

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ: Νικολοπούλου Αναστασία
Πανίτσα Βασιλική

A.M: 5264
A.M: 4789

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. Βγενοπούλου Ειρήνη

ΠΑΤΡΑ 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερω την καθηγήτρια Δρ. Βγενοπούλου Ειρήνη, Πολιτικό Μηχανικό κυρίως για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της, για την επίλυση διάφορων θεμάτων.

Θα θέλαμε επίσης να απευθύνουμε τις ευχαριστίες μας στους γονείς μας, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μας με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μας. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά και να εκφράσουμε την ειλικρινή μας ευγνωμοσύνη, σε όσους στάθηκαν δίπλα μας με κάθε τρόπο και μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι φυσικές καταστροφές και ο τρόπος διαχείρισης τους αποτελούν αντικείμενο μελέτης με διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συστηματική έρευνα με σκοπό την αντιμετώπιση τους. Η συχνότητα εμφάνισης τους σημειώνει ανοδική πορεία και η επιστήμη είναι αναγκασμένη μέσω της τεχνολογίας να μετριάσει τέτοια φαινόμενα, αφού είναι αδύνατον να τα αποτρέψει.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία χρησιμοποιείται ως το βασικό εργαλείο για την αντιμετώπιση και την μετρίαση τέτοιων καταστροφικών φαινομένων. Στην πραγματικότητα με την βοήθεια της τεχνολογίας οι ερευνητές έχουν την δυνατότητα να κατανοούν τον μηχανισμό καταστροφών και στην συνέχεια να ανευρίσκουν μεθόδους και τεχνικές αντιμετώπισης τους.

Η γη κρατά την ισορροπία της μέσω των μηχανισμών με αποτέλεσμα να αναδιαμορφώνει συνεχώς την μορφή της βιόσφαιρας. Ένας τρόπος αναδιαμορφώσεως είναι και η διόγκωση εδαφών που θα μελετηθεί στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Η διόγκωση εδαφών αποτελεί μία από τις πιο ισχυρές και καταστροφικές δυνάμεις της γης, αφού λαμβάνει χώρα απροειδοποίητα μπορεί να επεκταθεί σε χιλιάδες χιλιόμετρα και να προκαλέσει τον θάνατο χιλιάδων ανθρώπων και ζώων.

Συμπέρασμα όλων όσων προαναφέρθηκαν είναι ότι η διόγκωση εδαφών μπορεί να θεωρηθεί ένα σημαντικό φυσικό φαινόμενο το οποίο απαιτεί την προσοχή των αρμόδιων όπως είναι μηχανικοί και γεω – επιστήμονες, που πρέπει να παρέμβουν στην επιφάνεια της γης όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και μελετά την διόγκωση των εδαφών. Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση του εδάφους με στόχο την περιγραφή της διεργασίας της διόγκωσης των εδαφών και τις μεθόδους αντιμετώπισης του φαινομένου.

Αρχικά δίνεται ο ορισμός του εδάφους, η προέλευση και η φύση του. Αναλύονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των συνεκτικών και μη εδαφών. Ακολουθεί η ταξινόμηση των εδαφών καθώς και οι συσχετίσεις μεταξύ αυτών των φυσικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, αναλύεται η διατμητική αντοχή των εδαφών, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται καθώς και οι νόμοι τριβής που ισχύουν στα εδάφη και οι νόμοι αστοχίας αυτών.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή του φαινομένου διόγκωσης των εδαφών. Δίνεται ο βασικός ορισμός των διογκούμενων εδαφών και τα προβλήματα που δημιουργούνται. Ακολουθεί ο εργαστηριακός προσδιορισμός των διογκούμενων εδαφών και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μελέτη αυτού. Οι βασικές δοκιμές που πραγματοποιούνται είναι η δοκιμή διογκούμενων εδαφών, η δοκιμή Καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας, η δοκιμή διόγκωσης υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση και η δοκιμή σταθερού όγκου. Για κάθε μία από τις προαναφερόμενες περιπτώσεις δίνονται τα κατάλληλα στοιχεία καθώς και ο εξοπλισμός που απαιτείται. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύγκριση αυτών και διεξάγονται συμπεράσματα για την καταλληλότητα κάθε δοκιμής.

Ακολουθεί η περιγραφή των μεθόδων πρόληψης και αποκατάστασης των διογκούμενων εδαφών. Αναλύεται πως πραγματοποιείται η σταθεροποίηση των εδαφών αφού έχει υποστεί το φαινόμενο της διόγκωσης και έπειτα περιγράφονται τα στραγγιστήρια, τα είδη αυτών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Στην συνέχεια καταγράφονται δύο περιπτώσεις διόγκωσης εδαφους η μία έχει πραγματοποιηθεί σε σχολείο και η άλλη σε οικία. Δίνονται τα χαρακτηριστικά και η λύση κάθε περίπτωσης.

Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε με στόχο την εκπόνηση της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
1. ΕΔΑΦΟΣ.....	1
1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	1
1.2. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	1
1.2.1. Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη.....	3
1.2.2. Αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και των αργιλικών ορυκτών	6
1.2.3. Φάσεις του εδάφους	9
1.3. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗ-ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	13
1.3.1. Σχετική πυκνότητα	13
1.3.2. Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	14
1.4. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	18
1.5. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	23
1.6. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	27
1.7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ – ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	28
2. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	29
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	29
2.2. ΝΟΜΟΙ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΚΟΚΚΩΔΗ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	31
2.3. ΝΟΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	35
2.3.1. Κοκκώδη εδάφη	35
2.3.2. Συνεκτικά εδάφη	38
3. ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	42
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	42
3.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	45
3.2.1. Παρουσία διογκούμενων εδαφών	45
3.2.2. Διάσταση προβλήματος.....	46
3.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΑ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ	48
3.4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	50
3.4.1. Κατάταξη διαδικασιών για διογκούμενα εδάφη	51
3.4.2. Δοκιμή αναγνώρισης των διογκούμενων εδαφών.....	60
3.4.3. Δόκιμη Καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας (CBR)	63
3.4.3.1. Υπολογισμός αριθμού CBR	64

3.4.3.2.	Δόκιμη προσδιορισμού CBR.....	65
3.4.3.3.	Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	66
3.4.3.4.	Περιγραφή εργασίας.....	71
3.4.3.5.	Διαδικασία δοκιμής.....	71
3.4.4.	Δοκιμές προσδιορισμού της τάσης και του ποσοστού διόγκωσης.....	74
3.4.4.1.	Δοκιμές διόγκωσης υπο σταθερή κατακόρυφη φόρτιση.....	74
3.4.4.1.1.	Δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης στο οιδήμετρο.....	74
3.4.4.1.2.	Δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου.....	75
3.4.4.2.	Δοκιμή σταθερού όγκου.....	77
3.5.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ.....	77
3.6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ.....	83
4.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	84
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	84
4.2.	ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	85
4.2.1.	Είδη στραγγιστικών έργων.....	92
4.2.1.1.	Αρχές σχεδιασμού εγκαταστάσεων αποστράγγισης.....	93
4.2.1.2.	Αρχή λειτουργίας εγκαταστάσεων αποστράγγισης.....	99
4.2.2.	Χαρακτηριστικά Στραγγιστηριών.....	100
4.2.2.1.	Γραμμικά στραγγιστήρια φίλτρου.....	100
4.2.2.2.	Γραμμικά πλαστικά στραγγιστήρια (fin drain).....	102
4.2.2.3.	Τάφροι αποστράγγισης.....	104
4.2.2.4.	Στρώσεις αποστράγγισης.....	104
4.2.2.5.	Αγωγοί Huckpack.....	109
4.2.2.6.	Μερικώς διάτρητοι σωληνωτοί αγωγοί.....	110
5.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΙΟΛΟΓΙΑ.....	111
5.1.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 ^η : ΘΛΙΨΗ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ.....	111
5.1.1.	Γενικά.....	111
5.1.2.	Ιστορία.....	111
5.1.3.	Έρευνα/Μελέτη.....	114
5.1.4.	Αίτιο της κίνησης.....	119
5.1.5.	Διορθωτικές κατασκευές.....	121
5.2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 ^η : ΘΛΙΨΗ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ.....	127
5.2.1.	Γενικά.....	127
5.2.2.	Υπάρχουσα Κατάσταση.....	127
5.2.3.	Αίτιο μετακίνησης.....	128
5.2.4.	Επιδιορθωτικά Μέτρα.....	132
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	135
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	136

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάφορα είδη εδαφών	1
Εικόνα 2: Καθίζηση εδαφών	43
Εικόνα 3: Διογκούμενα Εδάφη	44
Εικόνα 4: Σπήλαια και καταβόθρες	44
Εικόνα 5: Χάρτης κατανομής των διογκούμενων εδαφών που έχουν αναφερθεί	46
Εικόνα 6: Προβλήματα διόγκωσης εδαφών στο οδόστρωμα.....	49
Εικόνα 7: Συσκευή προσδιορισμού CBR.....	65
Εικόνα 8: Μήτρα – καλούπι.....	67
Εικόνα 9: Παρέβλημα	67
Εικόνα 10: Κόπανος.....	67
Εικόνα 11: Συσκευή μέτρησης διόγκωσης.....	68
Εικόνα 12: Συσκευή μέτρησης διόγκωσης.....	68
Εικόνα 13: Μηκυνσιόμετρα	68
Εικόνα 14: Βάρη επιφόρτισης.....	69
Εικόνα 15: Βάρη επιφόρτισης.....	69
Εικόνα 16: Έμβολο διείσδυσης.....	69
Εικόνα 17: Συσκευή φόρτισης	70
Εικόνα 18: Δοχείο υδρεμποτισμού.....	70
Εικόνα 19: Κλίβανος ξήρανσης	70
Εικόνα 20: Τυπική περίπτωση χαλάρωσης της επίχωσης γύρω από το κτίριο. Η χαλαρή επίχωση αφήνει τα επιφανειακά ύδατα να εισχωρήσουν στο έδαφος της θεμελίωσης. Προσοχή στις ρηγματώσεις όπου παγιδεύεται νερό.	91
Εικόνα 21: Σχολείο Πτέρυγα Β : Εξωτερική όψη του σχολείου υπό μελέτη.	112
Εικόνα 22: Σχολείο Πτέρυγα Γ: Εξωτερική όψη του σχολείου υπό μελέτη.....	112
Εικόνα 23: Θλίψη του βάρου που βρίσκεται πάνω από τον πάσσαλο και κάτω από την κύρια δοκό.....	114
Εικόνα 24: Ρωγμές και διαχωρισμός των τούβλων από την οροφή.....	115
Εικόνα 25: Αστοχία του πασσάλου από διάτμηση αποτέλεσμα της ανύψωσης.....	119
Εικόνα 26: Αστοχία του πασσάλου από διάτμηση αποτέλεσμα της ανύψωσης.....	119
Εικόνα 27: Ακατάλληλη τοποθέτηση πασσάλου. Το μήκος του πασσάλου πρέπει να είναι 20 πόδια και εδρασμένο σε βραχώδες υπόβαθρο. Πραγματικό μήκος μόλις 4 πόδια και εδρασμένο σε άργιλο.....	120
Εικόνα 28: Κενό τεσσάρων ιντσών, το οποίο έχει κλείσει τελείως, κάτω από την βαθμοδοκό.	121
Εικόνα 29: Τυπική εικόνα που δείχνει την παρουσία «μανιταριού» στην κορυφή του πασσάλου	122
Εικόνα 30: Χαλάρωση του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο για να εξαλειφθεί η πίεση ανύψωσης.....	124
Εικόνα 31: Χαλύβδινα δαχτυλίδια τοποθετήθηκαν γύρω από τους ελαττωματικούς πασσάλους και μεγάλοι ατσάλινοι δοκοί εγκαταστάθηκαν για να δυναμώσουν την πεδילוδοκό.	125

Εικόνα 32: Ανύψωση της πεδילוδοκού κατά την επιχείρηση της ισοστάθμισης (των πασσάλων).....	125
Εικόνα 33: Θέση των εξωτερικών ρωγμών.....	128
Εικόνα 34: Τα χαρτονένια κουτιά με κενά αέρος χρησιμοποιούνται συνήθως για να σχηματίσουν κενό χώρο ανάμεσα στο κάτω μέρος των πεδילוδοκών και των πλακών εδρασμένων σε διογκούμενα εδάφη. Υπάρχουν δύο τύποι ανάλογα με την διαμόρφωση των κελιών στο εσωτερικό των κουτιών: α)τα διαγώνια και β)τα κάθετα. Εδώ φαίνονται τα χαρτονένια κουτιά με τα κάθετα κελιά.	129
Εικόνα 35: Διαχωρισμός του σαλονιού από το διάδρομο τμήμα.....	130
Εικόνα 36: Διαχωρισμός του σπιτιού εξαιτίας διαφορετικής διαστολής.....	130
Εικόνα 37: Μετακίνηση του σπιτιού πριν και μετά τις διορθωτικές κατασκευές.	133
Εικόνα 38: Κατάσταση στο μπροστινό μέρος του σπιτιού το 1974.	134

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Η φύση του εδάφους.....	2
Σχήμα 2: Δομή αργιλικού ορυκτού.....	5
Σχήμα 3: Ηλεκτρικά φορτία στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων.....	5
Σχήμα 4: Προσροφημένα δίπολα νερού σε αργιλικό πλακίδιο.....	6
Σχήμα 5: Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων.....	8
Σχήμα 6: Φάσεις των εδαφικών υλικών.....	9
Σχήμα 7: Φάσεις εδαφικών υλικών.....	9
Σχήμα 8: Κοκκομέτρηση εδαφών με κόσκινα.....	16
Σχήμα 9: Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών.....	17
Σχήμα 10: Απεικόνιση ανομοιόμορφου και ομοιόμορφου εδαφικού δείγματος 1kg.....	18
Σχήμα 11: Βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός συνεκτικού εδάφους με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας.....	19
Σχήμα 12: Όρια Atterberg.....	20
Σχήμα 13: Βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών, τη μορφή της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων σε δοκιμή διάτμησης ενός συνεκτικού εδάφους με την αύξηση του ποσοστού της υγρασίας.....	20
Σχήμα 14: Η συσκευή Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.....	22
Σχήμα 15: Συμβολισμοί κατάταξης εδαφών.....	24
Σχήμα 16: Κατάταξη εδαφών.....	24
Σχήμα 17: Συσχέτιση ορίου υδαρότητας και συντελεστή στερεοποίησης.....	27
Σχήμα 18: Συσχέτιση δείκτη και πλαστικότητας και γωνία τριβής φ.....	28
Σχήμα 19: Συσχέτιση ορίου υδαρότητας και δείκτη συμπίεσης.....	28
Σχήμα 20: Καμπύλη φόρτισης αργίλου.....	29
Σχήμα 21: Καμπύλη φορτίου υποχώρησης θεμελίου.....	30
Σχήμα 22: Δυνάμεις μεταξύ των κόκκων εδαφικού υλικού.....	32
Σχήμα 23: Πραγματική γωνία τριβής για διάφορα εδαφικά υλικά.....	32
Σχήμα 24: Δυνάμεις μεταξύ των κόκκων.....	32
Σχήμα 25: Γωνία τριβής ως προς το πορώδες.....	34
Σχήμα 26: Μηχανικό ανάλογο της γωνίας τριβής.....	34
Σχήμα 27: Αστοχία κοκκωδών εδαφών.....	36
Σχήμα 28: Περιβάλλουσα αστοχίας Coulomb σε άμμους.....	37
Σχήμα 29: Κριτήριο αστοχίας Coulomb σε άμμους.....	38
Σχήμα 30: Περιβάλλουσα αστοχίας Coulomb σε αργίλους.....	39
Σχήμα 31: Κριτήριο αστοχίας Coulomb σε αργίλους.....	40
Σχήμα 32: Απεικόνιση αργιλικού εδάφους πριν και μετά την διόγκωση.....	45
Σχήμα 33: Πρόβλεψη της διογκωσιμότητας των καολινιτικών εδαφών από: (α)το όριο υδαρότητας, (β)το δείκτη πλαστικότητας, (γ)την ενεργότητα, (δ)την οιδομετρική δοκιμή και (ε)τον δείκτη ελεύθερης διόγκωσης MFSI.....	56
Σχήμα 34: Πρόβλεψη της διογκωσιμότητας των μοντιμοριλλονιτικών εδαφών από: (α)το όριο υδαρότητας, (β)το δείκτη πλαστικότητας, (γ)την ενεργότητα, (δ)την οιδομετρική δοκιμή και (ε)τον δείκτη ελεύθερης διόγκωσης MFSI.....	57

