρχεται από δευτερογενή συμπίεση, που έπεται της πρωτογενούς στερεοποίησης και είναι ερπυστικού τύ-που, χωρίς να σχετίζεται με εκτόνωση πί-εσης πόρων και στράγγιση νερού. Συνε-πώς η χρήση στραγγιστηρίων από μόνη της για την ταχεία ολοκλήρωση του φαινομένου της πρωτογενούς στερεοποίησης δεν αρκεί για την αντιμετώπιση των μελλο-ντικών καθιζήσεων του έργου και θα πρέ-πει να συνδυάζεται με κατάλληλη υπερ-φόρτιση του εδάφους ²²

²² Πλατής κ.α., 2006

Η επιλογή του κατάλληλου κατακόρυφου γεωσύνθετου στραγγιστηρίου και του καννάβου, αλλά και η επιρροή των προαναφερθέντων παραγόντων, δεν είναι πάντα εύκολο να ληφθούν υπόψη και αναπόφευκτα υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται αφ' ενός η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος (ιδιαίτερα στα μεγάλης κλίμακας έργα, όπου ο χρόνος και το κόστος της προφόρτισης είναι σημαντικά), όπου θα ελέγχεται με κατάλληλες ενόργανες μετρήσεις η αποτελεσματικότητα διαφόρων καννάβων και τύπων στραγγιστηρίων και η ανάγκη χρήσης τους, αφετέρου δε η συνεχής λήψη μετρήσεων (καθιζήσεων, πιέσεων πόρων και οριζόντιων μετακινήσεων) κατά τη διάρκεια της προφόρτισης, έτσι ώστε να επιβεβαιώνονται οι παραδοχές σχεδιασμού και να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα αν οι αποκλίσεις είναι σοβαρές.

3.3 Αναφορές καθιζήσεων σε Ελλάδα

Ο Ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από γεωμορφολογική και γεωλογική πολυμορφία. Το γεγονός αυτό εξηγεί το μεγάλο αριθμό καθιζήσεων. Ειδικά λοιπόν για τον Ελληνικό χώρο, αιτίες που οδηγούν σε συχνή εμφάνιση καθιζήσεων είναι:

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

3.3.1 Καλοχώρι Θεσσαλονίκης

Το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα εδαφικών υποχωρήσεων από υπεράντληση υδροφόρου ορίζοντα αναφέρεται στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης. Η υπεράντληση στο πεδίο των δελταϊκών αποθέσεων Γαλλικού και Αξιού από τη δεκαετία του 1950, οδήγησε στην εκδήλωση εκτεταμένων εδαφικών υποχωρήσεων στο χώρο του τριγώνου Παλαιά κοίτη Αξιού – Σίνδου -Εγκαταστάσεις ΕΚΟ, στη Βιομηχανική ζώνη στα δυτικά της Θεσσαλονίκης.

Η περιοχή εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη του Αξιού και συγκεκριμένα στην ενότητα της Παιονίας, ένα τεκτονικό βύθισμα που έχει πληρωθεί από θαλάσσια και λιμναία ιζήματα πάχους 600-700 m. Στους ανώτερους ορίζοντες αυτών των ιζημάτων διακρίνονται οι ακόλουθες ενότητες:

- Χαλαρές αποθέσεις με επικράτηση αμμωδών σχηματισμών,
- Χαλαρές αποθέσεις με επικράτηση αργιλοϊλυωδών σχηματισμών,
- Χαλαρές λεπτομερείς αποθέσεις με οργανικά.

Ο πλέον ευαίσθητος ορίζοντας που υπέστη την αύξηση της φόρτισης και συνεπώς συνέβαλε στην εκδήλωση των εδαφικών υποχωρήσεων, αποτελείται από ιλυώδεις αργίλους με φακοειδείς παρεμβολές άμμων και αφθονία φυλλαρίων μαρμαρυγία. Πρόκειται για απροφόρτιστο ορίζοντα με άτακτη διάταξη των ορυκτολογικών συστατικών, που εντοπίζεται σε βάθος από 5 έως 50m περίπου.

Οι υποχωρήσεις στην περιοχή Καλοχωρίου - Σίνδου προκάλεσαν τη βύθιση της περιοχής σε πολλά σημεία και πάνω από 2m, με σοβαρότερο αποτέλεσμα την σταδιακή προώθηση της θάλασσας στον οικιστικό χώρο του Καλοχωρίου, με αποτέλεσμα να κινδυνεύσουν ανθρώπινες ζωές. Οι υπεραντλήσεις (δεκάδες χιλιάδες m³/ημέρα) είχαν οδηγήσει σε υποβάθμιση του υδροφόρου τουλάχιστον 40m για την

περίοδο 1955-1981, με αποτέλεσμα ο υπόψη ευαίσθητος ορίζοντας να υποστεί συμπύκνωση με επαναπροσανατολισμό των εδαφικών του κόκκων. Άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος ήταν ο περιορισμός των αντλήσεων και η κατασκευή αναχώματος από το 1976, που προστατεύει το Καλοχώρι από την εισροή του θαλασσινού νερού. Το ανάχωμα αυτό συνεχώς ανυψώνεται, κάτι που υποδηλώνει ότι οι αντλήσεις δεν έχουν διακοπεί στην περιοχή που σημειωτέον βρίθει βιομηχανιών.

Πέρα από το ανάχωμα, που είναι εφοδιασμένο και με αντλιοστάσιο προκειμένου τα νερά της βροχής το χειμώνα να οδηγούνται στη θάλασσα για να μην πλημμυρίσουν το Καλοχώρι, οι εδαφικές υποχωρήσεις, είναι εμφανείς στο χωριό όπου υπόγεια σπιτιών έχουν εξαφανισθεί, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή από δίκτυα όπως του Ο.Τ.Ε.



Εικόνα 22. Σημειακή αποκόλληση τοιχοποιίας από διατμητικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια σεισμού στη Καλαμάτα

3.3.2 Μοσχάτο – Καλλιθέα Αθηνών

Στην περιοχή Μοσχάτου - Καλλιθέα στο Λεκανοπέδιο Αθηνών έχουν μετρηθεί καθιζήσεις της τάξης των 5 - 15. Οι καθιζήσεις αυτές έχουν πραγματοποιηθεί σε χαλαρές αλλουβιακές αποθέσεις του Κηφισού και Ιλισσού και η γένεση τους έχει αποδοθεί στις φορτίσεις που έχει δεχθεί η περιοχή λόγω της αστικοποίησης. Πρόσφατες μετρήσεις της στάθμης των υπόγειων νερών σ' ολόκληρο το Λεκανοπέδιο, επί 1,5 χρόνο έδειξαν ότι στην περιοχή Μοσχάτου - Καλλιθέας υπάρχει σημαντικός υποβιβασμός. Σε περιοχή που ταυτίζεται με αυτή στην οποία έχουν μετρηθεί οι καθιζήσεις, διαπιστώθηκε ότι το βάθος της στάθμης των υπόγειων νερών βρίσκεται σε αρνητικά υψόμετρα, κατά περιόδους περισσότερο και από 10μ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η πτώση της στάθμης οφείλεται σε υπεραντλήσεις που πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια από πολυάριθμες γεωτρήσεις τόσο στην υπ' όψη περιοχή όσο και στον ευρύτερο χώρο.

Λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής αυτής που οφείλεται στην αστική χρήση γης, στην εγγύτητα με τη θάλασσα και στην μη αναμενόμενη ελάττωση των αντλήσεων, απαιτείται παρακολούθηση του φαινομένου, με συνεχείς καταγραφές των διακυμάνσεων της στάθμης των υπόγειων νερών και του ρυθμού εξέλιξης των καθιζήσεων σε καθορισμένο δίκτυο.

3.3.3 Κατολίσθηση επιχώματος οδοποιίας στον νομό Καρδίτσας - Χειμώνας 2003-2004²³

Πλήρης αστοχία επιχώματος οδού λόγω ροής υπογείων υδάτων. Ο δρόμος αρχικά ήταν στη θέση της λήψης των φωτογραφιών. Λόγω ροής υπόγειων υδάτων από το βουνό αριστερά, έγινε κατολίσθηση και καταστράφηκε ολοσχερώς ο δρόμος. Για την αποκατάσταση, μετακινήθηκε ο άξονας προς το βουνό αριστερά και κατασκευάστηκε νέος δρόμος, αυτός που φαίνεται με 3Α στις φωτογραφίες. Στην δεύτερη πανοραμική φωτογραφία, στο σημείο κάτω δεξιά αναβλύζει νερό.



Εικόνα 23. Υποχώρηση του παλιού καταστρώματος από την



Εικόνα 24. Υποχώρηση του παλιού καταστρώματος από την

²³ Οι φωτογραφίες παραχωρήθηκαν ευγενικά από τον κ. Δημήτριο Τσούκη, Μηχανικό της Νομαρχίας Καρδίτσας.
http://www.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/media/emb_slide_kard2.html



Εικόνα 25. Υποχώρηση
του παλιού
καταστρώματος από την



Εικόνα 26. Υποχώρηση
του παλιού
καταστρώματος από την

3.3.4 Περιπτώσεις διάβρωσης του εδάφους, περιπτώσεις από τον Νομό Καρδίτσας

Α' Διάβρωση όχθης ποταμού (Χειμώνας 2003-2004)²⁴

Έγινε το χειμώνα 2003-2004 όταν το ποτάμι είχε πολλή μεγάλη παροχή και λόγω των φερτών υλικών έκλεισε μερικώς η κοίτη οπότε το νερό έπεφτε με ορμή στο πρανές. Για υποτυπώδη προστασία, έγινε απόθεση αμμοχάλικου. Στο παρελθόν τα νερά του ποταμού μετακίνησαν κατά 1 m περίπου τον φορέα της γέφυρας (ολίσθηση πάνω στα βάρθρα)! Τον επανέφεραν με τη βοήθεια γερανού.