Σχήμα 35: Συσκευή δόκιμης αναγνώρισης διογκούμενων εδαφών	63
Σχήμα 36: Τις % της διόγκωσης του εδάφους για διάφορες συνθήκες τοποθεσιών υπο μοναδιαία φόρτηση PSI.....	86
Σχήμα 37: Αδιαπέραστη μεβράνη κατά μήκος των εξωτερικών τοίχων.	88
Σχήμα 38: Τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας εμποδίζουν την εισχώρηση νερού κάτω από την κατασκευή.....	90
Σχήμα 39: Υπερυψωμένοι υδροφορείς	91
Σχήμα 40: Στράγγιση σε θέσεις ορύγματος με υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση κατά μήκος γραμμικών στραγγιστηρίων. Απορροή στα ερείσματα.	95
Σχήμα 41: Στράγγιση σε θέσεις ορύγματος με υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε ανοιχτές τάφρους.....	95
Σχήμα 42: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή στα πρανή.	96
Σχήμα 43: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε κρασπεδόρειθρα.	96
Σχήμα 44: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε ανοιχτές τάφρους.	97
Σχήμα 45: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με στενά στραγγιστήρια και πλαστικά στραγγιστήρια. Στην περιοχή της κεντρικής νησίδας γίνεται απορροή σε επενδεδυμένες τάφρους.....	98
Σχήμα 46: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με στενά στραγγιστήρια και πλαστικά στραγγιστήρια στην περιοχή της κεντρικής νησίδας με κανονική κλίση. Απορροή προς τα ερείσματα της οδού.....	98
Σχήμα 47: Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης.	107
Σχήμα 48: Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης.	108
Σχήμα 49: Στρώση βαθιάς αποστράγγισης και η λεπτομέρεια αυτής.....	108
Σχήμα 50: Αγωγός Huckpack (επανεπίχωση με συνεκτικό υλικό).....	109
Σχήμα 51: Αγωγός Huckpack (επανεπίχωση με μη συνεκτικό υλικό)	109
Σχήμα 52: Μερικώς διάτρητος αγωγός (Επανεπίχωση με συνεκτικό υλικό)	110
Σχήμα 53: Κάτοψη του σχολείου υπό μελέτη.....	113

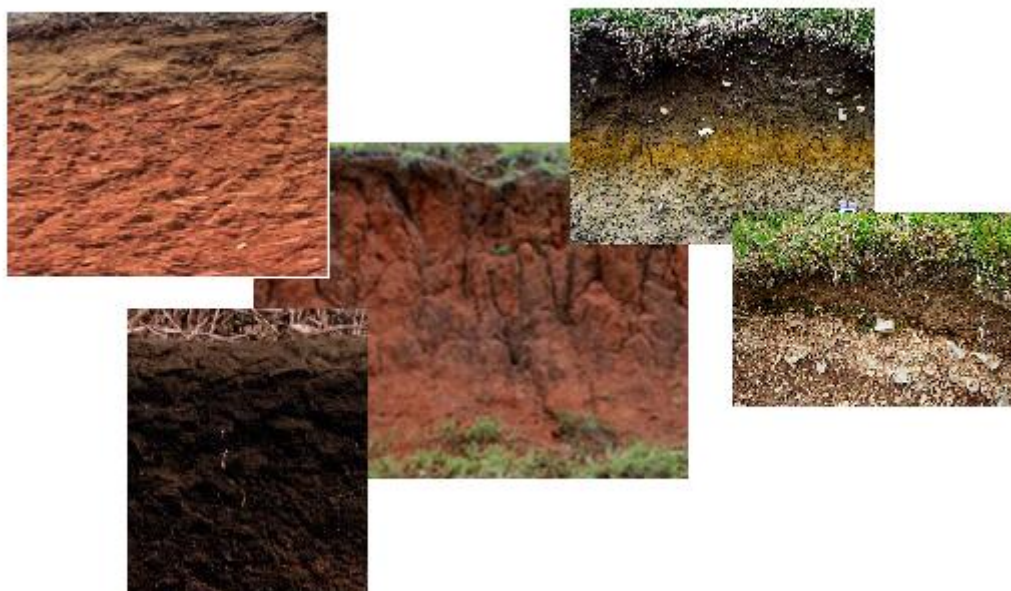
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών	4
Πίνακας 2: Τιμές ειδικής πυκνότητας για σημαντικά ορυκτά.	12
Πίνακας 3: Τυπικές τιμές των θεμελιωδών μεγεθών για διάφορα εδαφικά υλικά.....	12
Πίνακας 4: Ποιοτική περιγραφή κοκκωδών εδαφών επί τόπου.....	14
Πίνακας 5: Δείκτης πόρων και ξηρού ειδικού βάρους μερικών τυπικών εδαφών στη φυσική τους κατάσταση.....	14
Πίνακας 6: Κατάταξη με βάση το μέγεθος των κόκκων (Βρετανικός Κανονισμός).....	15
Πίνακας 7: Αριθμοί προτύπων αμερικανικών κοσκίνων με τα αντίστοιχα ανοίγματα.....	15
Πίνακας 8: Η τιμή του δείκτη πλαστικότητας χαρακτηρίζει την πλαστικότητα του εδαφικού υλικού.....	22
Πίνακας 9: Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS).....	25
Πίνακας 10: Ταξινόμηση εδαφών κατά AASHO.....	26
Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών Συνεκτικών – Μη συνεκτικών εδαφών	28
Πίνακας 12: Όριο υδαρότητας	53
Πίνακας 13: Δείκτης πλαστικότητας.....	53
Πίνακας 14: Όριο συρρίκνωσης.....	53
Πίνακας 15: Δείκτης ελεύθερης διόγκωσης (MFSI).....	54
Πίνακας 16: Προτεινόμενη κατηγοριοποίηση διογκούμενων εδαφών	59
Πίνακας 17: Τάση διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές δοκιμές σε όμοια εδαφικά δείγματα.....	79
Πίνακας 18: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.....	80
Πίνακας 19: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.....	81
Πίνακας 20: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.....	82
Πίνακας 21: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.....	82
Πίνακας 22: Κανόνες φίλτρου	93
Πίνακας 23: Ελάχιστες απαιτήσεις πάχους της ΣΑΠ.....	106
Πίνακας 24: Βόρειος τοίχος-άνω άργιλος.....	117
Πίνακας 25: Βόρειος τοίχος-Βραχώδες υπόστρωμα.....	117
Πίνακας 26: Ανατολικός και Δυτικός τοίχος-Άνω άργιλος.....	117
Πίνακας 27: Μέση περιεκτικότητα σε νερό %.....	118

1. ΕΛΔΑΦΟΣ

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΔΑΦΟΥΣ

Με τον όρο έδαφος εννοείται ένα σύνολο ασυγκόλλητων ή αδύνατα συγκολλημένων ορυκτών κόκκων που προήλθαν από σταδιακή αποσύνθεση πετρωμάτων και που στα κενά μεταξύ των κόκκων περιέχεται είτε αέρας είτε νερό είτε και τα δύο (Βγενοπούλου Ε., 2004).



Εικόνα 1: Διάφορα είδη εδαφών
[Πηγή: <http://dasarxeio.com>]

1.2. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος λοιπόν όπως προαναφέρθηκε είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων (πόροι) περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή αέρια (συνήθως αέρα).

Τα εδαφικά υλικά προέρχονται από τις εξής διεργασίες:

❖ Μηχανική αποσάθρωση

Η μηχανική αποσάθρωση οφείλεται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

- ✓ Παγετό
- ✓ Συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές
- ✓ Διάβρωση από νερό – αέρα
- ✓ Λειτουργίες φυτών, ζώων και των ανθρώπων.

Αποτέλεσμα όλων των προαναφερόμενων παραγόντων είναι ο κατατεμαχισμός και θρυμματισμός των βράχων. Τονίζεται ότι η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών όπως των χαλίκων και των άμμων.

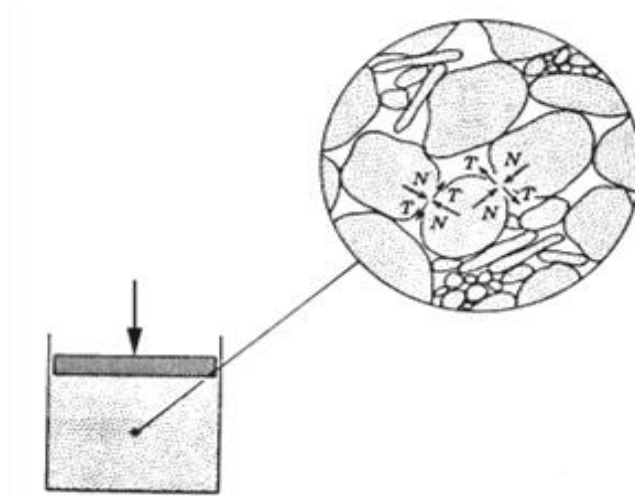
❖ Χημική αποσάθρωση

Η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω κάποιων παραγόντων, οι οποίοι είναι οι εξής:

- ✓ Οξείδωση
- ✓ Ενανθράκωση
- ✓ Αναγωγή
- ✓ Άλλων χημικές διαδικασίες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χημική αποσάθρωση θεωρείται ως τον κυριότερο παράγοντα δημιουργίας λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών όπως των ιλύων και των αργίλων.

Ωστόσο, υπάρχει και η περίπτωση της εναλλακτικής μεθόδου αποσάθρωσης που πραγματοποιείται η δημιουργία εδαφικών σχηματισμών κάθε τύπου. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπάρχει συνδυασμός των αποσαθρώσεων με μερική συμμετοχή ή της μίας ή της άλλης.



Σχήμα 1: Η φύση του εδάφους
[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

Με βάση τον τρόπο μεταφοράς και τελικής απόθεσης των προϊόντων της αποσάθρωσης, τα εδάφη διακρίνονται σε αυτόχθονα και ιζηματογενή εδάφη. Τα αυτόχθονα εδάφη δημιουργούνται από την στιγμιαία απόθεση των προϊόντων αποσάθρωσης. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα αυτόχθονα εδάφη δεν μεσολαβεί μεταφορά μακριά από την περιοχή αποσάθρωσης. Σε αντίθετη περίπτωση τα ιζηματογενή εδάφη προέρχονται από τη μεταφορά των προϊόντων αποσάθρωσης. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται συνήθως με τα νερά των ποταμών και έχουν σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των προϊόντων αποσάθρωσης από την αρχική θέση και την εναπόθεση τους στην περιοχή των εκβολών, Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις που η μεταφορά των προϊόντων της αποσάθρωσης γίνεται και από τον αέρα, οι αποθέσεις αυτές ονομάζονται αιολικές αποθέσεις.

Η μεταφορά και απόθεση των ιζηματογενών εδαφικών σχηματισμών με το νερό οδηγεί στο διαχωρισμό τους κατά μέγεθος κόκκων. Τα χονδρόκοκκα ιζήματα (χάλικες και άμμοι) αποτίθενται συνήθως στις κοίτες των ποταμών και σε περιοχές κοντά στις εκβολές τους. Σε αντίθετη περίπτωση, τα λεπτόκοκκα ιζήματα (ιλείς και άργιλοι) μεταφέρονται αιωρούμενα σε μεγάλες αποστάσεις και αποτίθενται με αργό ρυθμό στον πυθμένα των θαλασσών και λιμνών μακριά από τις εκβολές των ποταμών, σχηματίζοντας οριζόντιες ή περίπου οριζόντιες στρώσεις.

Ωστόσο, συχνό φαινόμενο είναι και η διαδοχική απόθεση στρώσεων χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων στην ίδια περιοχή, αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες:

1. Τεκτονικές κινήσεις του γήινου φλοιού που συχνά μετατρέπουν κοίτες ποταμών σε πυθμένες ωκεανών και το αντίθετο.
2. Κατά την διαδοχή περιόδων έντονων βροχοπτώσεων και απορροών με ήπιες περιόδους. Οι πρώτες οδηγούν στην απόθεση χονδροκλαστικών κυρίως ιζημάτων, ενώ οι δεύτερες οδηγούν στην απόθεση λεπτόκοκκων εδαφών.

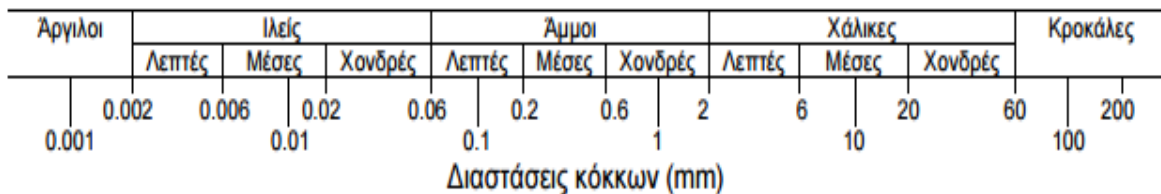
Ανεξάρτητα από τον τρόπο γένεσης, μεταφοράς και απόθεσης των εδαφών, η διάταξη των κόκκων τους δημιουργεί κενά (πόρους) τα οποία, κατά την ιζηματογένεση στους πυθμένες των θαλασσών, επληρούντο με νερό. Ωστόσο, με το πέρασμα μεγάλων χρονικών διαστημάτων που μεσολάβησε από την ιζηματογένεση πολλοί εδαφικοί σχηματισμοί βρέθηκαν τελικώς πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και το νερό των πόρων αντικαταστάθηκε μερικά ή ολικά από αέρα. Αποτέλεσμα των προαναφερόμενων είναι ότι στις μέρες μας τα περισσότερα εδάφη περιέχουν στους πόρους τους και νερό και αέρα. (Καββαδάς Μ.,2002)

1.2.1. Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη

Συνοψίζοντας τα όσα προαναφέρθηκαν, τα ιζηματογενή εδάφη αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών και διακρίνονται είτε σε χονδρόκοκκα είτε λεπτόκοκκα. Επιπλέον, τα χονδρόκοκκα ιζήματα προέρχονται κυρίως από τη μηχανική αποσάθρωση των βράχων, ενώ τα λεπτόκοκκα ιζήματα από τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Οι

διαφορές μεταξύ των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων εκτείνονται και πέραν του τρόπου γένεσής τους.

Τα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα διαφέρουν σημαντικά στο μέγεθος των πόρων τους. Τα εδάφη με κόκκους μεγαλύτερους από 2 mm ανήκουν στην κατηγορία των χαλικών, από 2mm έως 0.06 mm είναι οι κόκκοι των άμμων, από 0.06 mm έως 0.002 mm είναι οι κόκκοι των ιλών και μικρότεροι από 0.002 mm είναι οι κόκκοι των αργίλων. Ακολουθεί ο Πίνακας 1. Με τις αντίστοιχες τιμές.



Πίνακας 1: Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών
[Πηγή: Καββαδάς Μ., 2006]

Οι κόκκοι των άμμων και των χαλικών έχουν συνήθως σφαιρικό σχήμα. Η μέγιστη και η ελάχιστη διάσταση των κόκκων δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ακόμα και στην περίπτωση των πολύ πεπλατυσμένων κόκκων, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση δεν υπερβαίνει συνήθως το πέντε.

Η μορφή της επιφάνειας των κόκκων ποικίλλει και κυμαίνεται μεταξύ λείας και γωνιώδους επιφάνειας. Όταν αναφέρεται λεία επιφάνεια εννοείται στην περίπτωση των εδαφών που η επιφάνεια των κόκκων τους έχουν λειανθεί από την διάβρωση ενώ της γωνιώδους επιφάνειας αναφέρεται στην περίπτωση πρόσφατων κλαστικών ιζημάτων. Η διάταξη των κόκκων των χονδρόκοκκων εδαφών καθορίζεται από τα κάτωθι:

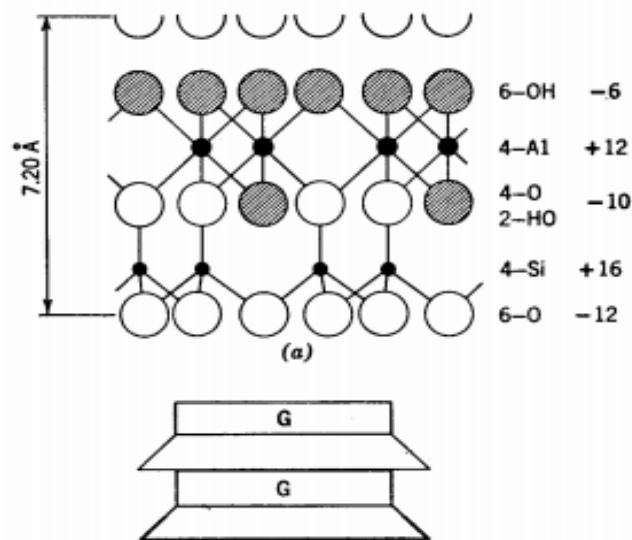
- Βάρος της επιφάνειας
- Διαστάσεις της επιφάνειας
- Μορφή της επιφάνειας
- Μηχανικές δυνάμεις επαφής που ασκούνται μεταξύ των κόκκων.