Εικόνα 27. Υποχώρηση του παλιού καταστρώματος από την

²⁴ Οι φωτογραφίες παραχωρήθηκαν ευγενικά από τον κ. Δημήτριο Τσούκη, Μηχανικό της Νομαρχίας Καρδίτσας.
http://www.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/media/emb_slide_kard2.html



Εικόνα 28. Υποχώρηση του παλιού καταστρώματος από την

Β' Έκπλυση υλικού πρανούς (Δεκέμβριος 2004)²⁵

Έγινε διαπλάτυνση, οδοστρωσία και ασφαλτόστρωση του δρόμου που τελείωσε τον Οκτώβριο 2004. Τα πρανή έμειναν ακάλυπτα κι άρχισε να γίνεται έκπλυση υλικού από τη βροχή (ιλυολιθικό υλικό). Η επενδεδυμένη τάφρος που υπάρχει δεξιά, έχει καλυφθεί από τα υλικά.



Εικόνα 29. Υποχωρήσεις
εδαφικών μαζών λόγω
ισχυρής βροχόπτωσης.

²⁵ Οι φωτογραφίες παραχωρήθηκαν ευγενικά από τον κ. Δημήτριο Τσούκη, Μηχανικό της Νομαρχίας Καρδίτσας.

http://www.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/media/emb_slide_kard2.html

3.4 Αναφορές καθιζήσεων στο εξωτερικό

3.4.1 Τόκιο και Niieata Ιαπωνίας

Η πρωτεύουσα της Ιαπωνίας είναι κτισμένη στο νοτιοανατολικό τμήμα της πεδιάδας Kanto που καταλήγει στον κόλπο του Τόκιο. Η πεδιάδα αυτή αναπτύσσεται σε ένα τεκτονικό βύθισμα που έχει πληρωθεί με πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα μεγάλου πάχους και νεότερες αποθέσεις (αλλούβια και διλλούβια) με ποικίλλουσα κοκκομετρία (άργιλοι, ιλείς, άμμοι, χάλικες, μάργες κ.λ.π.) και σε αλληλουχία. Στα χονδροκοκκώδη στρώματα αναπτύσσεται υπόγεια υδροφορία υπό πίεση. Η υδροφορία αυτή αξιοποιείται από μεγάλο αριθμό βαθιών γεωτρήσεων, κυρίως ντός των τεταρτογενών αποθέσεων, καθώς γεωτρήσεων μεγαλύτερου βάθους που εκμεταλλεύονται την υδροφορία με φυσικό αέριο των βαθύτερων πλειοκαινικών στρωμάτων.

Αποτέλεσμα των υπεραντλήσεων από τις γεωτρήσεις αυτές ήταν η πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών.

Χαρακτηριστική εικόνα της πορείας της πτώσης της στάθμης δίδεται από μία βαθειά γεώτρηση (380m) στο Hongo Campus του Πανεπιστημίου του Τόκιο. Το απόλυτο υψόμετρο στη θέση της γεώτρησης αυτής είναι 16 m.

Παρατηρήσεις στάθμης υφίστανται από το 1932. Η πορεία της διακύμανσης της αντανακλά την ιστορία της Ιαπωνίας έκτοτε: Με τη στασιμότητα της οικονομίας κατά το 2° Παγκόσμιο πόλεμο, οι αντλούμενες ποσότητες υπόγειων νερών ελαττώθηκαν (το 50% των αντλούμενων νερών χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία) και η στάθμη των υπόγειων νερών σταθεροποιήθηκε και στη συνέχεια ανυψώθηκε. Από το 1948 άρχισε εκ νέου να υποβιβάζεται λόγω υπεραντλήσεων κατά την μεταπολεμική επανοικοδόμηση. Κατά την περίοδο της υψηλής οικονομικής ανάπτυξης, της δεκαετίας του 60, η πτώση της στάθμης μεγιστοποιήθηκε και συνεχίστηκε με μικρότερο ρυθμό την επόμενη

10ετία. Στο τέλος του 1971 η στάθμη βρισκόταν 36m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και είχε συνολικά υποβιβαστεί από το 1932 κατά 39m. Παρατηρήσεις σ' ένα δίκτυο πιεζομετρικών έδειξε ότι η πτώση στάθμης έφθασε μέχρι και 60m. κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (μέση στάθμη παλίρροιας στον κόλπο του Τόκιο).

Τοπογραφικές αποτυπώσεις που γίνονται στο Τόκιο από το 1892, έδειξαν ότι κατά την περίοδο 1918 - 1980 πραγματοποιήθηκαν καθιζήσεις που έφθασαν μέχρι και 4,57m. Εξαιτίας αυτών έλαβαν χώρα θραύσεις - ρωγματώσεις οδών, κτιρίων, αποστραγγιστικών και αποχευτικών καναλιών,

υπόγειων σωληνώσεων κ.α., καθώς και εξωθήσεων - ανυψώσεων των σωληνώσεων των γεωτρήσεων, διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των θεμελιώσεων σε πασσάλους, σταμάτημα της αρτεσιανής εκροής στην επιφάνεια του εδάφους, αποξήρανση των αβαθών υδροληπτικών έργων, διείσδυση της θάλασσας στα υδροφόρα στρώματα κ.τ.λ.

Την κύρια αιτία των καθιζήσεων αυτών αποτελούν οι υπεραντλήσεις από τα υδροφόρα χαλαρά ιζήματα και η εξαιτίας αυτών σημαντική ελάττωση του πιεζομετρικού φορτίου, που οδήγησε στη στερεοποίηση των μαλακών υπεδαφικών υλικών. Κατά τη 10ετία του 60 οι αντλούμενες ποσότητες ήταν πολύ μεγαλύτερες της φυσικής επανατροφοδοσίας των υδροφόρων στρωμάτων. Το 1971 είχαν φθάσει στα διάφορα διαμερίσματα του Τόκιο τα 860.000 m³ ημερησίως.

Εξαιτίας των αρνητικών επιπτώσεων που έλαβαν χώρα, ελήφθησαν μία σειρά από νομοθετικά μέτρα που αποσκοπούσαν στην ελάττωση των αντλήσεων. Με την βοήθεια των μέτρων αυτών το 1973 οι ποσότητες υπόγειου νερού που αντλήθηκαν από 27 διαμερίσματα του Τόκιο μειώθηκαν στα 556.000 m³ ημερησίως και το 1989 στα 600.000 m³ ημερησίως από ολόκληρο το μητροπολιτικό Τόκιο. Η μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων είχε ως άμεσο αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών και το σταμάτημα των καθιζήσεων το 1972-73 όπου οι αντλήσεις ελαττώθηκαν και στα 27 διαμερίσματα του

Τόκιο. Το 1975 παρατηρήθηκε μάλιστα και μικρή ανύψωση του εδάφους σε περιοχές που είχαν υποστεί καθιζήσεις. Η ελάττωση των αντλήσεων και η ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών, αποτελούν το αποτέλεσμα της συνδυασμένης εφαρμογής δύο νόμων του 1972, που αφορούν ρυθμίσεις σχετικές με τα υπόγεια νερά και τη χρήση τους στη βιομηχανία και στις οικιακές-αστικές ανάγκες. Όσες τοπικές αρχές είχαν αξιοποιήσει ικανοποιητικά τις δυνατότητες που δίδουν οι νόμοι αυτοί, είχαν καλά αποτελέσματα, όπως το Τόκιο όπου οι καθιζήσεις σταμάτησαν. Στις γειτονικές εφραπτόμενες του Τόκιο περιοχές όμως όπου αυτό δεν έγινε κατορθωτό, οι καθιζήσεις συνεχίζονται (Saitama, Chiba, Ibaraki). Στο Τόκιο για την προστασία από τις συνέπειες των καθιζήσεων έχουν κατασκευαστεί προστατευτικά αναχώματα, αντλιοστάσια για την αποστράγγιση και άλλα έργα. Πέραν από τις δυνατότητες που δίδουν οι ως άνω νόμοι, στο Τόκιο ειδικά, ένας μητροπολικός νόμος για τα υπόγεια νερά έδωσε περισσότερες δυνατότητες παρεμβάσεων για την προστασία τους και την θωράκιση της πόλης από δευτερογενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Μεταξύ των μέτρων που ελήφθησαν με βάση τους νόμους αυτούς περιλαμβάνονται:

- Απαγόρευση από το 1961 κατασκευής νέων γεωτρήσεων στη νότια χαμηλή ζώνη των αλλουβιακών αποθέσεων και από το 1963 και στην υπόλοιπη έκταση των άλλου βίων,
- Περιορισμός των αντλήσεων από το 1966 στις υπάρχουσες γεωτρήσεις των περιοχών αυτών,
- Παύση των αντλήσεων των υπόγειων νερών που περιείχαν φυσικά αέρια.

Το 1972 οι δημόσιες αρχές του Τόκιο εξαγόρασαν τα «μεταλλευτικά» δικαιώματα για την εκμετάλλευση των υπόγειων νερών που περιέχουν φυσικά αέρια και σταμάτησαν τις αντλήσεις από τις βαθιές γεωτρήσεις (400-2000 m) στα πλειο-πλειστοκαινικά στρώματα. Οι υδατικές ανάγκες της πόλης μετά την ελάττωση των αντλήσεων, καλύφθηκαν με νερά του ποταμού Tone, στον άνω ρου του οποίου κατασκευάστηκε μεγάλο φράγμα. Παρόμοια με το Τόκιο φαινόμενα καθιζήσεων, λόγω υπεραντλήσεων υπόγειων νερών, έχουν λάβει χώρα και στη πεδιάδα Niigata η οποία αποτελεί την μεγαλύτερη παραλιακή πεδινή ζώνη κατά μήκος των ακτών της Ιαπωνικής θάλασσας. Στο υπέδαφος της τα υδροφόρα στρώματα περιέχουν φυσικά αέρια, η εκμετάλλευση των οποίων με αντλήσεις των υπόγειων νερών άρχισε από τις αρχές του αιώνα, αυξανόμενες χρόνο με το χρόνο. Οι υπεραντλήσεις, που έφθασαν το 1958 τις 624.000 m³ ημερησίως, προκάλεσαν πτώσεις στάθμης των υπόγειων νερών μέχρι και 50m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Εξ αιτίας αυτού άρχισαν να εκδηλώνονται καθιζήσεις. Αρχικά οι καθιζήσεις αυτές στην ομώνυμη πόλη Niigata ήταν μικρές (2 - 6 mm ετησίως). Γύρω στο 1951 αυξήθηκαν σημαντικά (30-40 mm ετησίως) και έφθασαν την μεγαλύτερη ετήσια τιμή τους 0,54m το 1960. Μεταξύ 1959 και 1974 μία μεγάλης έκτασης παραλιακή ζώνη, μήκους περί τα 30 km και πλάτους από 5 έως 25 km, υπέστη συνολική καθίζηση από 0,5m έως και άνω των 2m. Για την αντιμετώπιση της κατάστασης άρχισαν από το 1959 να λαμβάνονται μέτρα περιορισμού των αντλήσεων. Τη χρονιά αυτή σταμάτησαν τις αντλήσεις σε 60 παραγωγικές γεωτρήσεις. Χρόνο με το χρόνο μείωναν τις αντλήσεις και ως το 1968 σταμάτησαν όλες (450) τις παραγωγικές – εμπορικές γεωτρήσεις αξιοποίησης των φυσικών αερίων. Με τα μέτρα αυτά η στάθμη των υπόγειων νερών άρχισε να αποκαθίσταται και οι καθιζήσεις ελαττώθηκαν δραστικά.

3.4.2 Μιλάνο

Από το 1950 έχει εγκατασταθεί ένα δίκτυο για ακριβείς μετρήσεις του υψομέτρου της επιφάνειας του εδάφους (89 km κύριες γραμμές και 255 km δευτερεύουσες) το οποίο αργότερα συμπληρώθηκε και το 1972 έφθασε συνολικά 350 km μήκος. Με τη βοήθεια των μετρήσεων διαπιστώθηκε το μέγεθος των καθιζήσεων και ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιούνται. Διατυπώθηκε η υπόθεση ότι ένα μέρος τουλάχιστο των καθιζήσεων οφείλεται σε υπεραντλήσεις των υπόγειων νερών. Για να διαπιστωθεί αν πράγματι συμβαίνει αυτό οι Δημοτικές αρχές του Μιλάνου έκλεισαν τις αρτεσιανές γεωτρήσεις του κέντρου της πόλης.

Μια νέα σειρά μετρήσεων το 1986 απέδειξε ότι ο ρυθμός των καθιζήσεων ελαττώθηκε σημαντικά, γεγονός που αποδεικνύει τη σχέση της αφαίρεσης νερού από το υπέδαφος με τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

3.4.3 Σουηδία

Οι καθιζήσεις που έχουν καταγραφεί στη Σουηδία έχουν σαν βάση τις ειδικές γεωλογικές συνθήκες που δημιουργήθηκαν κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο. Μεγάλες εκτάσεις καλύπτονται από κανονικά στερεοποιημένες παγετώδεις και μεταπαγετώδεις αποθέσεις αργίλων, οι οποίες υπέρκεινται κοκκωδών υδροπερατών και υδροφόρων υλικών. Οι μεταπαγετώδεις αργιλικές αποθέσεις είναι συχνά οργανικές και κατά συνέπεια υψηλής συμπιεστότητας. Το υπόβαθρο όλων αυτών των υλικών αποτελείται από γρανίτες και γνευσίους που έχουν προσβληθεί από συστήματα διακάσεων και ζώνες διάρρηξης.

Κάτω από τέτοιες γεωλογικές συνθήκες, όταν για διάφορους λόγους προκαλείται πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών στα υποκείμενα των αργίλων υδροφόρα κοκκώδη υλικά, ή στους υδροφόρους των ρωγμών και διαρρήξεων του βραχώδους υποβάθρου, προκαλείται ελάττωση του υδραυλικού φορτίου των υπόγειων νερών. Εξαιτίας τούτου αρχίζει μια διαδικασία στερεοποίησης των υπερκειμένων αργίλων που οδηγεί σε καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από την πτώση του υδραυλικού φορτίου.

Έχει διαπιστωθεί ότι ο κυριότερος λόγος των καθιζήσεων στη Σουηδία είναι -η πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών στα υδροπερατά κοκκώδη υλικά που υπόκεινται των αργίλων.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που καταδεικνύει την μεγάλη σημασία, σε σχέση με τις καθιζήσεις, της ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων, που δεν συνδέονται αναγκαστικά με αντλήσεις μεγάλων ποσοτήτων υπόγειων νερών, αφορά την πόλη Norrköping. Πρόκειται για καθιζήσεις που διαπιστώθηκαν και μελετήθηκαν το 1977 και οφείλονται σε αντλήσεις από τρία πηγάδια. Το ένα από αυτά αντλείτο από το 1913 με παροχή 5 m³/h και τα άλλα δύο από το 1943 με 3 και 11 m³/h αντίστοιχα, με πολύ μικρές δηλαδή παροχές.

Η πτώση στάθμης από τις αντλήσεις των τριών αυτών πηγαδιών προκάλεσε μία πτώση του υδραυλικού φορτίου κατά 8 - 9m σε στρώμα άμμου - αμμοχάλικων πάχους περί το 1 m, το οποίο υπόκειται, στην περιοχή των καθιζήσεων, μαλακών οργανικών αργίλων πάχους 12 - 14 m. Αποτέλεσμα της ελάττωσης αυτής του υδραυλικού φορτίου εξαιτίας των αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε 30 χρόνια, υπήρξε η πρόκληση καθιζήσεων περίπου 1 m σε μία μεγάλη έκταση στα μέσα της 10ετίας του 1970, με συνέπειες σοβαρές αστοχίες σε οικοδομές θεμελιωμένες σε πασσάλους.

3.4.4 Κόμο

Οι καθιζήσεις διαπιστώθηκαν το 1974 όταν εμφανίστηκαν θραύσεις κτιρίων, κυρίως στο τμήμα της κοιλάδας στην προέκταση της ομώνυμης λίμνης προς τα νοτιοανατολικά. Από τις μετρήσεις στάθμης εδάφους που έγιναν και τις συγκρίσεις με μετρήσεις του 1955, διαπιστώθηκαν καθιζήσεις μερικών δεκάτων του μέτρου στο τμήμα της παλιάς πόλης και σχεδόν 1 m κοντά στη λίμνη.

Εισαγωγή

Αντικείμενο μελέτης του κεφαλαίου θα αποτελέσει η ανάλυση, ενός **δευτερογενούς φαινομένου** του σεισμού, του φαινομένου της ρευστοποίησης. Το φαινόμενο της²⁶ ρευστοποίησης εδαφών εκδηλώνεται κυρίως κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων με αποτέλεσμα να προξενούνται σημαντικές καταστροφές στις κατασκευές και γενικότερα στα τεχνικά έργα, τα οποία είναι θεμελιωμένα στους συγκεκριμένους χαλαρούς κοκκώδεις σχηματισμούς. Κατά τη ρευστοποίηση, τα εδαφικά υλικά και κυρίως άμμοι, ιλύς και χάλικες λόγω της ανάπτυξης υψηλών τιμών πίεσης του νερού, υποβάλλονται σε διατμητικές ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, με αποτέλεσμα να προκαλείτε πλήρης απώλεια της διατμητικής τους αντοχή και αποκτούν συμπεριφορά βαρέως υγρού

Η διατμητική αντοχή είναι ως γνωστό $\tau = C + (\sigma - u)\epsilon\phi\phi$ όταν υπάρχει πίεση πόρων. Η τάση σ γίνεται ενεργός, δηλ. $\sigma - u$, όπου u η πίεση των πόρων. Όταν λοιπόν η πίεση αυξηθεί τόσο ώστε να γίνει ίση με τη u , η ορθή τάση μηδενίζεται. Εφ'όσον είναι μηδέν και η συνοχή c , καθώς το φαινόμενο παρατηρείται στα χοντρόκοκκα εδάφη, τότε η διατμητική αντοχή μηδενίζεται και γι'αυτό το έδαφος συμπεριφέρεται σαν ρευστό.

²⁶ SEED, 1979

Φαινόμενα ρευστοποίησης²⁷ συνήθως εμφανίζονται σε περιοχές όπου είχαν παρατηρηθεί και στο παρελθόν όταν παραμένουν αμετάβλητες οι εδαφικές και υδρογεωλογικές συνθήκες.²⁸ Συνεπώς η μελέτη της ιστορικής σεισμικότητας μιας περιοχής μπορεί να αποτελέσει το πρώτο εργαλείο για την αναγνώριση περιοχών με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση.

Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$).