Η μηχανική αυτή διάταξη των κόκκων έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία της δομής του εδάφους ή αλλιώς του εδαφικού σκελετού. Η δομή αυτή έχει πυκνότητα η οποία κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής (πολύ χαλαρής δομής) και μίας μέγιστης τιμής (πολύ πυκνής δομής). Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης πυκνότητας δεν είναι πολύ σημαντική διότι σε όλες τις περιπτώσεις οι κόκκοι βρίσκονται σε επαφή.

Οι κόκκοι των λεπτόκοκκων εδαφών είναι πολύ πεπλατυσμένοι και έχουν τη μορφή πλακιδίων (αργιλικά πλακίδια) με μικρό πάχος που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μόνιό τους. Αντίθετα, στις άλλες δύο διαστάσεις ο κρύσταλλος των αργιλικών πλακιδίων αναπτύσσεται κανονικά με τη διάταξη μεγάλου αριθμού μορίων.

Στην συνέχεια ακολουθεί το Σχήμα 2 όπου απεικονίζει τη δομή του πλακιδίου του καολίνη, ενός αργιλικού ορυκτού με πάχος πλακιδίου περί τα 0.1 μm (1 μm = 1 * 10⁻³ mm)

και μεγάλη διάσταση (διάμετρο) 0.3-1 μm , που έχει δηλαδή λόγο διαμέτρου προς πάχος ίσο με 3-10. Ο καολίνης είναι ένα από τα αργιλικά ορυκτά με μικρό λόγο διαμέτρου προς πάχος, δηλαδή ένα από τα λιγότερο ενεργά αργιλικά ορυκτά.



Σχήμα 2: Δομή αργιλικού ορυκτού
[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

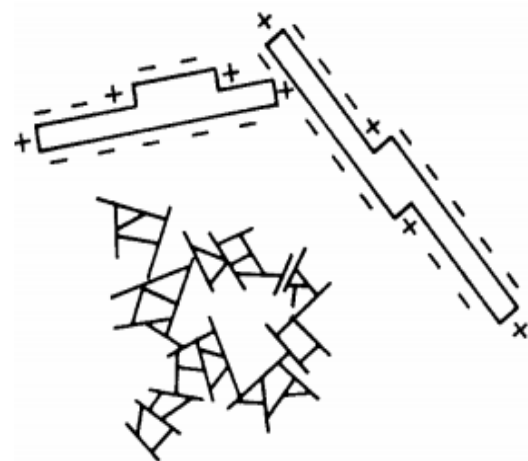
Ωστόσο, ως το πιο ενεργό αργιλικό ορυκτό θεωρείται ο ιλλίτης, ο οποίος έχει λόγο διαμέτρου προς πάχος του πλακιδίου ίσο με 10-30. Επιπλέον, ο μοντμοριλλονίτης έχει αντίστοιχο λόγο διαμέτρου προς πάχος περί το 100.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω των ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων και της πλακοειδούς μορφής των αργιλικών ορυκτών, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλακιδίων διέπεται και από άλλες δυνάμεις πέρα της βαρύτητας και της τριβής μεταξύ των πλακιδίων.

Ειδικότερα, η επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων είναι ηλεκτρικά φορτισμένη, οι άνω και κάτω επιφάνειες, οι οποίες είναι οι μεγάλες επιφάνειες, φέρουν αρνητικά φορτία, και η περιφέρεια, δηλαδή το πάχος, φέρει ίσα και αντίθετα θετικά φορτία.

Το Σχήμα 3 απεικονίζει την προαναφερόμενη φόρτιση των αργιλικών πλακιδίων.

Οι επιφανειακές ηλεκτρικές δυνάμεις έλξης και άπωσης πρακτικά δεν έχουν την δυνατότητα να εμφανιστούν στα χονδρόκοκκα εδάφη παρά μόνο στα λεπτόκοκκα. Αυτό συμβαίνει διότι η έντασή τους είναι αρκετές τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από τις δυνάμεις βαρύτητας.



Σχήμα 3: Ηλεκτρικά φορτία στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων
[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

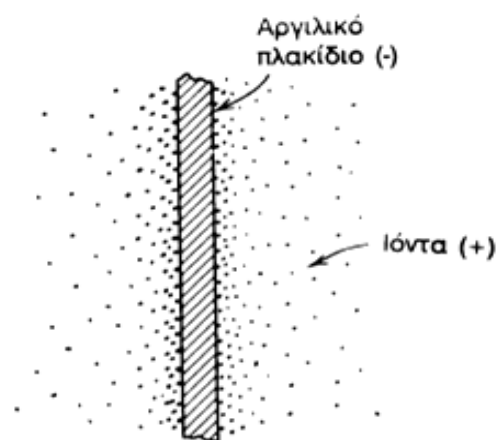
Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος των ηλεκτρικών δυνάμεων, που είναι ανάλογες της επιφάνειας, προς τις δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες είναι ανάλογες της μάζας, εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια, δηλαδή το λόγο της επιφάνειας προς τη μάζα του πλακιδίου. Η ειδική επιφάνεια ενός σφαιρικού κόκκου μεσόκοκκης άμμου είναι $2.3 \text{ m}^2/\text{kg}$, ενώ η ειδική επιφάνεια του καολίνη είναι $15000 \text{ m}^2/\text{kg}$ και του μοντμοριλλονίτη $800.000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Η μεγάλη διαφορά στην ειδική επιφάνεια των κόκκων μεταξύ των χονδρόκοκκων (αμμωδών) και των λεπτόκοκκων (αργιλικών) εδαφών καθορίζει η τελείως διαφορετική δομή τους και οι διαφορές της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Τα λεπτόκοκκα εδάφη ονομάζονται επίσης και συνεκτικά, επειδή παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους που οφείλεται στις ηλεκτρικές έλξεις μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων. Αντίστοιχα, τα χονδρόκοκκα εδάφη ονομάζονται και μη-συνεκτικά, επειδή δεν παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους.

1.2.2. Αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και των αργιλικών ορυκτών

Η επιρροή του νερού στη μηχανική συμπεριφορά των χονδρόκοκκων εδαφών είναι πρακτικά μηδενική, εφόσον η επιβολή της φόρτισης γίνεται με επαρκώς βραδύ ρυθμό. Για τον υπολογισμό της γωνίας της διατμητικής τριβής δίνεται το χαρακτηριστικό παράδειγμα της άμμου, όπου η διατμητική γωνία τριβής μίας άμμου είναι η ίδια ανεξάρτητα από το εάν η άμμος είναι ξηρή ή κορεσμένη με νερό.

Σε αντίθετη περίπτωση τα αργιλικά εδάφη επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία και την ποσότητα του νερού που καταλαμβάνει τους πόρους τους. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός της ηλεκτρικής αλληλεπίδρασης του νερού με τις φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών πλακιδίων. Το μόριο του νερού, αν και ηλεκτρικά ουδέτερο, παρουσιάζει τις ιδιότητες ηλεκτρικού δίπολου, με κέντρα θετικού και αρνητικού φορτίου που δεν ταυτίζονται. Τα ηλεκτρικά αυτά δίπολα έλκονται προς την ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και προσροφώνται σε αυτή, δηλαδή συνδέονται ισχυρά με την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και αποτελούν ενιαίο σώμα.



Σχήμα 4: Προσροφημένα δίπολα νερού σε αργιλικό πλακίδιο.

[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

Η έλξη των διπόλων του νερού προς τα αργιλικά πλακίδια είναι πολύ ισχυρή κοντά στην επιφάνεια και μειώνεται ραγδαία με την απόσταση από την επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει διότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, δημιουργείται μια ζώνη από το αργιλικό πλακίδιο, στην οποία το προσροφημένο νερό έχει ιδιότητες πολύ διαφορετικές από το ελεύθερο νερό που βρίσκεται έξω από τη ζώνη αυτή. Η ζώνη του προσροφημένου νερού γύρω από το αργιλικό πλακίδιο ονομάζεται διπλή στρώση, επειδή αναπτύσσεται και στις δύο επιφάνειες του πλακιδίου. Η ύπαρξη και το μέγεθος της διπλής στρώσης είναι καθοριστικοί παράγοντες των μηχανικών ιδιοτήτων των αργιλικών εδαφών.

Για την κατανόηση των προαναφερόμενων δίνεται το εξής παράδειγμα: με την αύξηση της υγρασίας, δηλαδή της ποσότητας του νερού στους πόρους των αργιλικών εδαφών, αυξάνει αρχικά και το πάχος της διπλής στρώσης, και αυτό γίνεται διότι ένα μέρος του διαθέσιμου νερού προσροφάται στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Στην περίπτωση που το ποσοστό της υγρασίας αυξηθεί πέρα από το επιθυμητό όριο, το πάχος της διπλής στρώσης μεγαλώνει, οπότε τα μόρια του νερού που βρίσκονται στο απομακρυσμένο από το πλακίδιο όριο της διπλής στρώσης είναι ασθενώς συνδεδεμένα με τη διπλή στρώση. Ωστόσο, λόγω της πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού με την απόσταση αποκτούν ιδιότητες ελεύθερου νερού, δηλαδή εμφανίζουν μικρή έως μηδενική διατμητική αντοχή.

Το αποτέλεσμα των προαναφερόμενων είναι οι επαφές μεταξύ των πλακιδίων, μέσω των μορίων του νερού που είναι ασθενώς συνδεδεμένα με τις διπλές στρώσεις, οδηγεί στα εξής:

- Βηματική μείωση της διατμητικής αντοχής της αργίλου
- Μετάπτωσή της από τη στερεά μορφή στην υδαρή κατάσταση.

Ωστόσο, η μείωση της υγρασίας έχει σαν συνέπεια τη μείωση του πάχους των διπλών στρώσεων, την ισχυρότερη ηλεκτρική αλληλεπίδραση μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων και την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

Στην περίπτωση που το προσροφημένο νερό απομακρυνθεί τότε οι ηλεκτρικές δράσεις μεταξύ των πλακιδίων είναι ισχυρότατες λόγω της μικρής απόστασης και η διατμητική αντοχή μέγιστη. Η απομάκρυνση του προσροφημένου νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση κλιβάνου που θα λειτουργεί σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλακιδίων είναι τόσο ισχυρή που, ακόμα και στην περίπτωση που βραχεί η άργιλος, τα πλακίδια έχουν τις εξής δυνατότητες:

- Δεν απομακρύνονται
- Δεν επιτρέπουν την είσοδο νερού στους πόρους
- Δεν επιτρέπουν το σχηματισμό διπλών στρώσεων προσροφημένου νερού.

Για όλα αυτά τα «καλά» κεραμικά δεν απορροφούν νερό και δεν χάνουν την αντοχή τους εάν βραχούν. Συμπερασματικά λοιπόν, υπάρχει δραστική επίδραση της υγρασίας στα αργιλικά εδάφη.

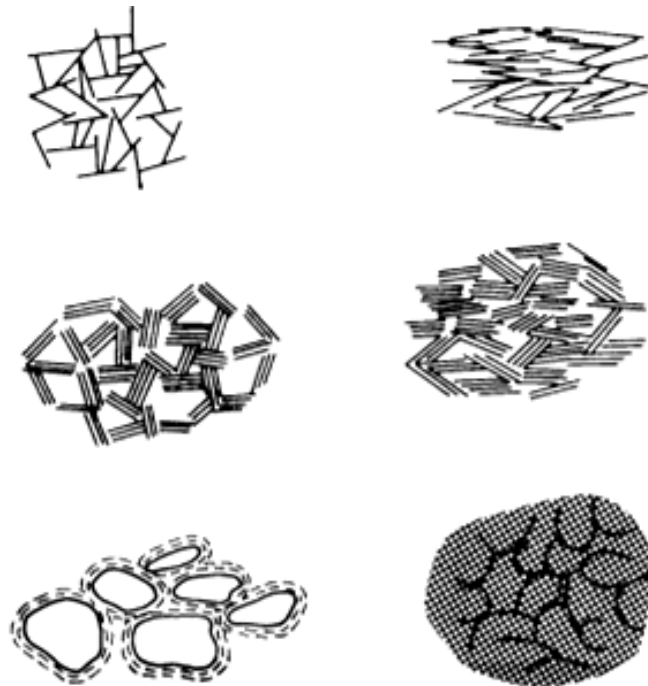
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί και μια ακόμα εφαρμογή της επιρροής της διπλής στρώσης του προσροφημένου νερού στη συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών και είναι οι

συνέπειες της μεταβολής του ΡΗ του νερού των πόρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μεταβολή της αλατότητας του περιβάλλοντος. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από αν γίνει αναφορά στα θαλάσσια ιζήματα, όπου το νερό των πόρων είναι αλμυρό, δηλαδή εκτός από τα δίπολα του νερού υπάρχουν και τα ιόντα των διαλυμένων αλάτων. Στην περίπτωση αυτή, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ιόντων στο νερό, η πτώση του ηλεκτρικού δυναμικού των αργιλικών πλακιδίων με την απόσταση είναι εντονότερη από ότι στην περίπτωση που οι πόροι πληρούνται με γλυκό νερό. Το πάχος της διπλής στρώσης είναι μικρότερο, με συνέπεια την ισχυρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων.

Στην περίπτωση που το ιζήμα αυτό βρεθεί πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εκπλυθεί με γλυκό νερό, π.χ. από τον υδροφόρο ορίζοντα, τότε θα παρατηρηθούν τα κάτωθι:

- Η αλατότητα του νερού των πόρων θα μειωθεί
- Οι διπλές στρώσεις θα αυξηθούν σε μέγεθος
- Θα τείνουν να απομακρύνουν τα αργιλικά πλακίδια, δηλαδή να μειώσουν τη διατμητική τους αντοχή (ευαίσθητες άργιλοι).

Συνέπεια της δράσης των διπλών στρώσεων και των ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων είναι και η προκύπτουσα «ανοικτή» δομή της αργίλου, που εμφανίζει σημαντικό ποσοστό κενών.

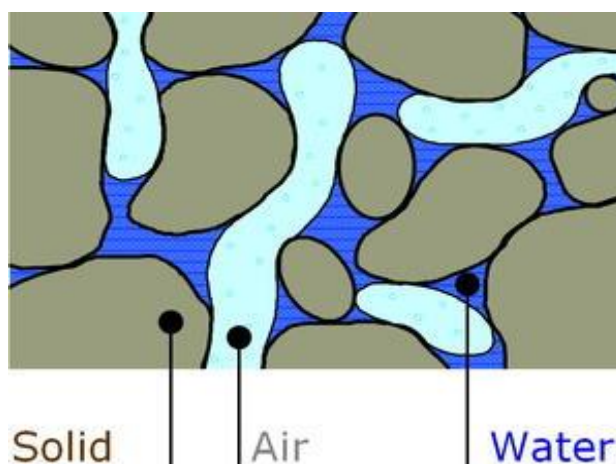


Σχήμα 5: Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων.
[Πηγή: Καβαδάς Μ.,2006]

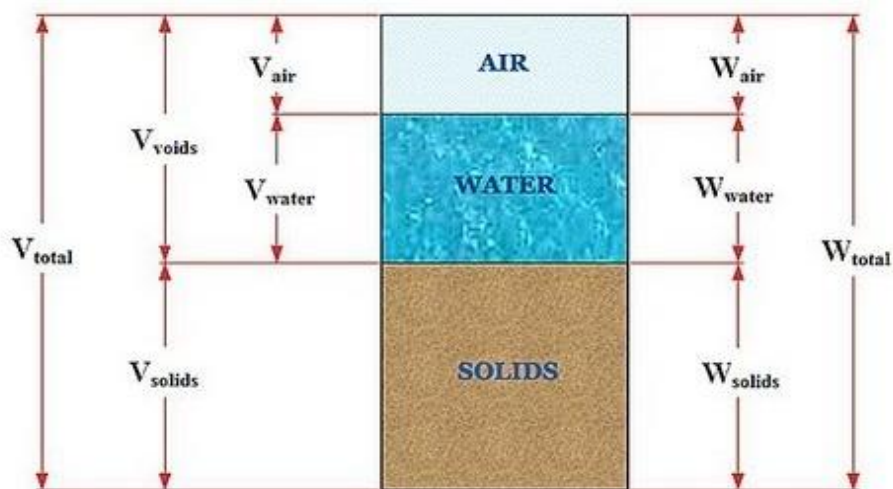
1.2.3. Φάσεις του εδάφους

Το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό, που αποτελείται αφενός μεν από στερεούς κόκκους αφετέρου δε από τα κενά (πόρους) που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων και περιέχουν νερό ή/και αέρα.