αυτά η επιστημονική κοινότητα δεν εστίασε στη μελέτη των φαινομένων καθώς δεν προκαλούσαν μεγάλης κλίμακας εδαφικές παραμορφώσεις όπως άλλα δευτερογενή

φαινόμενα, για παράδειγμα οι κατολισθήσεις. Ορόσημο για την συστηματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης, ουσιαστικά αποτέλεσαν οι δύο σεισμικές δονήσεις στην Niigata (Ιαπωνία) και στην Αλάσκα (Η.Π.Α) το 1964.

²⁷ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ 14/08/03 Παπαθανασίου Γ. , Παυλίδης Σπ., Χρηστάρας Β., και Πιπιάκης Κ. Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

²⁸ Youd 1984

Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, η ρευστοποίηση των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών προκάλεσε μεγάλης κλίμακας αστοχίες σε κατασκευές τόσο στην πόλη της Niigata όσο και στην πόλη



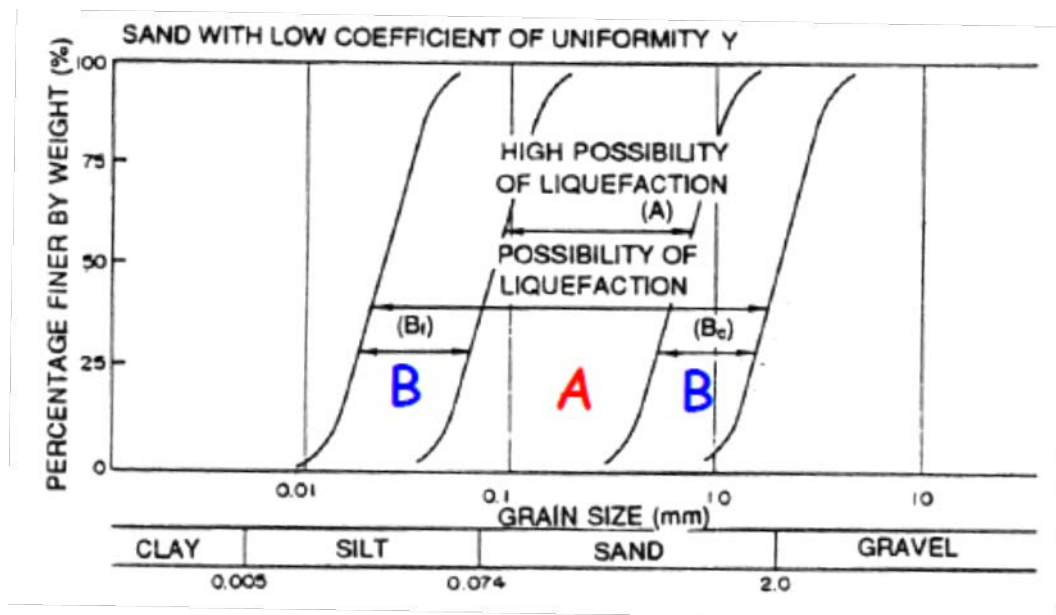
Εικόνα 29. Αποτελέσματα της ρευστοποίησης του εδάφους σε κατασκευές της πόλης Niigata της Ιαπωνίας, λόγω του σεισμού της 16^{ης} Ιουνίου 1964 με μέγεθος $M=7.5$ ²⁹

Στην Ελλάδα δεν έχουν σημειωθεί έως τώρα ανάλογης κλίμακας καταστροφές λόγω ρευστοποίησης. Συνήθως παρατηρούνται μικρού μεγέθους εδαφικές αστοχίες, κυρίως ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού και/ή δημιουργία κώνων άμμου, και μικρής κλίμακας κατασκευαστικές αστοχίες όπως καθιζήσεις προβλητών ή γεφυρών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πρόκλησης αστοχιών λόγω ρευστοποίησης στην Ελλάδα αποτελεί η σεισμική δόνηση (M_s 6.4) στην Λευκάδα στις 14 Αυγούστου 2003. Αυτός ο σεισμός προκάλεσε μικρής κλίμακας καθιζήσεις στην πόλη της Λευκάδας, ενώ κώνοι άμμου δημιουργήθηκαν στην παραλιακή ζώνη του Νυδρί και στη Βασιλική. Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην μελέτη αυτών των αστοχιών καθώς αποτέλεσαν άμεσα παραδείγματα ρευστοποίησης τουλάχιστον για τον ελληνικό χώρο.

²⁹ SteinbruggeCollection, E.E.R.C., University of California, Berkeley

4.1 Ρευστοποιήσιμα Εδάφη³⁰

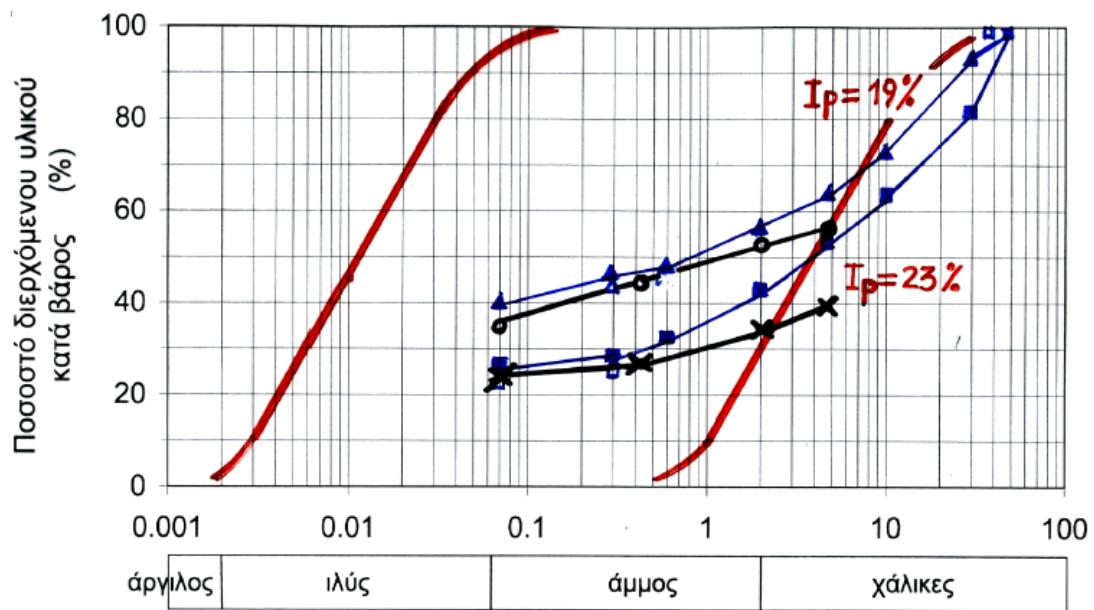
Το φαινόμενο της ρευστοποίησης υπάρχει κίνδυνος να εμφανιστεί σε χαλαρές και λεπτές άμμοι, οι ιλυώδεις άμμοι και οι αμμώδεις ιλύς καθώς και οι άμμοι με ποσοστά λεπτόκοκκων. Στις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που παραθέτονται στη ζώνη Α περιλαμβάνονται τα κατεξοχήν ρευστοποιημένα εδάφη, και στη ζώνη Β τα πιθανώς (πιο δύσκολα) ρευστοποιημένα εδάφη.



Εικόνα 30. Στις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που παραθέτονται στη ζώνη Α περιλαμβάνονται τα κατεξοχήν ρευστοποιημένα εδάφη, και στη ζώνη Β τα πιθανώς (πιο δύσκολα) ρευστοποιημένα εδάφη.

³⁰ <http://www.mechanikos.gr/showthread.php?p=126629>

Η ρευστοποίηση εδάφους παρατηρείται αρκετές φορές κυρίως σε αμμώδη εδάφη, τα οποία είναι κορεσμένα με νερό, και οφείλεται στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων λόγω του σεισμού. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της τριβής μεταξύ των κόκκων του υλικού, έτσι ώστε αυτό να συμπεριφέρεται ως ρευστό. Έτσι, οι κατασκευές σε τέτοιες περιοχές υφίστανται σημαντικές βλάβες λόγω μερικής βύθισης, κλίσης, κλπ.



Εικόνα 31. Καλό διαβαθμισμένο αργιλικό έδαφος

4.2 Συνέπειες Ρευστοποίησης σε Τεχνικά Έργα

Στη διεθνή βιβλιογραφία ³¹αναφέρονται τέσσερις κατηγορίες εδαφικών παραμορφώσεων λόγω ρευστοποίησης, με αντίστοιχους μηχανισμούς γένεσης:

- πλευρική μετατόπιση (lateral spreading),
- καθίζηση (settlement),
- εδαφική ταλάντωση (ground oscillation)
- εδαφική ροή (flow failure).