Το Σχήμα 6 και 7 παρουσιάζουν τις τρεις φάσεις ενός εδαφικού υλικού. Ο συνολικός όγκος V του εδάφους αποτελείται από τον όγκο V_s που καταλαμβάνουν οι στερεοί κόκκοι και τον όγκο V_v των πόρων. Ο όγκος των πόρων πληρούται από νερό (με όγκο V_w) και αέρα (με όγκο V_a). Οι αντίστοιχες μάζες (M) ή ισοδύναμα, τα βάρη (W) των ανωτέρω ποσοτήτων είναι: W (ολική μάζα), W_s (μάζα στερεών κόκκων), W_w (μάζα νερού των πόρων) και W_a (μάζα του αέρα των πόρων). Στα επόμενα η μάζα του αέρα των πόρων αμελείται, επειδή η πυκνότητα του αέρα είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις πυκνότητες των υπολοίπων μεγεθών (στερεών κόκκων και νερού).



Σχήμα 6: Φάσεις των εδαφικών υλικών
[Πηγή: <http://www.uibk.ac.at/dk-cim/projects/hofstette>]



Σχήμα 7: Φάσεις εδαφικών υλικών
[Πηγή: <http://ChinChatComics.com>]

Με βάση τα προαναφερόμενα μεγέθη, ορίζονται οι εξής χρήσιμες ποσότητες:

- ✚ **Πορώδες:** είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του εδάφους και δίνεται από την σχέση:

$$n = \frac{V_V}{V} \quad (1.1)$$

Το πορώδες συχνά εκφράζεται και σαν ποσοστό επί τοις εκατό. Το πορώδες μπορεί να κυμαίνεται από το 0 έως το 1. Ωστόσο, στην πράξη έχει την δυνατότητα να κυμανθεί από 20% έως 80%.

- ✚ **Δείκτης πόρων ή κενών:** είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών κόκκων και εκφράζεται με την σχέση:

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad (1.2)$$

Ο δείκτης κενών ή πόρων λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1. Το πορώδες και ο δείκτης πόρων συσχετίζονται ως εξής:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1.3)$$

ή

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (1.4)$$

- ✚ **Βαθμός κορεσμού:** είναι ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον όγκο των κενών και δίνεται από τον τύπο:

$$S = \frac{V_W}{V_V} \quad (1.5)$$

Ο βαθμός κορεσμού εκφράζει το ποσοστό (συνήθως επί τοις εκατό) του όγκου των πόρων που πληρούται με νερό. Οι πιθανές τιμές του βαθμού κορεσμού ενός εδαφικού υλικού κυμαίνονται μεταξύ 0 και 100%. Ένα ξηρό εδαφικό υλικό έχει βαθμό κορεσμού μηδέν, ενώ ένα εδαφικό υλικό του οποίου το σύνολο των πόρων πληρούται με νερό (κορεσμένο) έχει βαθμό κορεσμού 1 (100%).

- ✚ **Ποσοστό υγρασίας:** είναι ο λόγος της μάζας του νερού των πόρων προς τη μάζα των στερεών κόκκων:

$$w = \frac{W_W}{W_S} \quad (1.6)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συχνά εκφράζεται και επί τοις εκατό. Το ποσοστό υγρασίας ενός ξηρού εδαφικού υλικού είναι μηδέν. Το ποσοστό υγρασίας ενός (υγρού) εδαφικού υλικού υπολογίζεται με την εξής μέθοδο: ένα δείγμα του εδάφους ζυγίζεται στη φυσική του κατάσταση (μάζα W_1) και αφού ξηρανθεί σε κατάλληλο κλίβανο, ώστε να εξατμισθεί το σύνολο του νερού των πόρων (μάζα W_2). Στη συνέχεια, το ποσοστό υγρασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad (1.7)$$

ή

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2} * 100 \quad (\%) \quad (1.8)$$

✚ **Ολικό ειδικό βάρος:** είναι το ολικό βάρος του εδαφικού υλικού (στερεά και υγρή φάση) διαιρεμένο με τον ολικό του όγκο, δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \quad (1.9)$$

$$\gamma_t = \frac{W_w + W_s}{V_v + V_s} \quad (1.10)$$

Σε περίπτωση που όλα τα κενά έχουν καταλειφθεί πλήρως με νερό τότε το ολικό βάρος καλείται κορεσμένο ειδικό βάρος και συμβολίζεται: $\gamma_{κορ}$ ή γ_{sat}

✚ **Ξηρό ειδικό βάρος:** είναι το βάρος της στερεάς φάσης διαιρούμενο με τον ολικό όγκο και δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1.11)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται πολύ χρήσιμος ορισμός διότι εκφράζει το βαθμό συμπύκνωσης ενός εδάφους ο οποίος σχετίζεται έμμεσα με τις μηχανικές ιδιότητες.

✚ **Ειδικό βάρος στερεών:** είναι το βάρος της στερεάς φάσης διαιρούμενο με τον όγκο της.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1.12)$$

✚ **Ειδικό βάρος του νερού:** είναι κατά τον συνήθη ορισμό:

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 10 \text{ kN/m}^3 \quad (1.13)$$

✚ **Ειδική πυκνότητα:** είναι ο λόγος του ειδικού βάρους των στερεών προς το ειδικό βάρος του νερού και δίνεται από την σχέση:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (1.14)$$

Στην συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 2 με τις τιμές της ειδικής πυκνότητας για σημαντικά ορυκτά.

Ορυκτό	Ειδική πυκνότητα G_s
Χαλαζίας	2.65
Καολινίτης	2.6
Ιλλίτης	2.8
Μοντοριλλονίτης	2.65~2.80
Αλλουϊσίτης	2.00~2.55
Χλορίτης	2.6~2.9
Βιοτίτης	2.8~3.2
Μοσχοβίτης	2.76~3.1

Πίνακας 2: Τιμές ειδικής πυκνότητας για σημαντικά ορυκτά.
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

Στον Πίνακα 3 δίνονται μερικές τυπικές τιμές των θεμελιωδών μεγεθών για διάφορα εδαφικά υλικά.

Θεμελιώδη μεγέθη	Τυπικές τιμές
Πορώδες:	Άμμοι: 0,30 έως 0,50 Άργιλοι: 0,20 έως 0,60 (ή και υψηλότερο)
Δείκτης πόρων:	Άμμοι: 0,40 έως 1,00 Άργιλοι: 0,30 έως 1,50 (ή και υψηλότερος)
Βαθμός κορεσμού:	0 έως 1
Ποσοστό υγρασίας:	Άμμοι: 0 έως 0,40 (40%) Άργιλοι: 0 έως 1 (100%)
Πυκνότητα εδαφικού υλικού (σε Mg/m^3):	Άμμοι και χάλικες: 1,70 έως 2,40 Πλείς και άργιλοι: 1,40 έως 2,10 Οργανικά και ευαίσθητες άργιλοι: 1,00 έως 1,60

Πίνακας 3: Τυπικές τιμές των θεμελιωδών μεγεθών για διάφορα εδαφικά υλικά.
[Πηγή: Καββαδάς Μ., 2006]

Σημείωση: Για όλους τους τύπους εδαφών (πλην οργανικών): $\rho_s = 2,50 - 2,80 \text{ Mg/m}^3$. Τα οργανικά εδάφη μπορεί να έχουν πυκνότητα στερεών κόκκων πολύ μικρότερη από $2,50 \text{ Mg/m}^3$.

1.3. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗ-ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Τα κυριότερα φυσικά χαρακτηριστικά των μη-συνεκτικών ή αμμωδών ή κοκκωδών ή χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών είναι:

- Η σχετική πυκνότητα
- Η κοκκομετρική διαβάθμιση.

Στην συνέχεια του εδαφίου θα αναλυθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά.

1.3.1. Σχετική πυκνότητα

Ένα συγκεκριμένο μη-συνεκτικό εδαφικό υλικό έχει την δυνατότητα να εμφανίζεται στην φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων (e). Οι τιμές των πόρων εξαρτώνται από την εκάστοτε διάταξη – δομή των κόκκων που έχει το έδαφος. Η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων με το μέγιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη βραδεία απόθεση μιας άμμου μέσα στο νερό με συνθήκες αντίστοιχες με αυτές της ιζηματογένεσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι πρόσφατες αποθέσεις άμμων να τείνουν να έχουν πυκνότητες που προσεγγίζουν την ελάχιστη πυκνότητα. Η πλέον πυκνή διάταξη των κόκκων με το ελάχιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με παρατεταμένη και έντονη δόνηση της άμμου, που προκαλεί συμπίκνωση με την επαναδιάταξη των κόκκων της σε πυκνότερη δομή.

Συμπερασματικά λοιπόν, τόσο η ελάχιστη όσο και η μέγιστη πυκνότητα είναι συμβατικά μεγέθη και αναφέρονται σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές όπως για παράδειγμα τρόπο απόθεσης ή συγκεκριμένος τρόπο δόνησης μιας άμμου. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν μια άμμος να υπάρξει στη φύση σε κατάσταση με πυκνότητα μικρότερη από την ελάχιστη ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη συμβατική. Ένα χρήσιμο μέγεθος για το χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητα είναι η λεγόμενη σχετική πυκνότητα (D_r), η οποία ορίζεται ως εξής:

✚ **Σχετική πυκνότητα:** χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός αμμώδους εδάφους προς την πυκνότητα του επί τόπου, δίνεται από την σχέση:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} (\%) \quad (1.15)$$

Όπου:

- e = πραγματικός δείκτης πόρων
- e_{max} = το πορώδες στην πιο χαλαρή κατάσταση
- e_{min} = το πορώδες στην πιο πυκνή κατάσταση

Οι τιμές της μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας μιας άμμου εξαρτώνται από το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών της. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία μεγεθών των κόκκων και όσο πιο σφαιρικοί είναι οι κόκκοι σε ένα αμμώδη εδαφικό σχηματισμό, τόσο η ελάχιστη και η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγαλύτερες. Η τιμή του D_r κυμαίνεται από 0 για πολύ χαλαρό έδαφος έως 1 για πολύ πυκνό έδαφος. Στον Πίνακα 4 καταγράφεται η ποιοτική περιγραφή κοκκωδών εδαφών επί τόπου.

Σχετική πυκνότητα D_r (%)	Περιγραφή εδάφους επί τόπου
0-15	Πολύ χαλαρό
15-50	Χαλαρό
50-70	Μέσο
70-85	Πυκνό
85-100	Πολύ πυκνό

Πίνακας 4: Ποιοτική περιγραφή κοκκωδών εδαφών επί τόπου
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

Τύπος εδάφους	Δείκτης πόρων (e)	Φυσική υγρασίας σε κατάσταση κορεσμού w(%)	Ξηρό ειδικό βάρος γ_d (kN/m ³)
Χαλαρή ομοιόμορφη άμμος	0.8	30	14.5
Πυκνή ομοιόμορφη άμμος	0.45	16	18
Χαλαρή ιλυώδης άμμος με γωνιώδεις κόκκους	0.65	25	16
Πυκνή ιλυώδης άμμος με γωνιώδεις κόκκους	0.4	15	19
Σκληρή άργιλος	0.6	21	17
Μαλακή άργιλος	0.9-1.4	30-50	11.5-14.5
Μαλακή οργανική άργιλος	2.5-3.2	90-120	6-8

Πίνακας 5: Δείκτης πόρων και ξηρού ειδικού βάρους μερικών τυπικών εδαφών στη φυσική τους κατάσταση.
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

1.3.2. Κοκκομετρική διαβάθμιση

Το μέγεθος και η ποικιλία των κόκκων που απαρτίζουν ένα δείγμα εδαφικού υλικού επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά του. Ιδιαίτερα τα μη-συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που είναι αναγκαίο να αναλυθούν στα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών.

Η ποικιλία που παρουσιάζουν οι κόκκοι στο μέγεθός τους είναι ευρύτατη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι χάλικες οι οποίοι αποτελούνται από κόκκους μεγέθους αρκετών εκατοστών, ενώ οι άργιλοι περιέχουν κόκκους μεγέθους μικρότερου του ενός μικρού (μm), δηλαδή περισσότερο από 10000 φορές μικρότερους από τους κόκκους των χάλικων. Ωστόσο, οι μέθοδοι κατάταξης των εδαφών με βάση το μέγεθος των κόκκων τους

ποικίλουν. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει την κατάταξη που προτείνουν οι Βρετανικοί Κανονισμοί (British Standards), η οποία τείνει να γίνει γενικά αποδεκτή στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα.

Κατηγορία	Υποκατηγορία	Μέγεθος κόκκων	
		Από	Έως
Χάλικες	Χονδρόκοκκοι	60	20
	Μεσόκοκκοι	20	6
	Λεπτόκοκκοι	6	2
Άμμοι	Χονδρόκοκκοι	2	0.6
	Μεσόκοκκοι	0.6	0.2
	Λεπτόκοκκοι	0.2	0.06
Ίλεις	Χονδρόκοκκοι	0.06	0.02
	Μεσόκοκκοι	0.02	0.006
	Λεπτόκοκκοι	0.006	0.002
Άργιλοι	-	<0.002	-

Πίνακας 6: Κατάταξη με βάση το μέγεθος των κόκκων (Βρετανικός Κανονισμός)
[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

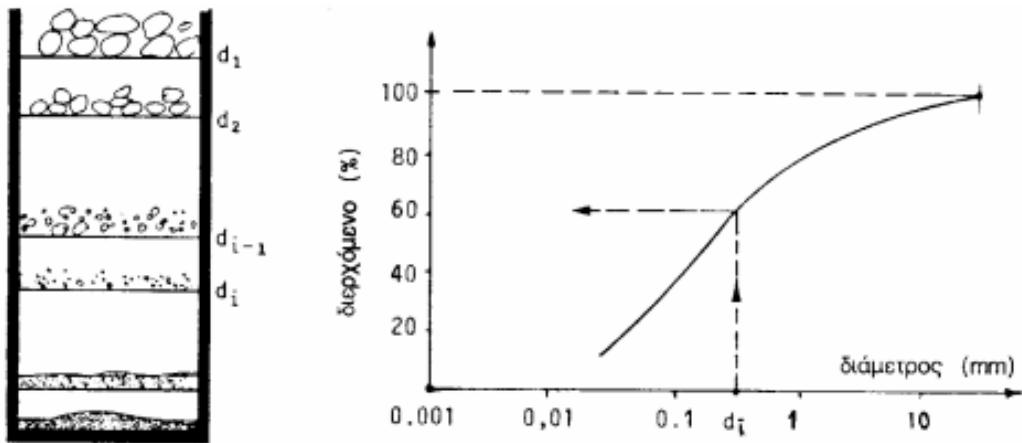
Ο προσδιορισμός της κατανομής των μεγεθών κόκκων των εδαφικών υλικών πραγματοποιείται είτε με την μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα, η οποία χρησιμοποιείται για χάλικες και άμμους είτε με την μέθοδο κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο, η οποία χρησιμοποιείται για ίλεις και άργιλους.

Η ανάλυση με κόσκινα γίνεται με τη μηχανική δόνηση δείγματος του εδαφικού υλικού διαμέσου σειράς κοσκίνων με βαθμιαία μικρότερη διάσταση οπής και τη μέτρηση του βάρους του υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο. Τα πρότυπα μεγέθη, των κοσκίνων ποικίλουν.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν την Αμερικανική Προδιαγραφή ASTM D422-1980. Ο κωδικός και η διάσταση της οπής των κοσκίνων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 7.

Αριθμός κοσκινού (No)	Διαστάσεις οπής (mm)
4	4.75
10	2
20	0.85
40	0.425
60	0.25
100	0.15
140	0.106
200	0.075

Πίνακας 7: Αριθμοί προτύπων αμερικανικών κοσκίνων με τα αντίστοιχα ανοίγματα
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]



Σχήμα 8: Κοκκομέτρηση εδαφών με κόσκινα
(Καββαδάς Μ.,2006)

Τονίζεται ότι το κόσκινο No200 αντιστοιχεί στο συμβατικό όριο μεταξύ αμμών και ιλών με τιμή 0.06mm. Η κατασκευή και χρήση κοσκίων για την κοκκομέτρηση εδαφών με μεγέθη κόκκων μικρότερα από το No200 δεν είναι πρακτική. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών να πραγματοποιείται με τη μέθοδο του αραιομέτρου, η οποία προαναφέρθηκε στην αρχή του εδαφίου.

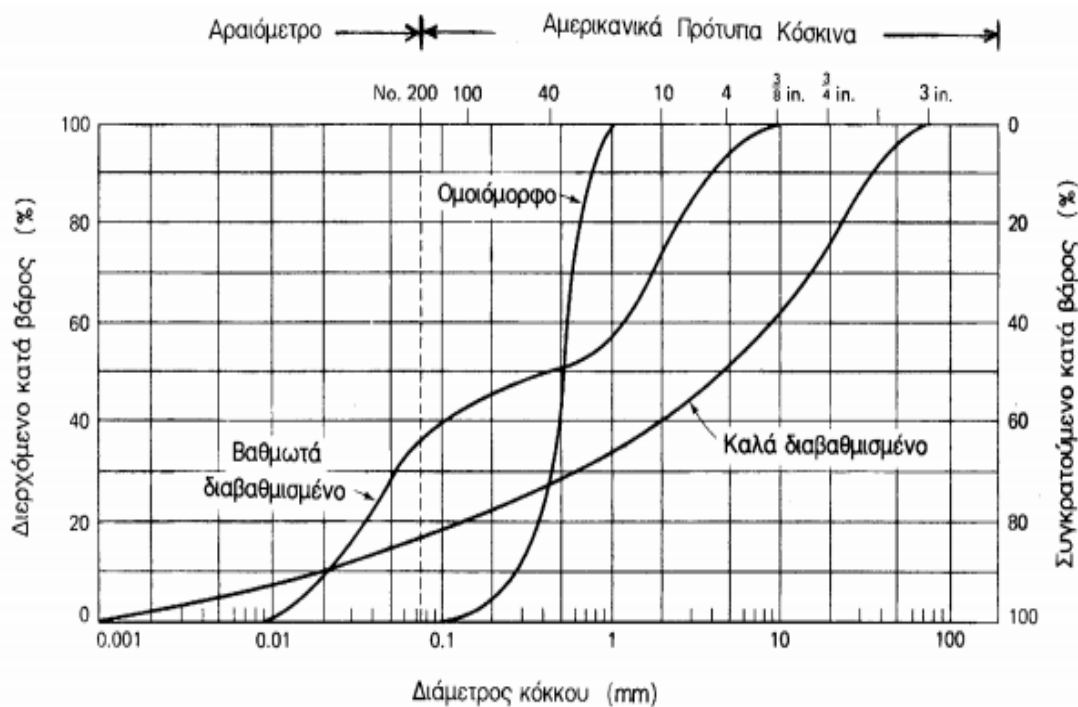
Η μέθοδος του αραιομέτρου βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του. Η ταχύτητα καθίζησης προσδιορίζεται από την σχέση:

$$V = \frac{\rho_s * \rho_w}{18 * n} * D^2 \quad (1.16)$$

Όπου:

- V= ταχύτητα καθίζησης
- ρ_s =πυκνότητα εδαφικών κόκκων
- ρ_w =πυκνότητα νερού
- n = ιξώδες νερού
- D =διάμετρος εδαφικών κόκκων

Η μέθοδος του αραιομέτρου έχει στόχο την μέτρηση της πυκνότητας του μίγματος νερού – εδάφους για διαφόρους χρόνους. Επιπλέον, προσδιορίζεται η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων του εδαφικού υλικού, από την οποία προκύπτει η κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός εδαφικού υλικού, όπως προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα και το αραιόμετρο, παρουσιάζεται συνήθως σε ένα διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης ως προς το μέγεθος του κόκκου. Το διάγραμμα αυτό δίνεται σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 9: Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών
[Πηγή: Καραγιάννης Κ., 2014]

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες ενός εδάφους με ομοιόμορφους κόκκους και ενός καλά διαβαθμισμένου εδάφους, δηλαδή με ποικιλία κόκκων.

Από το Διάγραμμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχήμα 9) υπάρχει η δυνατότητα να προσδιορισθούν ποσοτικά μεγέθη ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως:

- Το εύρος των διαμέτρων των κόκκων ενός εδαφικού υλικού
- Το ποσοστό (κατά βάρος) του υλικού που είναι μικρότερο από κάποια συγκεκριμένη διάμετρο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως υπολογίζονται η διάμετρος D_{10} , δηλαδή το μέγεθος κόκκου από τον οποίο 10% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος και η διάμετρος D_{60} , δηλαδή το μέγεθος κόκκου από τον οποίο 60% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος.

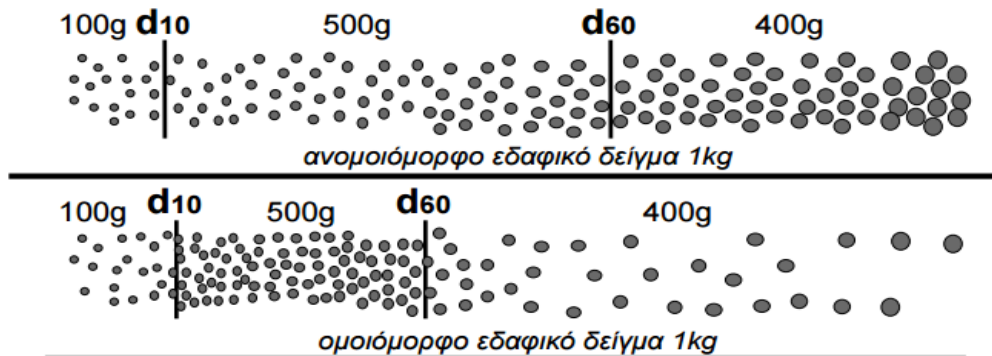
Με βάση τα ανωτέρω, ορίζεται και ο συντελεστής ανομοιομορφίας που εκφράζει συνοπτικά την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού και δίνεται από την σχέση:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1.17)$$

$C_u = 1 \rightarrow$ Εδαφικό υλικό με ομοιόμορφους κόκκους

$C_u > 5 \rightarrow$ Εδαφικό υλικό με μεγάλη ποικιλία μεγεθών κόκκων

$C_u < 5 \rightarrow$ Εδαφικό υλικό με σχετικά ομοιόμορφους κόκκους



Σχήμα 10: Απεικόνιση ανομοιόμορφου και ομοιόμορφου εδαφικού δείγματος 1kg
 [Πηγή: Μαραγκός Ν., 2009]

Συμπερασματικά λοιπόν, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ανομοιομορφίας, τόσο μεγαλύτερη ποικιλία κόκκων περιέχει το εδαφικό υλικό και τόσο καλύτερη είναι η κοκκομετρική του διαβάθμιση.

Ο συντελεστής καμπυλότητας εκφράζει ποσοτικά αν υπάρχουν ενδιάμεσα μεγέθη κόκκων που λείπουν από το έδαφος και δίνεται από την σχέση:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (1.18)$$

Τονίζεται ότι η διαβάθμιση του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του υλικού που εκφράζουν τη μηχανική συμπεριφορά του. (Καββαδας Μ., 2006 ; Βγενοπούλου Ε., 2004 ; Καραγιάννης Κ., 2014)

1.4. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά των μη - συνεκτικών εδαφών όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο είναι η σχετική πυκνότητα και η κοκκομετρική διαβάθμιση. Έτσι σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά υπάρχει η δυνατότητα να γίνει μια πρώτη, αδρή εκτίμηση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών.

Στα συνεκτικά ή αργιλικά ή λεπτόκοκκα υλικά ο προσδιορισμός των προαναφερόμενων φυσικών χαρακτηριστικών δεν είναι εύκολα εφικτός, αυτό συμβαίνει διότι το μέγεθος των κόκκων τους είναι πολύ μικρό. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού.

Για τους προαναφερόμενους λόγους τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά των συνεκτικών εδαφών είναι τα ακόλουθα:

- Το ποσοστό υγρασίας
- Τα όρια Atterberg.

Ωστόσο, αναφέρθηκε ότι η παρουσία του νερού στους πόρους ενός εδαφικού υλικού επηρεάζει τη μηχανική του συμπεριφορά. Η επιρροή αυτή είναι καθοριστική για τα συνεκτικά εδάφη. Το Σχήμα 11 παρουσιάζει τη βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός συνεκτικού εδάφους με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας.



Σχήμα 11: Βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός συνεκτικού εδάφους με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας.

[Πηγή: <http://www.pavetest.gr>]

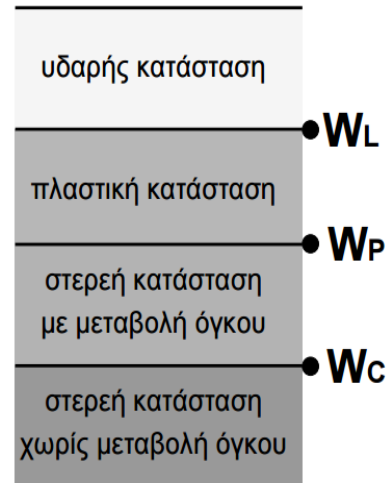
Είναι σαφές ότι, όσο αυξάνει το ποσοστό της υγρασίας, τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού και η συμπεριφορά του προσομοιάζει τη συμπεριφορά των ρευστών.

Σύμφωνα με τις πειραματικές μελέτες διακρίνονται τέσσερις καταστάσεις στις οποίες ένα συνεκτικό εδαφικό υλικό μπορεί να μεταπίπτει διαδοχικά με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας. Οι καταστάσεις αυτές είναι οι κάτωθι:

- ✚ **Εύθρυπτο στερεό:** Στην κατάσταση αυτή το έδαφος παρουσιάζει μεγάλο δείκτη δυσκαμψίας (δηλαδή μικρές παραμορφώσεις) και η θραύση του είναι απότομη και ψαθυρή. Ποιοτικά, η συμπεριφορά του είναι ανάλογη με άλλα ψαθυρά υλικά, όπως π.χ. το σκυρόδεμα.
- ✚ **Ημιστερεό:** Είναι μια μεταβατική κατάσταση μεταξύ της προηγούμενης (του εύθρυπτου στερεού) και της επόμενης (του πλάστιμου στερεού) με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά.
- ✚ **Πλάστιμο στερεό:** Στην κατάσταση αυτή το έδαφος μπορεί να πλάθεται, δηλαδή να υφίσταται σημαντικές πλαστικές (μη-αντιστρεπτές) παραμορφώσεις χωρίς ρηγματώσεις και θραύση (θρυμματισμό). Ο δείκτης δυσκαμψίας του μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας.
- ✚ **Παχύρευστο υγρό:** Στην κατάσταση αυτή το έδαφος δεν μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχιζόμενη παραμόρφωση (ροή). Στο κάτω όριο (μικρά ποσοστά υγρασίας) της κατάστασης αυτής το έδαφος παρουσιάζει χαρακτηριστικά ερπυσμού, η συμπεριφορά του, όμως με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας γρήγορα εξελίσσεται σε πραγματική ροή.

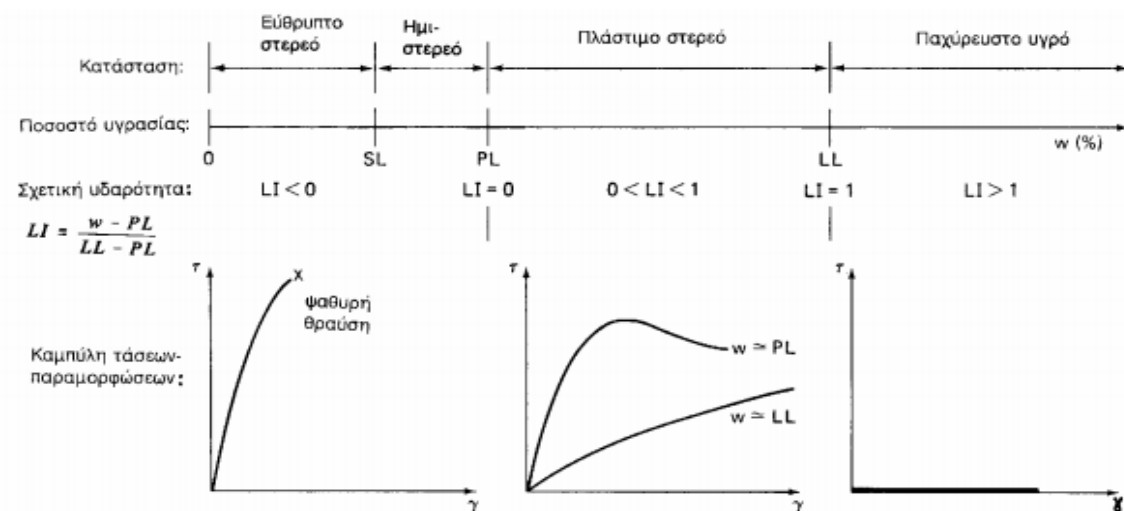
Τα ποσοστά υγρασίας που αντιστοιχούν στα όρια μεταξύ των ανωτέρω τεσσάρων καταστάσεων ονομάζονται:

- **Όριο συρρίκνωσης** → W_c ή SL : η μέγιστη ποσότητα του νερού %, η οποία αν μειωθεί ο όγκος του εδαφικού υλικού παραμένει σταθερός
- **Όριο πλαστικότητας** → W_p ή PL : η μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία το εδαφικό δείγμα αρχίζει να θρυμαμτίζεται όταν πλάθεται σε κυλινδρικά λεπτά νήματα (διαμέτρου 3.2mm).
- **Όριο υδαρότητας** → W_L ή LL : η περιεχόμενη ποσότητα υγρασίας, με την οποία το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην υδαρή κατάσταση και πλέον οι ιδιότητές του προσομοιάζουν περισσότερο με αυτές των υγρών.



Σχήμα 12: Όρια Atterberg.
[Πηγή:Μαραγκός Ν., 2009)

Τα όρια αυτά, που συνοπτικά λέγονται όρια Atterberg, αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε συνεκτικού υλικού και προσδιορίζονται με πρότυπες δοκιμές.



Σχήμα 13: Βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών, τη μορφή της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων σε δοκιμή διάτμησης ενός συνεκτικού εδάφους με την αύξηση του ποσοστού της υγρασίας.

[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

Θα πρέπει να τονιστεί ότι και δύο (ακραίες) καταστάσεις οι οποίες είναι χαρακτηριστικές της δυνατότητας μεταβολής της συμπεριφοράς των αργιλικών εδαφών με τη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας.

❖ 1^η Κατάσταση:

Στην περίπτωση που αφαιρεθεί το συνολικό νερό από τους πόρους μιας αργίλου, τότε η άργιλος συμπεριφέρεται σαν πραγματικό στερεό με μεγάλη μάλιστα αντοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κεραμικά είδη, όπως τούβλα, κεραμίδια κ.τ.λ. θα

πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση της συνολικής αφαίρεσης του νερού από τους πόρους, τα πλακίδια της αργίλου έχουν πλησιάσει πάρα πολύ και έχουν αναπτυχθεί μεταξύ τους ισχυρότατες ελκτικές ηλεκτροχημικές δυνάμεις τύπου Van der Waals. Οι δυνάμεις αυτές είναι τόσο ισχυρές, ώστε να μην επιτρέπουν πλέον την προσρόφηση νερού στα κενά της αργίλου και την αύξηση του όγκου των κενών (διόγκωση του υλικού). Πράγματι, τα (καλά) κεραμικά δεν χάνουν την αντοχή τους και δεν θρυμματίζονται όταν εκτεθούν στο νερό.

❖ 2^η Κατάσταση:

Στην περίπτωση της υδαρής κατάσταση ενός μίγματος νερού και αργιλικού υλικού δίνεται η απάντηση στον πυθμένα των θαλασσών κοντά στις εκβολές μεγάλων ποταμών και αποτελεί το πρώτο στάδιο της ιζηματογένεσης. Τα πλακίδια της αργίλου στην κατάσταση αυτή βαθμιαία καθιζάνουν με την οριακή ταχύτητα κατά το νόμο του Stokes. Αυτό συμβαίνει διότι τα πλακίδια έχουν πολύ μικρό μέγεθος με αποτέλεσμα η οριακή ταχύτητα να είναι πολύ μικρή και η διαδικασία να διαρκέσει επί εκατοντάδες χρόνια.