Οι πρώτες τρεις προκαλούνται λόγω ανακυκλικής κινητικότητας (cyclic mobility) και δημιουργούν μετατοπίσεις μικρού έως μεσαίου μεγέθους ενώ η τέταρτη δημιουργείται κυρίως λόγω βαρυτικών δυνάμεων και προκαλεί μεγάλης μεγέθους αστοχίες εδαφικής ροής (flow failures)³² . Αποτελέσματα των παραμορφώσεων που επηρεάζουν τεχνικά έργα είναι :

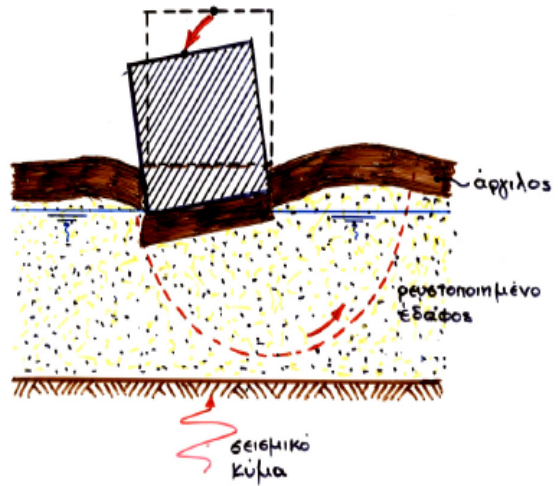
- Η Αστοχία Θεμελιώσεων,
- Η Ανάδυση Υπόγειων Κατασκευών
- Η Αστοχία Φυσικών η Τεχνητών Πρανών
- Πλευρική Οριζόντια Εξάπλωση
- Αστοχία Λιμενικών Κρηπιδότοιχων

³¹ Bartlett και Youd, 1992; Kramer, 1996; Cooke και Mitchell, 1999

³² Kramer, 1996

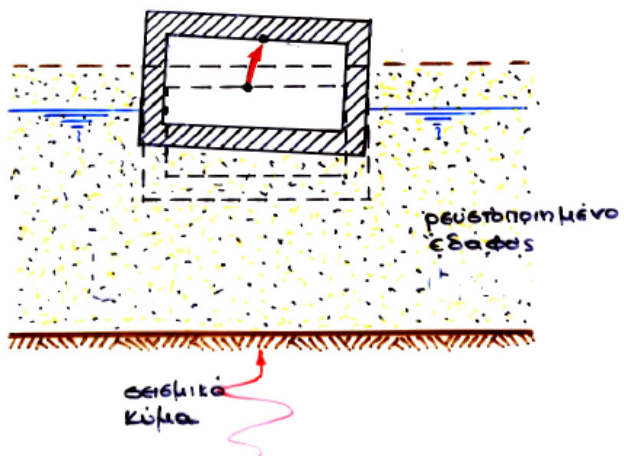
4.2.1 Αστοχία Θεμελιώσεων

Εικόνα 32. Το έδαφος αστοχεί ξαφνικά όταν η το έδαφος κάτω απο την θεμελίωση εκτοπίζει τις παρακείμενες εδαφικές ζώνες. Παράδειγμα εμφάνισης του φαινομένου αποτέλεσαν τα αποτελέσματα του σεισμού της πόλης Niigata της Ιαπωνίας.



Εικόνα 33. Κατά το φαινόμενο της ρευστοποίησης το κτίριο ανατράπηκε στο σύνολο του.

4.2.2 Ανάδυση Υπόγειων Κατασκευών



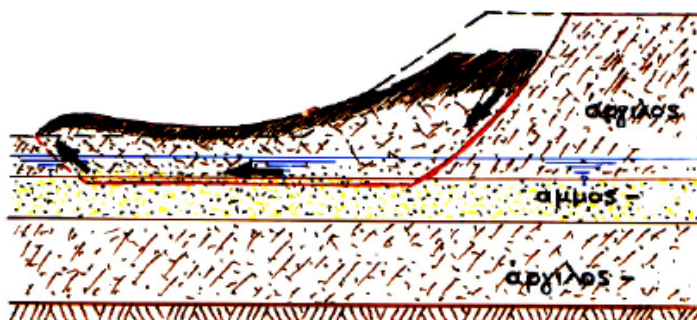
Εικόνα 34. Σχεδιαστική απεικόνιση του φαινομένου



Εικόνα 35. Hokkaido Japan 2003

4.2.3 Αστοχία Φυσικών ή Τεχνητών Πρανών³³

Η σεισμική δόνηση μπορεί να προκαλέσει, εκτός από την πλευρική παραμόρφωση του εδαφικού σχηματισμού, τη συμπύκνωση και κατά συνέπεια τη μεταβολή του όγκου του. Αυτή η μεταβολή επιφέρει καθίζηση, δηλαδή παραμόρφωση κατακόρυφης διεύθυνσης της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την αστοχία κατασκευών με επιφανειακές θεμελιώσεις και δικτύων κοινής ωφέλειας, τοποθετημένα σε μικρό βάθος. Όσον αφορά τις ξηρές άμμους, αυτές παρουσιάζουν ταχύτερη συμπύκνωση από την αντίστοιχη των κορεσμένων, η οποία συνήθως ολοκληρώνεται με το τέλος της σεισμικής φόρτισης (Kramer, 1996). Στις κορεσμένες άμμους, το αντίστοιχο χρονικό διάστημα συμπύκνωσης, εξαρτάται τόσο από τη διαπερατότητα και τη δυνατότητα συμπύκνωσης αυτών (σχετική πυκνότητα) όσο και από το μέγεθος της υπερπίεσης πόρων η οποία δημιουργείται από το σεισμό.

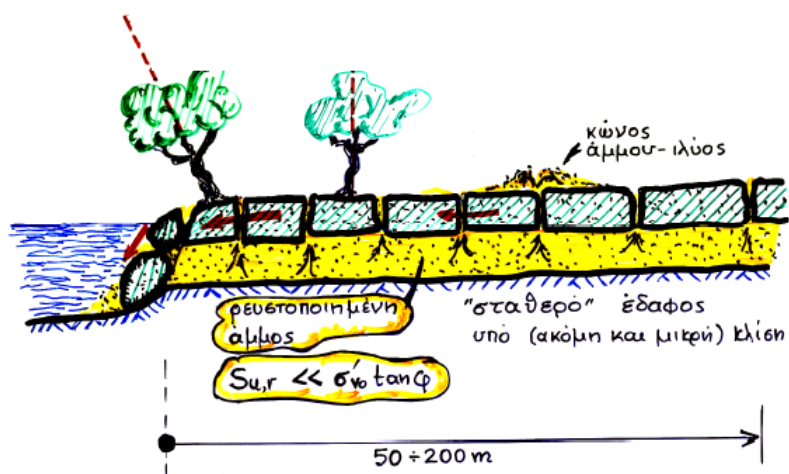


Εικόνα 36. Οι ξηρές άμμους, παρουσιάζουν ταχύτερη συμπύκνωση από την αντίστοιχη των κορεσμένων

³³ <http://users.auth.gr/~gpapatha/phd/chapter4.pdf>

4.2.4 Πλευρική Οριζόντια Εξάπλωση ³⁴

Πλευρικές μετατοπίσεις δημιουργούνται λόγω ολισθητικών κινήσεων υπερκείμενων εδαφικών σχηματισμών πάνω σε ρευστοποιημένα στρώματα είτε προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, σε πρανή με κλίση μικρότερη των τριών μοιρών (Youd και Garris, 1995), είτε προς την κατεύθυνση ελεύθερης όψης, όπως σε θέσεις αναχωμάτων ποταμών (Kramer, 1996). Οι κινήσεις αυτές λαμβάνουν χώρα όταν η αντοχή του ρευστοποιήσιμου σχηματισμού δεν αρκεί για να αντισταθμίσει τις πλευρικές δυνάμεις οι οποίες ενεργούν στο υπερκείμενο μη ρευστοποιήσιμο επιφανειακό στρώμα. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας δημιουργεί συνήθως σχισμές και ρωγμές στο επιφανειακό στρώμα, οι οποίες είναι πιθανό να προκαλέσουν το διαχωρισμό του σε διακριτά τμήματα, καθώς επίσης και την συμπίεση και κατά συνέπεια την κάμψη του εδάφους στον πόδα του πρανού. Οι σχισμές αυτές ορισμένες φορές γεμίζουν με νερό και άμμο, προερχόμενα από το υποκείμενο ρευστοποιημένο εδαφικό σχηματισμό ³⁵



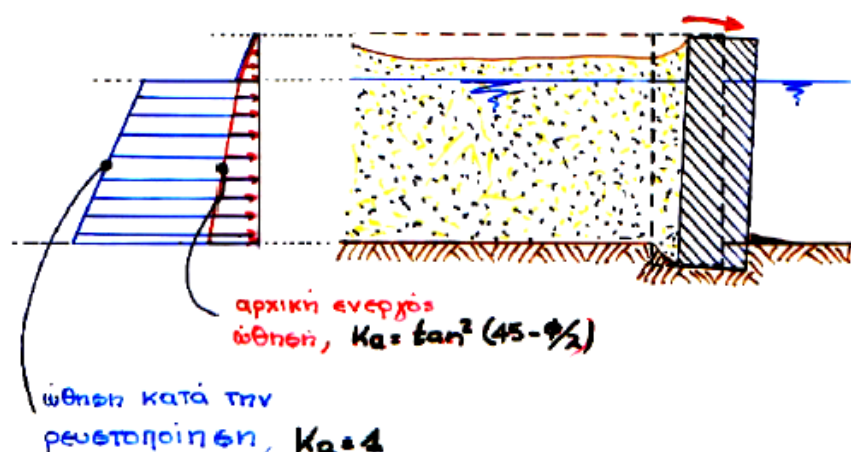
Εικόνα 37. Σχεδιαστική απεικόνιση του φαινομένου