Η φυσική σημασία των ορίων Atterberg έγκειται στο ότι τα συνεκτικά εδάφη έχουν την ιδιότητα να προσροφούν στην επιφάνεια των αργιλικών τους πλακιδίων νερό, το οποίο συνδέεται ισχυρά με το συγκεκριμένο πλακίδιο χωρίς να μειώνει το βαθμό της ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλακιδίων, με συνέπεια να μη μειώνεται ουσιαστικά και η μηχανική τους αντοχή. Προφανώς, η παραπάνω δυνατότητα προσρόφησης νερού χωρίς σημαντική απώλεια αντοχής δεν είναι απεριόριστη. Ωστόσο, το μέγιστο ποσοστό υγρασίας έχει την δυνατότητα να προσροφηθεί στην επιφάνεια των πλακιδίων χωρίς να αλλάξει η κατάσταση του εδαφικού υλικού (στερεά, ημιστερεά, πλάστιμη και υδαρής) καθορίζει τα όρια Atterberg.

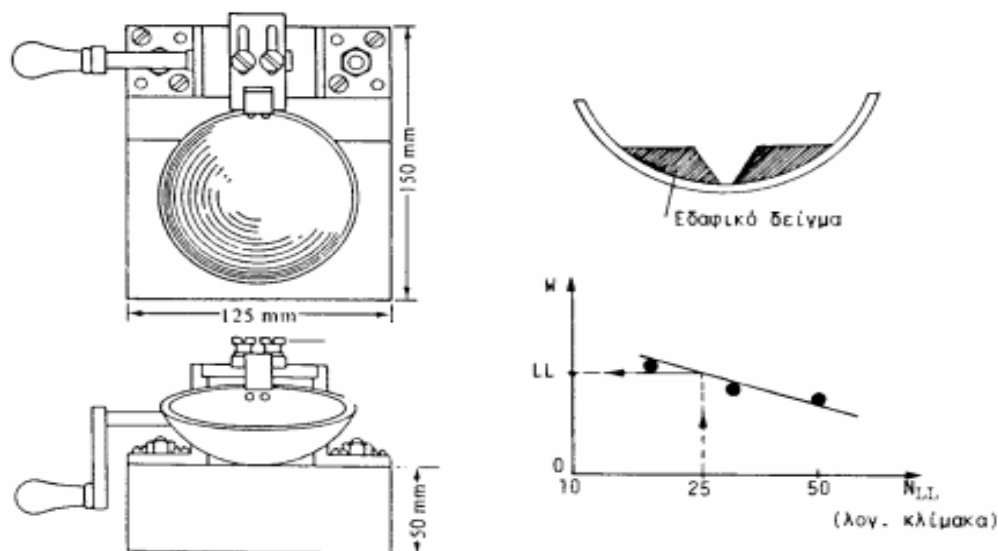
Άρα στην περίπτωση που ένα εδαφικό υλικό Α έχει μεγαλύτερη τάση να προσροφά νερό στην επιφάνεια των αργιλικών του πλακιδίων από ότι το εδαφικό υλικό Β, τότε το ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος Α μεταπίπτει στην υδαρή κατάσταση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας του εδάφους Β, δηλαδή το έδαφος Α έχει μεγαλύτερο όριο υδαρότητας από το Β. Είναι προφανές ότι το ίδιο σκεπτικό μπορεί να εφαρμοσθεί και στα υπόλοιπα όρια Atterberg.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν ορίζονται οι λεγόμενοι δείκτες συνεκτικότητας και συγκεκριμένα έχουμε:

✚ **Δείκτης πλαστικότητας:** εκφράζει το εύρος της πλάστιμης περιοχής, δηλαδή το εύρος της περιοχής (μετρούμενης σε ποσοστά υγρασίας) στην οποία το εδαφικό υλικό συμπεριφέρεται σαν πλάστιμο στερεό και δίνεται από την σχέση:

$$PL = w_L - w_p \quad (1.19)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο περισσότερο ενεργά είναι τα αργιλικά πλακίδια του εδαφικού υλικού, δηλαδή όσο περισσότερο νερό μπορεί να προσροφηθεί στην επιφάνεια τους χωρίς να μειωθεί ο βαθμός της ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλακιδίων τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστικότητας.



Σχήμα 14: Η συσκευή Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Λειτουργία συσκευής: το εδαφικό δείγμα αναμειγνύεται με αποσταγμένο νερό μέχρι να γίνει πολτός και τοποθετείται στο ορειχάλκινο κύπελλο της συσκευής και ισοπεδώνεται. Στην συνέχεια γίνεται μια εγκοπή με ειδικό εργαλείο και με την βοήθεια μηχανισμού το κύπελλο ανυψώνεται και πέφτει με ρυθμό δύο κτύπους το δευτερόλεπτο. Δημιουργείται διάγραμμα με συντεταγμένες την υγρασία και τον αριθμό των κτύπων σε ημιλογαριθμική κλίμακα με σκοπό τον προσδιορισμό της υγρασίας που απαιτείται για να κλείσει η χαραγή στους 25 κτύπους.

[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

Βαθμός πλαστικότητας	PL
Μη πλαστικό	0
Ελαφρά πλαστικό	1-5
Μικρής πλαστικότητας	5-10
Μέσης πλαστικότητας	10-20
Μεγάλης πλαστικότητας	20-40
Πολύ μεγάλης πλαστικότητας	>40

Πίνακας 8: Η τιμή του δείκτη πλαστικότητας χαρακτηρίζει την πλαστικότητα του εδαφικού υλικού

[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

- ✚ **Ενεργότητα:** Εκφράζεται από τον λόγο του δείκτη πλαστικότητας (PL) προς το ποσοστό του αργιλικού υλικού. Ο βαθμός πλαστικότητας για συγκεκριμένο ποσοστό αργιλικού εδάφους
- ✚ **Δείκτης σχετικής υδαρότητας:** που εκφράζει τη σχέση του πραγματικού ποσοστού υγρασίας (w) ως προς το όριο υδαρότητας και δίνεται από τον τύπο:

$$LI = \frac{w_n - w_p}{w_L - w_p} \quad (1.20)$$

Ο δείκτης υδαρότητας δείχνει πόσο κοντά είναι ένα έδαφος στην υδαρή κατάσταση. Εάν το ποσοστό υγρασίας είναι ίσο με το όριο υδαρότητας τότε $LI = 1$, ενώ εάν είναι ίσο με το όριο πλαστιμότητας $LI = 0$. Οι τιμές του LI μεταξύ 0 και 1 αντιστοιχούν στην πλάστιμη περιοχή, οι τιμές του $LI < 0$ αντιστοιχούν στην ημιστερεά και στερεά κατάσταση, ενώ τιμές του $LI > 1$ στην υδαρή κατάσταση.

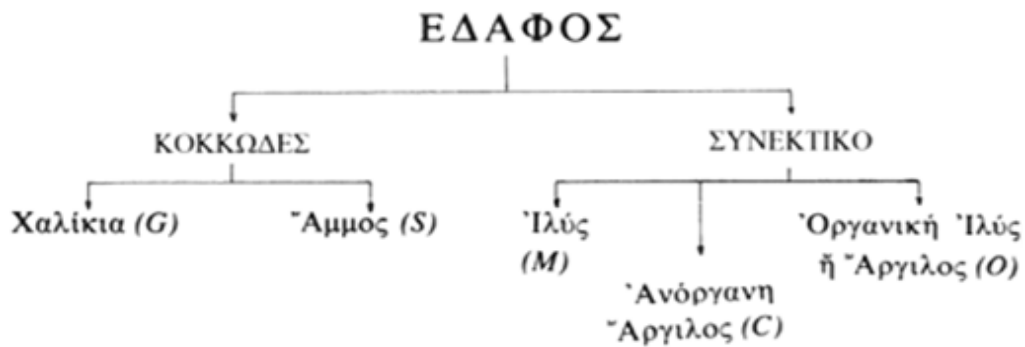
Τονίζεται ότι τα όρια του Atterberg και οι δείκτες συνεκτικότητας που προκύπτουν από πειραματικές μελέτες και έχουν ορισθεί εμπειρικά. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην υπάρχει κάποια θεμελιώδη ποσοτική έννοια, δηλαδή δεν υπάρχει η δυνατότητα να συσχετισθούν απ' ευθείας το πάχος της στρώσης του προσροφημένου νερού. Ωστόσο, αυτό το μειονέκτημα δεν επηρεάζει καθόλου τη χρησιμότητα τους για την ποιοτική περιγραφή των συνεκτικών υλικών καθώς και για την κατάταξη των εδαφών σε κατηγορίες.

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα όρια του Atterberg προσδιορίζονται σε διαταραγμένα - αναμοχλευμένα δείγματα του εδαφικού υλικού και κατά συνέπεια δεν μπορούν να χρησιμεύσουν για την περιγραφή ιδιοτήτων του υλικού που εξαρτώνται από την ύπαρξη δομής, διότι η δομή του υλικού καταστρέφεται κατά την αναμόχλευση που προηγείται των δοκιμών προσδιορισμού των ορίων Atterberg (Καββαδάς Μ., 2006 ; Βγενοπούλου Ε., 2004).

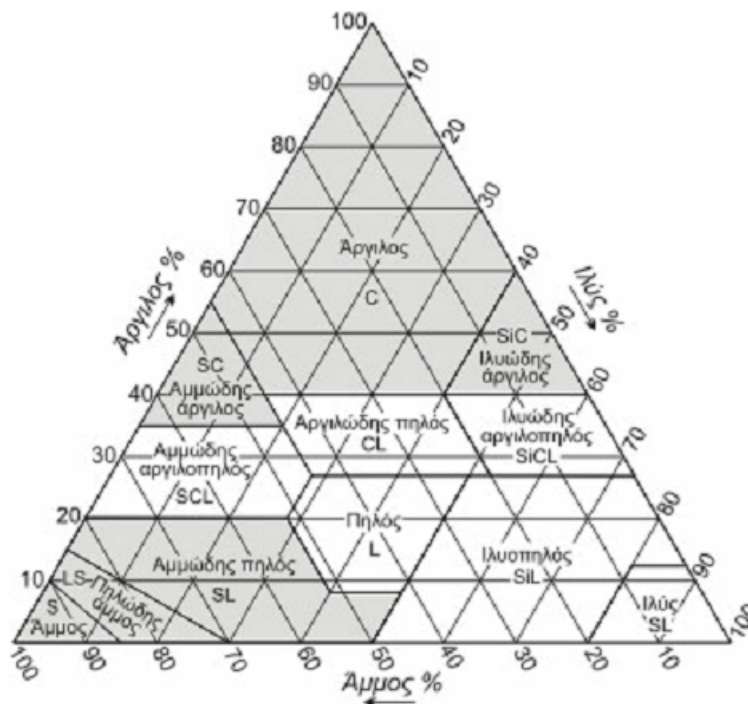
1.5. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Η ταξινόμηση των εδαφών σε κατηγορίες με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες θεωρείται σπουδαία, διότι η κατάταξη αυτού του τύπου πραγματοποιείται με απλές δοκιμές οι οποίες είναι σύντομες και με μικρό κόστος. Για παράδειγμα σε προκαταρκτικές εκτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων εδαφών, η κατάταξη ενός εδαφικού σχηματισμού σε ορισμένη κατηγορία με την εκτέλεση απλών δοκιμών αρκεί για την αρχική εκτίμηση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Αφού λοιπόν, όλα τα εδάφη της ίδιας κατηγορίας έχουν παρόμοιες ιδιότητες, το συγκεκριμένο έδαφος που ανήκει στην κατηγορία αυτή θα έχει και αυτό τις γνωστές ιδιότητες της κατηγορίας. Το μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται ακριβώς στην απλότητά της. Η ανάγκη χρήσης απλών δοκιμών για την κατάταξη σε κατηγορίες περιορίζει την ομοιότητα των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών που κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία με βάση τις απλές αυτές δοκιμές.



Σχήμα 15: Συμβολισμοί κατάταξης εδαφών.
[Πηγή: Χρηστάρας Β.,2002]



Σχήμα 16: Κατάταξη εδαφών
[Πηγή: <https://envimablog.wordpress.com>]

Οι περισσότερες μέθοδοι ταξινόμησης χρησιμοποιούν σαν χαρακτηριστικές δοκιμές:

- Κοκκομέτρηση με κόσκινα
- Δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg

Οι δοκιμές αυτές πληρούν σπουδαίες απαιτήσεις όπως:

- ✓ Απλότητα
- ✓ Ταχύτητα
- ✓ Μικρό κόστος.

Ωστόσο, διάφορες μέθοδοι κατάταξης έχουν προταθεί κατά καιρούς και πολλές από αυτές έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής. Στην Ελλάδα, επικρατέστερη μέθοδος κατάταξης εδαφών είναι η λεγόμενη «Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών» (Unified Soil Classification System). Το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS) χρησιμοποιεί τα ποσοστά του εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο Νο200, το λεγόμενο λεπτόκοκκο κλάσμα και το Νο4 το λεγόμενο αμμόδες κλάσμα.

Βασικός Διαχωρισμός		Σύμβολα	Περιγραφή	Κριτήρια Κατάταξης	
Χονδρόκοκκα εδάφη Περισσότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο Νο 200	Χάλι - κες 50% ή περισσότερα παραμένουν επί του κόσκινου Νο 4	Χάλι - κες	GW	Καλά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα	Κατάταξη με βάση το λεπτόκοκκο κλάσμα $C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $1 < C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$
			GP	Ομοιόμορφοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα	
		Χάλικες με λεπτόκοκκα	GM	Πυκνές χάλικες. Μίγματα χαλικών - άμμου - ιλύος	Διέρχ. από το κόσκινο Νο 200 < 5% GW, GP, SW, SP $PI < 4$ η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A
			GC	Αργιλώδεις χάλικες. Μίγματα χαλικών - άμμου - αργίλου	$PI > 7$ & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A
	Άμμοι 50% ή περισσότερα διέρχονται από το κόσκινο Νο 4	Άμμοι	SW	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα λεπτόκοκκα	Διέρχ. από το κόσκινο Νο 200 > 12% GM, GC SM, SC $C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $1 < C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$
			SP	Ομοιόμορφα άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα	
		Άμμοι με λεπτόκοκκα	SM	Πυκνές άμμοι. Μίγματα άμμου - ιλύος	$PI < 4$ η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A
			SC	Αργιλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου - αργίλου	$PI > 7$ & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A
Λεπτόκοκκα εδάφη Λιγότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο Νο 200	Ίλις και άργιλοι WL < 50%	ML	Ανόργανες ιλεις, πολύ λεπτές άμμοι, ιλυώδεις και αργιλώδεις άμμοι	<p>Διάγραμμα πλαστικότητας</p> <p>Λείκτης πλαστικότητας (Y-axis): 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60</p> <p>Όριο υδαρότητας (X-axis): 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100</p> <p>Γραμμή A (A-line)</p> <p>Γραμμή U (U-line)</p> <p>Πεδία: CL, CH, OL, MH, OH, CL-ML, ML & OL</p>	
		CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας (ενίοτε χαλικώδεις, αμμόδεις ή ιλυώδεις)		
		OL	Οργανικές ιλεις ή ιλυώδεις άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας		
	Ίλις και άργιλοι WL > 50%	MH	Ανόργανες, συχνά μαρμαρυγιακές ιλεις υψηλής πλαστικότητας		
		CH	Ανόργανες άργιλοι υψηλής πλαστικότητας		
		OH	Οργανικές άργιλοι μέσης έως υψηλής πλαστικότητας		
Πολύ οργανικά εδάφη	Pt	Βουρκώδη και τυρφοδή εδάφη	Ινώδη οργανικά γεωυλικά προϊόντα απανθράκωσης		

Πίνακας 9: Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS).

[Πηγή: Παπαδόπουλος Β., Λουπασάκης Κ., 2013]

Τα όρια του Atterberg δίνονται με τη μορφή του «Χάρτη Πλαστιμότητας του Casagrande». Στο Χάρτη Πλαστιμότητας με άξονες το όριο υδαρότητας και το δείκτη πλαστιμότητας, το διάγραμμα χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές με τη λεγόμενη γραμμή-A και τη γραμμή που αντιστοιχεί σε όριο υδαρότητας 50%.