³⁴ Kramer, 1996; Cooke και Mitchell, 1999

³⁵ Obermeier et al., 2005

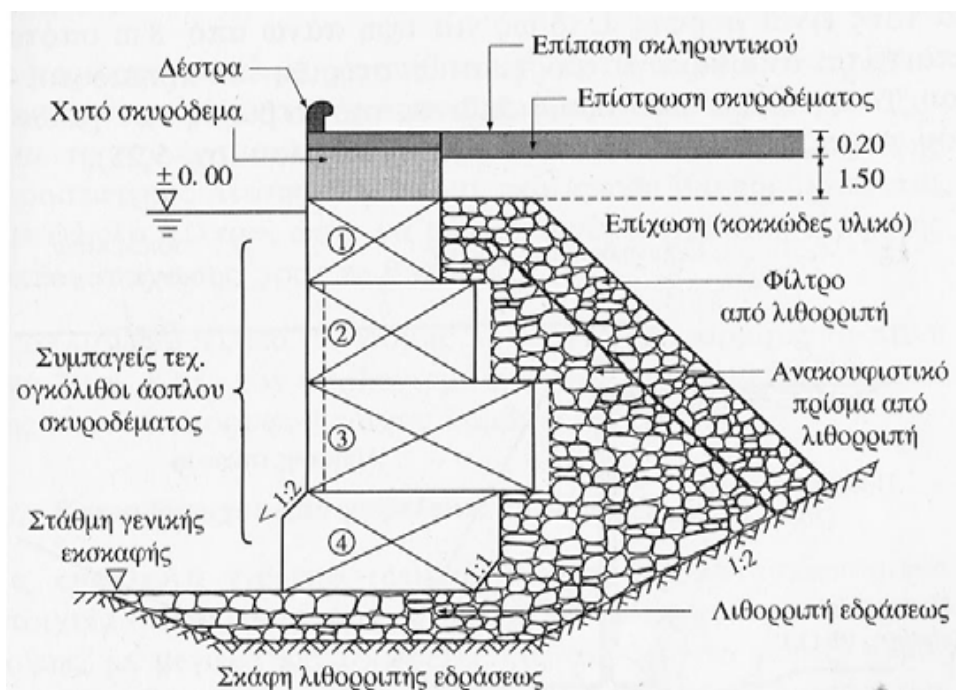
4.2.5 Αστοχία Λιμενικών Κρηπιδότοιχων

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κρηπιδότοιχων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθότι μετά από μία ισχυρή σεισμική δόνηση, είναι πιθανό η επικοινωνία της πληγείσας περιοχής για την παροχή άμεσης βοήθειας και τη μετέπειτα οργάνωσή της να μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο ή κυρίως με πλωτά μέσα. Ειδικότερα στην περίπτωση των νησιών, το ενδεχόμενο αποκλεισμού τους από τον ηπειρωτικό χώρο μπορεί να προκαλέσει δυσάρεστες συνέπειες στην αρωγή του πληθυσμού και στην οικονομία τους. Όπως είναι φανερό, η ανάγκη για διατήρηση της λειτουργικότητας ενός ελάχιστου αριθμού θέσεων εξυπηρέτησης σκαφών μετά από ένα σεισμό είναι επιτακτική.



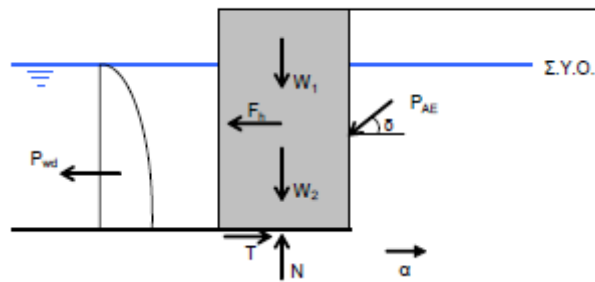
Εικόνα 38. Η εν λόγω λειτουργικότητα εξαρτάται κυρίως από την παραμένουσα μετατόπιση του κρηπιδότοιχου. Γίνεται επομένως φανερή η σπουδαιότητα διερεύνησης της παραμέτρου αυτής ως βασικής συνιστώσας της σεισμικής απόκρισης των κρηπιδότοιχων.

Για την περίπτωση των μονολιθικών κρηπιδότοιχων (τύπου caisson), έχουν διατυπωθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της παραμένουσας μετατόπισης μέσω απλουστευτικών εμπειρικών εκφράσεων (π.χ. Richards & Elms, 1979, Whitman & Liao, 1985, Yegian et al, 1991). Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί δυναμικές αναλύσεις οι οποίες αποτελούν έναν πιο αξιόπιστο τρόπο μελέτης. Από την άλλη πλευρά, οι σπονδυλωτοί κρηπιδότοιχοι, οι οποίοι αποτελούν το συνήθη τρόπο κατασκευής στον ελλαδικό χώρο, δεν έχουν εξεταστεί επαρκώς. Συγκεκριμένα, για τον απλουστευτικό υπολογισμό των μετατοπίσεων τους χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω ενώ στην περίπτωση διεξαγωγής δυναμικής ανάλυσης θεωρούνται ως μονολιθικοί (π.χ. Pitilakis & Moutsakis, 1989, Γκαζέτας κ.ά., 2006).



Εικόνα 39. Τυπική διατομή κρηπιδότοιχου ³⁶

³⁶ Μέμος 2002



Εικόνα 40. Ασκούμενες δυνάμεις σε κρηπιδότοιχο βαρύτητας κατά την ενεργητική κατάσταση υπό οριζόντια σεισμική επιτάχυνση.

Όπου :

W1 : το βάρος του κρηπιδότοιχου που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη ύδατος,

W2 : το υπό άνωση βάρος του κρηπιδότοιχου ,

W : το βάρος (στον αέρα) του κρηπιδότοιχου,

Pwd : η συνισταμένη υδροδυναμική πίεση λόγω σεισμού,

PAE η δυναμική ενεργητική ώθηση γαιών,

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ,

φb : η γωνία τριβής σκυροδέματος-λιθορριπής έδρασης,

δ : η γωνία τριβής εσωτερικής παρειάς τοίχου-αντιστηριζόμενου εδάφους.

4.3 Μέθοδοι μείωσης του φορτίου

η επιβολή φορτίων στο έδαφος ή η μείωση των ήδη επιβεβλημένων φορτίων δημιουργούν συνθήκες επιβολής νέων φορτίων, τα οποία και αναλαμβάνονται από τις εδαφικές μάζες με την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά τρόπον ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας σε όλα τα εδαφικά στοιχεία και συνεπώς το σύστημα κατασκευή-έδαφος να ισορροπεί. Η εκτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω των εξωτερικώς επιβεβλημένων φορτίων είναι χρήσιμη για τους εξής λόγους:

1. Οι ανοχές των κατασκευών σε υποχωρήσεις των σημείων στήριξης είναι περιορισμένες. Για την εκτίμηση των υποχωρήσεων είναι απαραίτητη η γνώση των παραμορφώσεων που προκαλούν στο έδαφος τα επιβεβλημένα φορτία. Οι παραμορφώσεις, όμως, εξαρτώνται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εκτίμηση των τάσεων.
2. Όλα τα υλικά αστοχούν (θραύονται), εάν η φόρτιση υπερβεί το όριο αντοχής τους. Το όριο αντοχής κάθε υλικού δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από τις υπόλοιπες τάσεις, δηλαδή αντιστοιχεί σε ορισμένους κρίσιμους συνδυασμούς τάσεων, τα λεγόμενα **κριτήρια αστοχίας**. Η γνώση των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος είναι, λοιπόν, απαραίτητη για να εκτιμηθεί κατά πόσον η υφιστάμενη εντατική κατάσταση του εδάφους προσεγγίζει την κατάσταση αστοχίας.

Στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων συμβάλλουν θετικά

- η αύξηση της κλίσης του πρσανούς,
- η εσωτερική γεωμετρία του υλικού,
- η παρουσία δομικών ασυνεχειών,
- η παρουσία αργιλικού υλικού,
- η παρουσία νερού μέσα στο έδαφος,
- η εκσκαφή στη βάση του πρσανούς,
- η φόρτιση του εδάφους

4.4 Μέθοδοι Βελτίωσης του Εδάφους

Οι μέθοδοι βελτίωσης-ενίσχυσης εδαφών που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι οι εξής:

Συμπύκνωση με δονήσεις με ή χωρίς ταυτόχρονη εκτόπιση εδαφικού υλικού. Η παρούσα μέθοδος επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητικών οδοστρωτήρων, εκρήξεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους, δονήσεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους πασσάλων συμπύκνωσης, ισχυρών κρούσεων στην επιφάνεια του εδάφους και vibroflotation.

Συμπύκνωση ή στερεοποίηση πριν από την κατασκευή Για να επιτευχθεί η μέθοδος ακολουθείται η διαδικασία προφόρτισης, υπερφόρτισης έμπηξης αμμοπασσάλων ,δυναμικής στερεοποίησης και ηλεκτρώσμωσης.

Θερμικές διεργασίες Η διαδικασία αυτή γίνεται είτε με ξήρανση ή υπερθέρμανση είτε με πάγωμα του εδάφους.

Ενίσχυση. Η μέθοδος ενίσχυσης εφαρμόζεται με προσθήκη πασσάλων ή διαφραγμάτων με επιτόπου ανάμιξη εδάφους και σταθεροποιητικό υλικού, έμπηξη χαλικοπασσάλων και με όπλιση με κατάλληλα υλικά (οπλισμένο έδαφος)

Ενέσεις. Στη παρούσα μέθοδο εφαρμόζονται ενέσεις που περιέχουν κοκκώδη, χημικά διαλύματα, ενέσεις εκτόπισης εδαφικού υλικού και ηλεκτροκίνητα φαινόμενα.

Διάφορες άλλες μέθοδοι. Επιπλέον η αντικατάσταση εδάφους με άλλο ή χωρίς προσμίξεις , η χρήση γεωσυνθετικών υλικών (γεωυφάσματα, γεωπλέγματα, γεωμεμβράνες και γεωσύνθετα), φραγμός υγρασίας, προύγρανση, και φέρων επίχωμα.

4.5 Αναφορές του φαινομένου της ρευστοποίησης στην Ελλάδα

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ 14 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2003

Στις 14 Αυγούστου 2003 σημειώθηκε ισχυρή σεισμική δόνηση στο θαλάσσιο χώρο δυτικά της Λευκάδος μεγέθους $M_s=6.4$ και εστιακού βάθους 10 Km.

Την κύρια δόνηση ακολούθησαν 17 μετασεισμοί με μέγεθος $M_L = 4.0 - 5.4$ μέχρι τις 31 Αυγούστου και 324 σεισμικά γεγονότα μικρότερου μεγέθους. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός ($M_s=5.7$) σημειώθηκε το απόγευμα της ίδιας ημέρας λίγες ώρες μετά τον κύριο σεισμό.

Η Λευκάδα έχει υποστεί αρκετές ζημιές από ισχυρούς σεισμούς στο παρελθόν. Μελετώντας την ιστορική της σεισμικότητα διαπιστώνουμε τουλάχιστον 5 περιπτώσεις σεισμικών γεγονότων, τα οποία προκάλεσαν παρόμοια δευτερογενή φαινόμενα στο νησί.

Ημερομηνία	Επικεντρική περιοχή	M_s	Περιοχή πιθανής ρευστοποίησης	Περιγραφή
21 Δεκεμβρίου 1820	Λευκάδα	6,4	Πόλη Λευκάδας	Καθίζηση της κεντρικής πλατείας
24 Μαΐου 1911	Λευκάδα	5,3	Πόλη Λευκάδας	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα 150m μήκος και 5cm πλάτος
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Πόλη Λευκάδας	Ζημιές σε κτίρια στο λιμάνι της πόλης
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Νυδρί	Καθίζηση προβλήτας
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Πευκούλια	Κρατήρες άμμου
22 Απριλίου 1948	Λευκάδα	6,5	Βασιλική	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα, 40m μήκος και 5cm πλάτος
30 Ιουνίου 1948	Λευκάδα	6,4	Πόλη Λευκάδας	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα, 150m μήκος και 12cm πλάτος. Καθίζηση 12cm
30 Ιουνίου 1948	Λευκάδα	6,4	Πευκούλια	Κρατήρες άμμου

Πίνακας 2. Σύνδεση δεδομένων ιστορικής σεισμικότητας με πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης στο νησί της Λευκάδας.

Αστοχίες τεχνικών έργων

Ο σεισμός της 14 Αυγούστου προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε όλο το νησί της Λευκάδας. Σημαντικός αριθμός καταπτώσεων και κατολισθήσεων εντοπίζεται τόσο κατά μήκος του δυτικού άξονα του νησιού αλλά και στο ανατολικό τμήμα με μικρότερες επιπτώσεις. Επίσης σημαντικές αστοχίες παρατηρήθηκαν και στα λιμάνια του νησιού. Οι βλάβες στα λιμενικά έργα κατανέμονται χωρικά στο ανατολικό, βόρειο και νότιο τμήμα του νησιού. Στην πόλη της Λευκάδας παρατηρήθηκαν οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές κρηπιδότοιχων καθώς και βυθίσεις υλικού επίχωσης πίσω από τους κρηπιδότοιχους.



Εικόνα 41. Σημαντικές βλάβες υπέστη τόσο η πλωτή γέφυρα που συνδέει την Λευκάδα με την Δυτ. Στερεά Ελλάδα όσο και ο διάυλος που οδηγεί στην πόλη της Λευκάδας όπου παρατηρήθηκαν δυναμικές διαφορικές καθιζήσεις



Εικόνα 42. Καθίζηση υλικού επίχωσης. Οδός Γκολέμη.



Εικόνα 43. Ρωγμές πίσω από τον κρηπιδότοιχο.



Εικόνα 44. Βύθιση και στροφή του κρηπιδώματος.



Εικόνα 45. Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού.



Εικόνα 46. Δημιουργία κώνου άμμου.



Εικόνα 47. Μαρίνα Λευκάδας. Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού.



Εικόνα 48. Parking Λευκάδας: Δημιουργία πίδακα.

4.6 Αναφορές του φαινομένου της ρευστοποίησης στο Εξωτερικό

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.



Εικόνα 49. Hokkaido Japan 2003, καθίζηση οδοστρώματος



Εικόνα 50. Kocaeli Turkey 1999. Μέγεθος σεισμού 7.4



Εικόνα 51. Chi-Chi Taiwan 1999. Μέγεθος σεισμού 7.6



Εικόνα 52. Πλήρης ανατροπή του κτιρίου σε σεισμό στη Τουρκία



Εικόνα 53. Καθίζηση οδοστρώματος



Εικόνα 54. Πλήρης ανατροπή του κτιρίου σε σεισμό στη Τουρκία



Εικόνα. Απο το σεισμό στη Τουρκία



Εικόνα. Hokkaido Japan 2003

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η συμπεριφορά του εδάφους κατά τη διάρκεια δευτερογενών σεισμικών φαινομένων. Η εργασία αναπτύχθηκε σε τέσσερα κεφάλαια, εκ των οποίων τα δύο πρώτα είχαν εισαγωγικό χαρακτήρα με σκοπό να αποσαφηνίσουν δυσνόητες έννοιες για τον μέσο σπουδαστή. Μια γενική ανασκόπηση του προβλήματος και των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξα είναι.

Η παρουσία του νερού επηρεάζει την αντοχή και γενικότερα την συμπεριφορά του εδάφους και των τεχνικών έργων που εδράζονται σε αυτό. Το νερό εμφανίζεται είτε με την μορφή στατικής εδαφικής υγρασίας είτε με τη μορφή ροής που ασκεί υδροστατική πίεση στα δομικά στοιχεία. Έτσι λοιπόν η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στο έδαφος θεμελίωσης αποτελεί δυσμενή παράγοντα. Παράλληλα παράγοντας που θα επηρεάσει την επικινδυνότητα του εδάφους αποτελεί η ποιότητα του εδάφους και συγκεκριμένα το πορώδες του, υψηλά ποσοστά του οποίου συνεπάγεται και καλή διαβάθμιση υλικού. Η διατμητική αντοχή, όπως είναι αυτή που αντιστέκεται στη θραύση και/ή στην ολίσθηση του εδάφους κατά μήκος μιας επιφάνειας (επίπεδο θραύσης). Σε περίπτωση αστοχίας του εδάφους αυτή θα είναι διατμητική και θα παρουσιάζει επίπεδο ολίσθησης. Ως μοντέλο υπολογισμού της διατμητικής αντοχής του εδάφους έχει επικρατήσει το μοντέλο του Mohr – Coulomb. $\tau = C + (\sigma) \epsilon \phi$. Η παρουσία του υπόγειου νερού ελαττώνει την ενεργό τάση μεταξύ των κόκκων, μειώνει τη διατμητική αντοχή και συνεπώς την ευστάθεια των πρανών. Σαν αποτέλεσμα κινήσεις εδαφικής ύλης μπορεί να προκληθούν κατά μήκος ασυνεχειών με μεγέθη που

κυμαίνονται από επανατοποθετήσεις κόκκων μέχρι ολισθήσεις. Η διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική σε περιοχές, όπου ευρείες μεταβολές στο ύψος των βροχοπτώσεων προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στη στάθμη του υπόγειου νερού. Το νερό μειώνει τη συνοχή των γεωλογικών σχηματισμών και το συντελεστή τριβής ανάμεσα στις εφαιπτόμενες επιφάνειες με αποτέλεσμα τη μείωση της ευστάθειας των πρανών. Τα ανωτέρω σε συνδυασμό με ανθρώπινες παρεμβάσεις (πλημμελής κατασκευή τεχνικών έργων) οδηγούν σε φαινόμενα, όπως: ολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, καθίζησης, ρευστοποίησης, λασπορροών, ερπυσμούς εδαφών, κατολισθήσεων. Συγκεκριμένα η μελέτη εστίασε στη καθίζηση λόγω στερεοποίησης η οποία οφείλεται στην αποβολή του νερού των πόρων. Φαινόμενα ρευστοποίησης συνήθως εμφανίζονται σε περιοχές όπου είχαν παρατηρηθεί και στο παρελθόν όταν παραμένουν αμετάβλητες οι εδαφικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Συνεπώς η μελέτη της ιστορικής σεισμικότητας μιας περιοχής μπορεί να αποτελέσει το πρώτο εργαλείο για την αναγνώριση περιοχών με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση. Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$), ενώ στον Ελλαδικό χώρο δεν αποτελεί συχνό φαινόμενο παρά την συχνότητα των σεισμικών φαινομένων.

Συμπερασματικά η μελέτη καταλήγει πως στον τομέα της αντιμετώπισης του φαινομένου οι κύριες κατηγορίες μέτρων που διακρίνονται είναι :

Συμπύκνωση με δονήσεις με ή χωρίς ταυτόχρονη εκτόπιση εδαφικού υλικού. Η παρούσα μέθοδος επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητικών οδοστρωτήρων, εκρήξεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους, δονήσεων στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους πασσάλων συμπύκνωσης, ισχυρών κρούσεων στην επιφάνεια του εδάφους και vibroflotation.

Συμπύεση ή στερεοποίηση πριν από την κατασκευή Για να επιτευχθεί η μέθοδος ακολουθείται η διαδικασία προφόρτισης, υπερφόρτισης έμπηξης αμμοπασσάλων ,δυναμικής στερεοποίησης και ηλεκτρώσμωσης.

Θερμικές διεργασίες Η διαδικασία αυτή γίνεται είτε με ξήρανση ή υπερθέρμανση είτε με πάγωμα του εδάφους.