- Άργιλοι (C): συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία πάνω από τη γραμμή-A
- Πλείς (M): εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία κάτω από τη γραμμή-A
- Υψηλής πλαστιμότητας (H):εδάφη που παριστάνονται με σημεία δεξιά από τη γραμμή με LL = 50%
- Χαμηλής πλαστιμότητας (L): εδάφη που παριστάνονται με σημεία αριστερά από τη γραμμή με LL = 50%

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ AASHO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS) (ASTM M-145)											
Γενική κατάταξη	Κοκκώδη υλικά (35% ή λιγότερο διερχόμενα από το κόσκινο No. 200)							Πλοαργιλώδη υλικά (περισσότερο του 35% διερχόμενα από το κόσκινο No. 200)			
Ομάδες	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Κοκκομετρική ανάλυση. % ποσοστό διερχόμενο από: Κόσκινο No. 10 Κόσκινο No. 40 Κόσκινο No. 200	50 max 30 max 15 max	- 50 max 25 max	- 51 min 10 max	- - 35 max	- - 35 max	- - 35 max	- - 35 max	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min
Χαρακτηριστικά κλάσματα εδάφους διερχόμενο από το κόσκινο No 40. -Όριο υδαρότητας LL. -Δείκτης πλαστικότητας PI	- 6 max		- NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Δείκτης ομάδας GI	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max
Συνηθισμένοι τύποι υλικών	Λιθολογία. Χαλίκια και άμμος		Λεπτή άμμος	Πλωδή ή αργιλώδη χαλίκια και άμμοι				Πλωδή εδάφη		Αργιλώδη εδάφη	
Καταλληλότητα σαν υπόβαση	Εξαιρετική έως καλή					Μέτρια έως καλή					

^a Για A-7-5, PI ≤ LL - 30

^b Για A-7-6, PI > LL - 30

Πίνακας 10: Ταξινόμηση εδαφών κατά AASHO

[Πηγή: Χρηστάρας Β., 2002]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS) επικρατεί και χρησιμοποιείται διεθνώς για τη πλειονότητα γεωτεχνικών έργων όπως:

- ✓ Θεμελιώσεις
- ✓ Φράγματα
- ✓ Αεροδιαδρόμους κ.ά.

Το σύστημα θεωρεί ότι η μηχανική συμπεριφορά των χονδρόκοκκων υλικών βασίζεται στο μέγεθος των κόκκων τους ενώ στην περίπτωση των λεπτόκοκκων εδαφών βασίζεται στα χαρακτηριστικά της πλαστικότητας τους.

Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερόμενα τα εδάφη τα οποία έχουν λεπτά συστατικά δεν επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά τους και ταξινομούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κόκκων τους. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση που τα λεπτά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά η ταξινόμηση πραγματοποιείται βάση της πλαστικότητας τους.

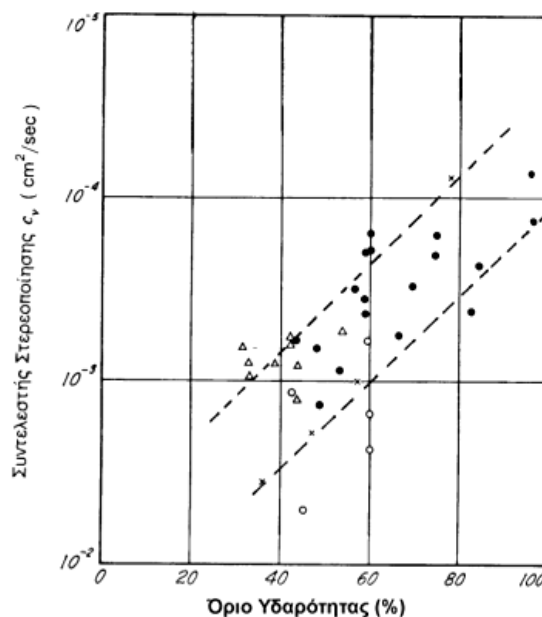
Άρα μόνο η κοκκομετρική καμπύλη και τα όρια Atterberg είναι απαραίτητα για την ταξινόμηση ενός εδάφους στο Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Βγενούλου Ε., 2004).

1.6. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς έχουν προταθεί πολυάριθμες εμπορικές συσχετίσεις μεταξύ των φυσικών χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών. Οι σπουδαιότερες συσχετίσεις παρουσιάζονται στα Σχήματα που ακολουθούν σε αυτό το εδάφιο.

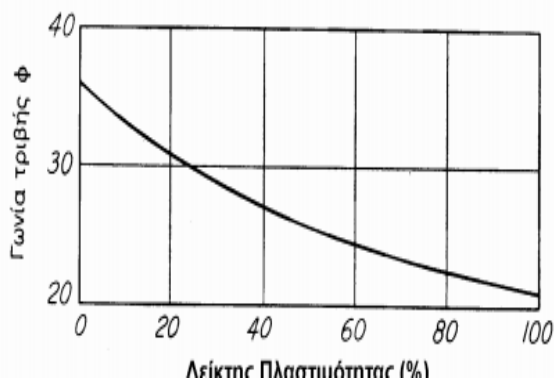
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συσχετίσεις έχουν αναπτυχθεί βάση πειραματικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν για ορισμένους τύπους εδαφών και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτό έχει σαν συνέπεια η γενίκευση των αποτελεσμάτων να οδηγήσει πολλές φορές σε εσφαλμένες εκτιμήσεις και λανθασμένα αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα εδάφη.

Τέλος, οι συσχετίσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνον για προκαταρκτικές εκτιμήσεις και να επαληθεύονται με κατάλληλα πειράματα σε δείγματα του υπό μελέτη εδάφους.



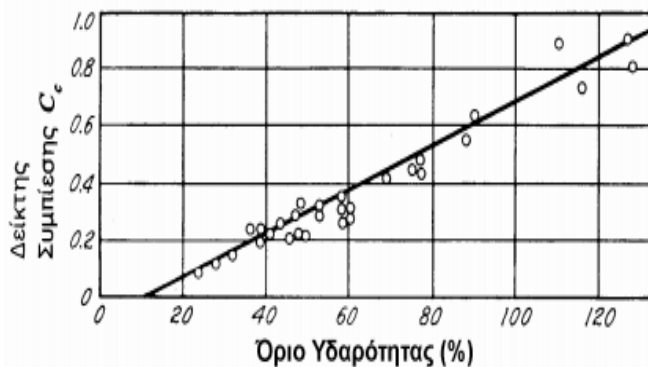
Σχήμα 17: Συσχέτιση ορίου υδαρότητας και συντελεστή στερεοποίησης

[Πηγή: Καββαδάς Μ., 2006]



Σχήμα 18: Συσχέτιση δείκτη και πλαστικότητας και γωνία τριβής φ.

[Πηγή: Καββαδάς Μ., 2006]



Σχήμα 19: Συσχέτιση ορίου υδαρότητας και δείκτη συμπίεσης.

1.7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ – ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΛΑΦΗ	ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΛΑΦΗ
Ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από ορυκτά της αργίλου που σχηματίζονται από φύλλα πυριτίου, αργίλου και μαγνησίου	Ορυκτολογική τους σύσταση είναι ίδια με του πατρικού πετρώματος και αποτελείται συνήθως από χαλαζία, άστριο, πλαγιόκλαστο και ασβεστολιθικά άλατα
Είναι λεπτόκοκκα με κρυσταλλικούς κόκκους μικρότερους από 0.002 mm και σχήμα πλακοειδές ή βελονοειδές ή ραβδοειδές	Είναι χονδρόκοκκα με κόκκους ογκώδεις, μεγέθους λίθου ή χαλκιού που είναι περίπου στρογγυλοί ή γωνιώδεις
Έχουν υψηλή ειδική επιφάνεια	Έχουν χαμηλή ειδική επιφάνεια
Οι κόκκοι συγκρατούνται με ηλεκτρικές δυνάμεις	Οι κόκκοι συγκρατούνται μόνο με δυνάμεις βαρύτητας
Η αντοχή τους εξαρτάται όχι μόνο από την εσωτερική τριβή αλλά κυρίως από την αντοχή μεταξύ των κόκκων	Η αντοχή τους εξαρτάται από την εσωτερική τριβή των κόκκων και χαρακτηρίζεται από την γωνία φ.
Παρουσιάζουν μικρή διαπερατότητα	Παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα
Παρουσιάζουν μακροχρόνιες (έμμεσες ή μη ελαστικές) καθιζήσεις, οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο στερεοποίησης	Παρουσιάζουν άμεσες ελαστικές καθιζήσεις
Η μηχανική τους συμπεριφορά εξαρτάται από την παρουσία νερού.	

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών Συνεκτικών – Μη συνεκτικών εδαφών

[Πηγή: Βγενοπούλου Ε., 2004]

2. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

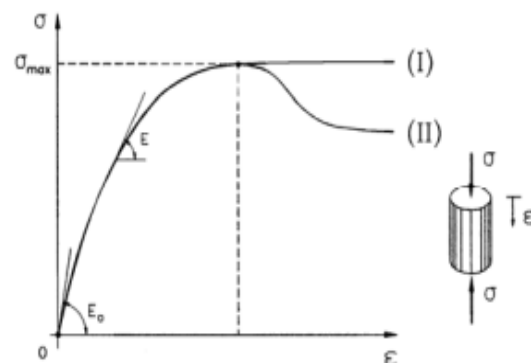
Όταν σε ένα εδαφικό υλικό επιβληθούν εξωτερικά φορτία, αναπτύσσονται τα κάτωθι:

- Εσωτερικές τάσεις
- Παραμορφώσεις.

Δημιουργώντας μια γραφική παράσταση τάσεων παραμορφώσεων υπάρχει η δυνατότητα κατανόησης της συμπεριφοράς των υλικών. Το Σχήμα 2.1 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:

- ✓ σκυρόδεμα
- ✓ χάλυβας
- ✓ πλαστικά υλικά.

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.



Σχήμα 20: Καμπύλη φόρτισης αργίλου
[Πηγή: Καββαδάς Μ.,2006]

Με την συνεχή αύξηση της παραμόρφωσης, το υλικό φθάνει σε μία κατάσταση στην οποία η παραμόρφωση δεν συνοδεύεται πλέον από αντίστοιχη αύξηση της τάσης. Έτσι λοιπόν, η τάση μπορεί:

- (I) Παραμένει σταθερή
- (II) Βαθμιαία μειώνεται

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, διότι συνοδεύεται από σημαντικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν τις ανοχές των κατασκευών.

Στο παρακάτω Σχήμα 21 παρουσιάζεται η 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. 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.

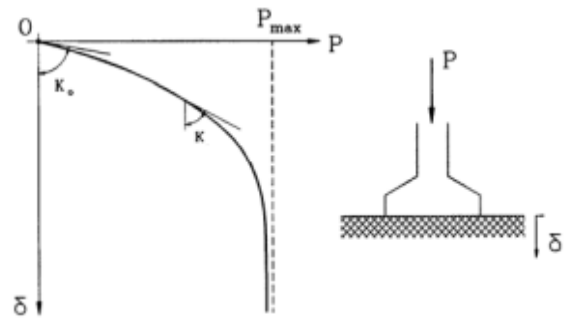
Στην περίπτωση του Σχήματος 20 η αστοχία πραγματοποιείται σε ένα εδαφικό στοιχείο στο οποίο επιβάλλεται μία ορισμένη εντατική κατάσταση, πιο συγκεκριμένα η αστοχία αφορά όλα τα εδαφικά στοιχεία του δοκιμίου επειδή έχουν την ίδια εντατική κατάσταση. Επίσης, ισχύουν τα εξής:

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{\max} \quad (2.1)$$

$$\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{xy} = \sigma'_{yz} = \sigma'_{xz} = 0 \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση του Σχήματος 2.2 η φόρτιση του θεμελίου προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων στο έδαφος κάτω από το θεμέλιο. Ωστόσο, η ένταση των αναπτυσσόμενων τάσεων ποικίλει από θέση σε θέση. Ακόμα, 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.



Σχήμα 21: Καμπύλη φορτίου υποχώρησης θεμελίου.

[Πηγή: Καββαδάς Μ., 2006]

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.

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα συμπεραίνεται ότι για κάθε «εδαφικό» υλικό υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν σε απεριόριστες παραμορφώσεις. Αυτοί οι συνδυασμοί λέγονται εντατικές καταστάσεις αστοχίας. Επιπλέον, το σύνολο των εντατικών καταστάσεων αστοχίας σχηματίζει μια «επιφάνεια» που λέγεται περιβάλλουσα των καταστάσεων αστοχίας ή περιβάλλουσα αστοχίας. Στην πραγματικότητα η επιφάνεια αυτή σχηματίζεται από το σύνολο των σημείων στον εξαδιάστατο χώρο των τάσεων.

Είναι σαφές λοιπόν, ότι οι αστοχίες συνδέονται άμεσα με την παραμόρφωση του εδάφους και θα πρέπει να εκφράζονται ως προς τις ενεργές τάσεις. Συμπέρασμα αυτού είναι ότι οι εντατικές καταστάσεις αστοχίας εκφράζονται από συνδυασμούς των ενεργών τάσεων. Ο προσδιορισμό των συνολικών εντατικών καταστάσεων αστοχίας εδαφικών υλικών θεωρείται σπουδαίος για την ασφάλεια των έργων. Ο προσδιορισμός αυτός δίνει την δυνατότητα συγκρίσεων των εντατικών καταστάσεων που αναπτύσσονται στα εδάφη λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων με τις αντίστοιχες καταστάσεις αστοχίας δίνοντας το βαθμό ασφαλείας του έργου. Αρά σύμφωνα με τα προαναφερόμενα δίνονται τα περιθώρια ασφαλείας του έργου σε σχέση με την κατάσταση αστοχίας.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί τάσεων που δεν οδηγούν σε αστοχία όσο και αν αυξηθούν οι τάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ισότροπη συμπίεση δηλαδή:

$$\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_{zz} = p \quad (2.3)$$

$$\sigma'_{xy} = \sigma'_{zx} = \sigma'_{yz} = 0 \quad (2.4)$$

Σε αυτή την περίπτωση το υλικό δεν αστοχεί όσο και αν αυξηθεί η ισότροπη πίεση (p), επιπλέον η κατάσταση αυτή κάνει τα υλικά να μην έχουν την δυνατότητα να παραμορφωθούν απεριόριστα. Ακόμα, μια άλλη περίπτωση που δεν οδηγεί σε αστοχία είναι η μονοδιάστατη συμπίεση όπου με την αύξηση του φορτίου το υλικό «σκληραίνει» με αποτέλεσμα η παραμορφωσιμότητα του μειώνεται και να μην υπάρχει δυνατότητα αστοχίας.

Η αντίθετη περίπτωση από τις προαναφερόμενες είναι η μοναξονική θλίψη όπου με την «επαρκή» αύξηση των τάσεων υπάρχει αστοχία. Τονίζεται ότι υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν στην αστοχία ενός εδαφικού υλικού (Καββαδας Μ., 2006 ; Παπαδόπουλος Β, Λουπασάκης Κ., 2013).

2.2. ΝΟΜΟΙ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΚΟΚΚΩΔΗ ΕΛΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ο εδαφικός σκελετός των κοκκωδών εδαφικών υλικών αποτελείται είτε από ασύνδετους είτε από χαλαρούς συνδεδεμένους στερεούς κόκκους. Τα εξωτερικά φορτία που δέχεται ο εδαφικός σκελετός δημιουργούν τις διατμητικές δυνάμεις και βοηθούν για την ανάπτυξη των ορθών τάσεων μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού. Συνέπεια όλων αυτών είναι οι παραμορφώσεις που οφείλονται κατά κύριο λόγο σε ολισθήσεις και κυλίσεις μεταξύ των κόκκων.

Άρα γίνεται σαφές ότι η τριβή που δημιουργείται μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση του. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση του εδάφους και αυτός είναι η πραγματική συνοχή ή συγκόλληση που παρουσιάζουν οι κόκκοι μεταξύ τους λόγω των ηλεκτροχημικών και άλλων δυνάμεων που δημιουργούνται.

Τονίζεται ότι στα αμμώδη εδαφικά υλικά η τριβή αποτελεί τον κύριο παράγοντα παραμορφώσεων, επειδή η επιρροή της πραγματικής συνοχής είναι αμελητέα, με εξαίρεση τις ονομαζόμενες «σιμεντωμένες» άμμους. Το Σχήμα 22 (α) παρουσιάζει την επαφή μεταξύ δύο κόκκων αμμώδους υλικού και τις ορθές (N) και διατμητικές (T) δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των κόκκων.

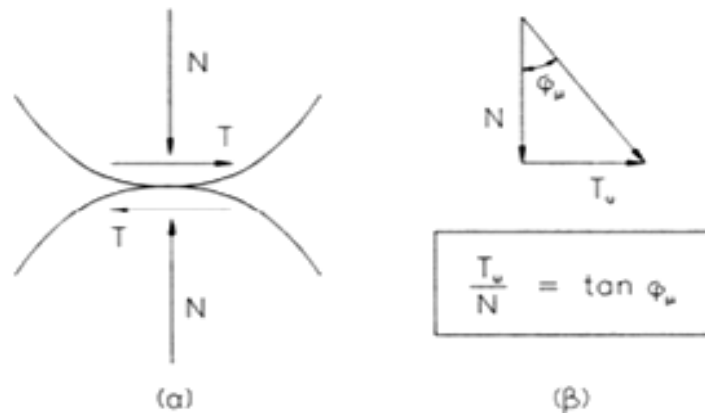
Ο θεμελιώδης νόμος της μηχανικής τριβής καθορίζει ότι για κάθε τιμή της ορθής δύναμης (N) ορίζεται η διατμητική αντοχή (T_u) της επαφής μεταξύ των κόκκων από τη σχέση:

$$T_u = N * \tan\phi_\mu \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση που η πραγματική διατμητική δύναμη (T) είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή (T_u) η επαφή μεταξύ των κόκκων είναι ευσταθής, ενώ στην περίπτωση που $T = T_u$ παρατηρείται ολίσθηση μεταξύ των κόκκων και αναδιάταξή τους σε μία νέα δομή στην οποία η διατμητική δύναμη είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή.