Ενίσχυση. Η μέθοδος ενίσχυσης εφαρμόζεται με προσθήκη πασσάλων ή διαφραγμάτων με επι τόπου ανάμιξη εδάφους και σταθεροποιητικό υλικού, έμπηξη χαλικοπασσάλων και με όπλιση με κατάλληλα υλικά (οπλισμένο έδαφος)

Ενέσεις. Στη παρούσα μέθοδο εφαρμόζονται ενέσεις που περιέχουν κοκκώδη, χημικά διαλύματα, ενέσεις εκτόπισης εδαφικού υλικού και ηλεκτροκίνητα φαινόμενα.

1. Ατματζίδης, Δ.Κ., Χρυσικός, Δ.Α., Παναγιωτίδη, Ε.Κ., Σκάρρα, Μ.Ν. (2006). "Ανάπτυξη Προκατασκευασμένου Κατακόρυφου Στραγγιστηρίου", 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τόμος 1, σελ. 481-488,
2. Barron, R.A. (1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells". Trans. ASCE 113.
3. Bowders, J., Gabr, M., Collazos, O.M., Quar-anta, J.D. (2005), "Prefabricated Vertical Drains for Enhanced In Situ Remediation". Proceedings of Geo-Frontiers 2005 Con-gress, Session on Geosynthetics Re-search and Development in Progress (GRI-18), Robert M. Koerner, George R. Koerner, Y. Grace Hsuan, Marilyn V. Ash-ley - Editors, January 24–26, 2005, Austin, Texas, USA.
4. Calabria, C.R. (2005), "The Electro-Osmotic Potential Regarding Pre-Fabricated Verti-cal Drains". Proceedings of Geo-Frontiers 2005 Congress, Session on Geosynthetics Research and Development in Progress (GRI-18), Robert M. Koerner, George R. Koerner, Y. Grace Hsuan, Marilyn V. Ash-ley - Editors, January 24–26, 2005, Austin, Texas, USA.
5. Chemie Linz AG, "Polyfelt Design Manual". Prepared by G. Werner, S. Resl, R. Frobel and M. Wewerka under the direction of H. Schneider.
6. CIRIA (1991), "Prefabricated Vertical Drains - Design and Performance". R.D. Holtz, M.B. Jamiolkowski, R. Lancellota, R. Pedroni, published by CIRIA and Butter-worth-Heinemann.

7. Δρέπας, Γ.Χ., Πλατής, Α.Δ., Σιώρης, Ι.Α., Τσάμης, Β.Δ. (1997), "Θεμελίωση Λιμενικών Έργων σε Μαλακά Εδάφη Βελτιωμένα με Προφόρτιση και Ενισχυμένα με Χαλικοπασσάλους". 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Πάτρα, Τόμος 2, σελ. 49-56.
8. Gabr, M., Bowders, J., Wokasien, S. (1995), "Prefabricated Vertical Drains (PVD) for Enhanced Soil Flushing". Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No. 46(2), ASCE, New York, 1250-1264.
9. van de Griend, A.A. (1984), "Deformation of Plastic Drains". Reprint of an article in the magazine "Weg en Water", No. 1, October 1984, by Geotechnics Holland BV, Bulletin 84/1.
10. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine Grained Soils by Prefabricated Drains". Proc. 10th Int. Conf. In SMFE, Stockholm.
11. Karunaratne, G.P., Chew, S.H., Leong, K.W., Wong, W.K., Lim, L.H., Yeo, K.S., Hee, A.M. (2003), "Installation Stress in Prefabricated Vertical Drains". Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 9, pp. 8
12. Koerner, R.M. (1994) "Designing with Geo-synthetics". Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
13. Mitchell, J.K. (1976), "Stabilization of Soils for Foundations of Structures". Department of Civil Engineering, U.C. Berkeley.

14. Public Works Research Center (ΚΕΔΕ) (1987), "Embankments on Soft Clays". Bulletin of the Public Works Research Center, Special Publication, Athens.
15. Σταματόπουλος, Α.Κ., Σωτηρόπουλος, Η., Παχάκης, Μ. (1985). "Βελτίωση Εδαφών", Πρακτικά 2^{ης} Ελληνικής Ημερίδας Γεωτεχνικής με τίτλο "Παράμετροι Σχεδιασμού Θεμελιώσεων", Ε.Ε.Ε.Θ., Αθήνα, σελ. 242-273.
16. Stamatopoulos, A.C., Kotzias, P.C. (1985). "Soil Improvement by Preloading", John Wiley & Sons, New York.
17. Τζιτζάς, Σ.Σ. (1968). "Έργον Επεκτάσεως Διαδρόμου Αεροσκαφών Αερολιμένος Κέρκυρας", Τεχνικά Χρονικά, Απρίλιος 1968, Αθήνα.
18. Χρυσικός, Δ.Α., Ατματζίδης, Δ.Κ., Κωστοπούλου, Ε.Ι., Παπάζογλου, Θ.Κ. (2006). "Ανάπτυξη Προκατασκευασμένου Κατακόρυφου Στραγγιστηρίου", 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλο-ντικής Μηχανικής, Τόμος 1, σελ. 471-478, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
19. ΚΟΛΕΤΣΟΣ Κ., Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδ. University Studio press A.E., 2004
20. BARNES G., Εδαφομηχανική αρχές & εφαρμογές, Εκδ. Κλειδάριθμος, 2005
21. ΜΟΥΡΑΤΙΔΗΣ Α.Κ., Οδοποιΐα: Η κατασκευή των οδικών έργων, Εκδ. University Studio press A.E., 2005
22. ΜΑΡΑΓΚΟΣ Χ.Ν., Τεχνικά έργα υποδομής, Εκδ. Χ. Μαραγκός, 2003

23. ΠΑΠΑΓΕ.ΡΓΙΟΥ, Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Ι, Εκδ. Τ.Ε.Ι.Θ.
24. ΡΟΖΟΣ Δ., Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Ι, Εκδ. Ε.Μ.Π.
25. ΒΛΑΧΟΥ-ΒΛΑΒΙΑΝΟΥ Ε., Καθιζήσεις οφειλόμενες σε υπεράντηση υπόγειων νερών – αναγκαίες παρεμβάσεις, Εκδ. Ε.Μ.Π.
26. ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ Μ., Μέθοδοι ενίσχυσης & επισκεής στοιχείων θεμελίωσης.
27. ΤΕΛΕΙ.ΝΗ Ε.Χ., Μακροχρόνια παρακολούθηση των επιφανειακών καθιζήσεων στην περιοχή του ρήγματος της Αγίας Τριάδας Πατρών, 35_ Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη 2006

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. http://www.geoauth.gr/883/chapt_3.htm
2. <http://www.forthnet.gr/templates/newsPosting.aspx?=120417>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η επίδραση της μεταβολής των υδατικών πιέσεων των εδαφικών σχηματισμών στα τεχνικά έργα. Η παρουσία του νερού στους εδαφικούς σχηματισμούς επηρεάζει την αντοχή και γενικότερα τη συμπεριφορά τους απέναντι στα τεχνικά έργα, με τα οποία συσχετίζονται. Ιδιαίτερο ρόλο ασκεί η πίεση του νερού των πόρων, η οποία όταν μεταβάλλεται, κυρίως αυξανόμενη, μπορεί να δημιουργήσει μεγάλο πρόβλημα στην ευστάθεια των γεωτεχνικών κατασκευών. Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβολή της πίεσης των πόρων αποτελεί παραδείγματος χάρη ένα σεισμικό φαινόμενο ή επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου στο έδαφος από μια κτιριακή κατασκευή. Φαινόμενα που εμφανίζονται ως συνέπεια της μεταβολής της κατάστασης του εδάφους αποτελούν το φαινόμενο της ρευστοποίησης και το φαινόμενο της στερεοποίησης.

Στόχος, λοιπόν της μελέτης είναι η εξέταση των αιτιών των μεταβολών αυτών όπως επίσης και το φαινομένων που εμφανίζονται και ότι αυτό συνεπάγεται.

Η εργασία αναπτύσσεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο και δεύτερο κεφάλαιο εισάγονται οι βασικές έννοιες, όπως η διατμητική αντοχή, η ενεργός τάση και οι εδαφικές και μηχανικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της στερεοποίησης ,που προκαλείτε απο την ύπαρξη νερού στο υπέδαφος. Ενώ το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει δευτερογενές φαινόμενο που δημιουργείτε απο την ύπαρξη σεισμικής δραστηριότητας, συγκεκριμένα το φαινόμενο της ρευστοποίησης του εδάφους.

Τα συμπεράσματα της μελέτης προσανατολίζονται προς τις μεθόδους αντιμετώπισης των δύο φαινομένων και τις προϋποθέσεις εφαρμογής τους.

SUBTRACT

Subject of this thesis is the effect of changing water pressure in soil profiles in engineering. The presence of water in soils affects the strength and general behavior towards technical projects to which they relate. A particular role has the pressure of the water resource, which when altered, mainly growing, can cause a big problem with the stability of geotechnical structures. Factors affecting the change in pressure of resources, for example, a seismic phenomenon or imposing an external load on the ground from a building construction. Phenomena as a result of the change in soil condition is the phenomenon of liquefaction, the phenomenon of solidification, The aim of this study therefore is to examine the causes of these changes as well as the phenomena and that this entails. The work developed in four chapters. In the first and second chapter introduces the basic concepts, such as shear strength, the effective stress soil and mechanical deformations during the earthquake. The third chapter explores the phenomenon of consolidation caused by the presence of water underground. The fourth chapter analyzes secondary phenomenon caused by the existence of seismic activity, namely the problem of soil liquefaction. The findings directed to methods of dealing with two phenomena and conditions of application.