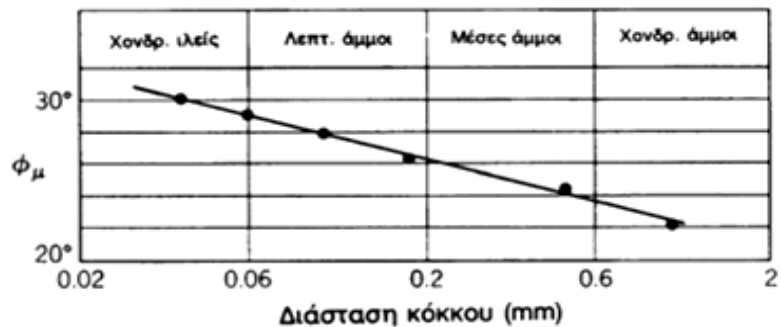
Ο συντελεστής ($\tan\phi_\mu$) είναι σταθερά, χαρακτηριστική του υλικού των κόκκων, η οποία εξαρτάται από τον τύπο και την ομαλότητα της επιφάνειας επαφής μεταξύ των κόκκων.

Η γωνία ϕ_{μ} ονομάζεται πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων και βρίσκεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 22.(β).



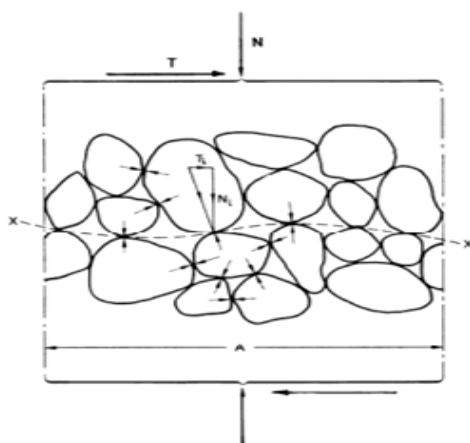
Σχήμα 22: Δυνάμεις μεταξύ των κόκκων εδαφικού υλικού
[Πηγή; Καββαδας Μ.,2006]

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων εξαρτάται και από το μέγεθος των κόκκων. Σύμφωνα με τη διάσταση των κόκκων παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές της πραγματικής γωνίας τριβής στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: Πραγματική γωνία τριβής για διάφορα εδαφικά υλικά
[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]

Στην περίπτωση που σε ένα δοκίμιο κοκκώδους εδαφικού υλικού επιβληθούν εξωτερικά μία ορθή δύναμη (N) και μία διατμητική δύναμη (T), τότε στις επαφές μεταξύ των κόκκων θα αναπτυχθούν ορθές δυνάμεις (N_i) και διατμητικές δυνάμεις (T_i). Το μέγεθος των δυνάμεων N_i και T_i είναι διαφορετικό σε κάθε θέση και ικανοποιεί τις στερεοστατικές συνθήκες ισορροπίας σε οποιοδήποτε τμήμα του δοκιμίου. Ως εκ τούτου λόγω της ποικιλίας των σχημάτων και μεγεθών κόκκων που παρουσιάζονται σε ένα εδαφικό υλικό, στις επαφές μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται ορθές και διατμητικές δυνάμεις ακόμη και στην περίπτωση που εξωτερικά επιβάλλεται μόνον ορθή δύναμη (N).



Σχήμα 24: Δυνάμεις μεταξύ των κόκκων

[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]

Όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερικώς επιβεβλημένη ορθή δύναμη (N) τόσο αυξάνει ο μέσος όρος των ορθών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη

είναι η εξωτερικώς επιβεβλημένη διατμητική δύναμη (T) τόσο αυξάνει ο μέσος όρος των διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων.

Στην περίπτωση που η εξωτερικώς επιβεβλημένη διατμητική δύναμη κυμαίνεται σε μεγάλες τιμές, τότε δίνεται η δυνατότητα σε κάποιες διατμητικές δυνάμεις των κόκκων να δώσουν μεγαλύτερες τιμές και να υπερβούν τη διατμητική αντοχή της επαφής μεταξύ των κόκκων με αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του λόγου T/N.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν γίνεται κατανοητό ότι και στην περίπτωση της ισότροπης συμπίεσης υπάρχει δυνατότητα, για μικρό ποσοστό επαφών των κόκκων, να ξεπεράσουν οι δυνάμεις την διατμητική αντοχή του υλικού. Συνέπεια αυτού θα είναι η συνεχόμενη ολίσθηση του. Οι ολισθήσεις αυτού του τύπου αν και διατμητικές σε μικροσκοπική κλίμακα εμφανίζονται με τη μορφή ισότροπης συμπίεσης του εδαφικού υλικού.

Με την αύξηση του λόγου T/N, το ποσοστό των επαφών των κόκκων που ολισθαίνουν αυξάνει και η παραμόρφωση του εδάφους μακροσκοπικά παρουσιάζει μία ισότροπη συνιστώσα (συμπίεση) και μία διατμητική συνιστώσα (στρέβλωση), η συμμετοχή της οποίας διαρκώς αυξάνεται. Έτσι λοιπόν, για κάποια τιμή του λόγου T/N ολισθαίνει ένα σημαντικό ποσοστό των επαφών μεταξύ των κόκκων, ώστε η μακροσκοπική παραμόρφωση του υλικού να εμφανίζεται σαν μια γενικευμένη ολίσθηση δηλαδή σαν μια απεριόριστη διατμητική παραμόρφωση.

Όταν λοιπόν το δοκίμιο βρεθεί σε αυτή την κατάσταση δεν έχει την δυνατότητα να δεχθεί μεγαλύτερη διατμητική δύναμη με αποτέλεσμα να έχει αστοχήσει μακροσκοπικά. Η εξωτερικώς επιβεβλημένη διατμητική δύναμη (T_u) στην κατάσταση αστοχίας ονομάζεται διατμητική αντοχή του υλικού και εξαρτάται από την ορθή δύναμη (N). Πειραματικές μελέτες απέδειξαν ότι ο λόγος T_u/N κατά την διάρκεια της αστοχίας είναι σταθερός και δίνεται από την σχέση:

$$T_u = N * \tan\varphi \quad (2.6)$$

Όπου:

T_u = εξωτερικώς επιβεβλημένη διατμητική δύναμη

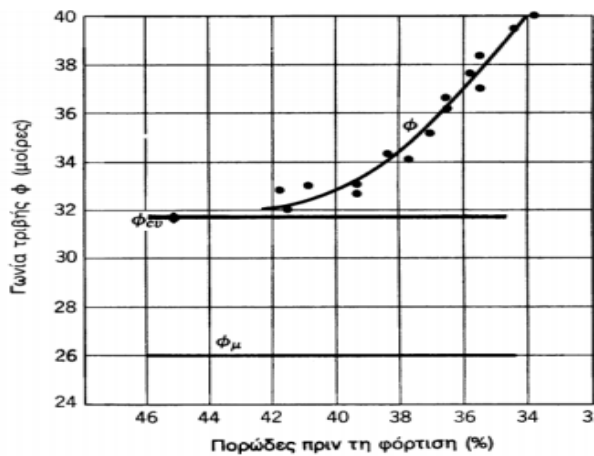
$\tan\varphi$ = μακροσκοπική γωνία τριβής του εδαφικού υλικού.

N = ορθή δύναμη

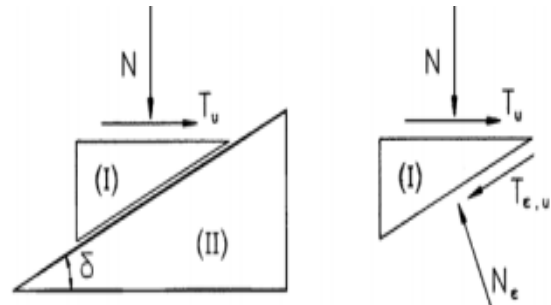
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία τριβής (φ) εξαρτάται από την πραγματική γωνία τριβής (φ_μ) του υλικού των κόκκων, χωρίς όμως γενικά να ισούται με αυτή. Πιο συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων (φ_μ), τόσο μεγαλύτερη είναι και η γωνία τριβής του εδαφικού υλικού (φ) όταν οι υπόλοιπες συνθήκες είναι ίδιες.

Ακόμα, η γωνία (φ) δεν είναι ιδιότητα του εξεταζόμενου υλικού αφού εξαρτάται απόλυτα από την επιτόπου κατάσταση του υλικού. Το Σχήμα 25 απεικονίζει την μεταβολή της γωνίας τριβής (φ) με το πορώδες για μια μεσόκοκκη άμμο. Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα σημειώνονται η πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων (φ_μ) και η χαρακτηριστική γωνία τριβής (φ_{cv}) που αντιστοιχεί στη χαλαρότερη δυνατή διάταξη των κόκκων (δηλαδή στη μέγιστη τιμή του πορώδους). Το μηχανικό ανάλογο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 26

καθιστά σαφή τη διαφορά μεταξύ των γωνιών (φ) και (φ_μ). Σε δύο «τριγωνικούς κόκκους» επιβάλλονται οι εξωτερικές δυνάμεις (N) και (T_u), έτσι ώστε να επιτευχθεί μακροσκοπική αστοχία του υλικού.



Σχήμα 25: Γωνία τριβής ως προς το πορώδες



Σχήμα 26: Μηχανικό ανάλογο της γωνίας τριβής.

[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]

Στο μηχανικό ανάλογο του σχήματος η αστοχία εκφράζεται με ολίσθηση κατά μήκος της κεκλιμένης επιφάνειας επαφής μεταξύ των κόκκων, οπότε ισχύει η σχέση:

$$T_{\epsilon,\mu} = N_\epsilon * \tan\varphi_\mu \quad (2.5)$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι στερεοστατικές εξισώσεις ισορροπίας του κόκκου (I) (βλέπε Σχήμα 2.7) υπό την επίδραση των δυνάμεων N , T_u , N_ϵ , $T_{\epsilon,u}$ δίνουν:

$$N_\epsilon = N * \cos \delta + T_u * \sin \delta \quad (2.6)$$

$$T_{\epsilon,\mu} = T_u * \cos \delta - N * \sin \delta \quad (2.7)$$

Κάνοντας απαλοιφή των N_ϵ και $T_{\epsilon,u}$ μεταξύ των σχέσεων 2.5, 2.6 και 2.7 προκύπτει:

$$T_u = N * \tan(\varphi_\mu + \delta) \quad (2.8)$$

Άρα σύμφωνα με τις σχέσεις 2.7 και 2.8 έχουμε:

$$\varphi = \varphi_\mu + \delta \quad (2.8)$$

Όπου:

φ = μακροσκοπική γωνία τριβής του εδαφικού υλικού

φ_μ = πραγματικής γωνίας τριβής του υλικού των κόκκων

δ = κλίση της πραγματικής επιφάνειας ολίσθησης ως προς το επίπεδο της εξωτερικώς επιβεβλημένης διατμητικής δύναμης

Για την γωνία δ μπορούν να προκύψουν (3) περιπτώσεις και είναι οι εξής:

- **1^η Περίπτωση:** αν η κλίση της γωνίας δ παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός ($\delta > 0$) τότε η μακροσκοπική διατμητική αντοχή του υλικού είναι μεγαλύτερη από την πραγματική διατμητική αντοχή της επαφής μεταξύ των κόκκων.
- **2^η Περίπτωση:** αν η επιφάνεια ολίσθησης είναι οριζόντια ($\delta = 0$) τότε η γωνία τριβής του εδαφικού υλικού ισούται με την γωνία του υλικού των κόκκων δηλαδή $\varphi_{\mu} = \varphi$.
- **3^η Περίπτωση:** αν η επιφάνεια ολίσθησης έχει αρνητική κλίση ($\delta < 0$) τότε η γωνία τριβής του εδαφικού υλικού είναι μικρότερη από την γωνία του υλικού των κόκκων $\varphi < \varphi_{\mu}$.

Επιστήμονες δίνουν ως ενεργειακή εξήγηση στην εξίσωση 2.8 την ακόλουθη: κατά την ολίσθηση του κόκκου (I) ως προς τον (II) η σχετική κίνηση γίνεται κατά μήκος του κεκλιμένου επιπέδου (με γωνία δ). Στην περίπτωση αυτή η οριζόντια δύναμη (T_u) παράγει έργο και η κατακόρυφη δύναμη (N) απορροφά έργο, ενώ στην περίπτωση που η κίνηση γινόταν σε οριζόντιο επίπεδο έργο θα παρήγαγε μόνον η οριζόντια δύναμη (T_u).

Η κίνηση σε κεκλιμένο επίπεδο προκαλεί εκτός από την ολίσθηση και **διόγκωση του εδαφικού στοιχείου** δηλαδή αύξηση του ύψους του, κατά την οποία η ορθή δύναμη (N) απορροφά έργο. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το πρόσθετο έργο της ορθής δύναμης λόγω διόγκωσης του εδαφικού στοιχείου εκφράζεται με την αυξημένη (κατά δ) της γωνία τριβής. Όμως στην περίπτωση που η γωνία (δ) είναι αρνητική τότε το ύψος του δοκιμίου μειώνεται, δηλαδή το δοκίμιο συμπιέζεται και η ορθή δύναμη παράγει έργο. Συνέπεια αυτού είναι η συμπίεση του δοκιμίου να εκφράζεται με μείωση (κατά δ) της γωνίας τριβής.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν ο λόγος T_u/N θεωρητικά είναι σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία τριβής (φ) των κοκκωδών εδαφών είναι ανεξάρτητη από την επιβαλλόμενη ορθή δύναμη (N). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό ισχύει για μικρές μεταβολές της ορθής δύναμης δηλαδή της τάσης. Στην περίπτωση μεγαλύτερων μεταβολών της ορθής τάσης οι πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι η γωνία (φ) μειώνεται ελαφρά. Η μείωση της γωνίας οφείλεται σε αντίστοιχη μείωση της πραγματικής γωνίας τριβής (φ_{μ}), λόγω εξομάλυνσης των επαφών μεταξύ των κόκκων στις υψηλότερες ορθές τάσεις. Η ανωτέρω μείωση της γωνίας (φ) είναι μικρή στο εύρος των ορθών τάσεων που συνήθως εμφανίζονται στα πρακτικά προβλήματα και κατά συνέπεια μπορεί να αμεληθεί στις περισσότερες περιπτώσεις. (Καββαδας Μ., 2006)

2.3. ΝΟΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

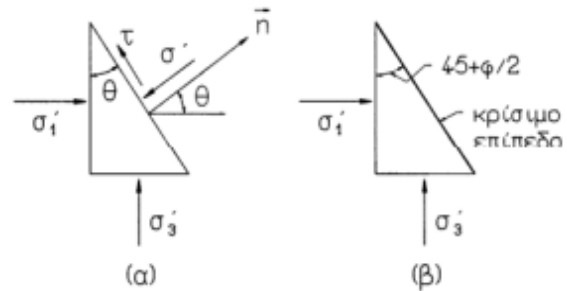
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα κοκκώδη (αμμώδη) εδάφη καθώς και η συμπεριφορά των συνεκτικών (αργιλικών) εδαφών.

2.3.1. Κοκκώδη εδάφη

Στο εδάφιο αυτό αναλύονται οι κρίσιμοι συνδυασμοί των τάσεων που αντιστοιχούν σε καταστάσεις αστοχίας στα κοκκώδη εδάφη. Η αστοχία που παρουσιάζεται στα κοκκώδη εδάφη είναι μια γενικευμένη ολίσθηση μεταξύ των κόκκων και μακροσκοπικά εμφανίζεται σαν σχετική ολίσθηση (κίνηση) σε κάποιο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο αστοχίας.

Στο διπλανό σχήμα παρουσιάζεται η κατάσταση αστοχίας ενός εδαφικού στοιχείου. Στην περίπτωση που (σ') είναι η ενεργός τάση στο επίπεδο αστοχίας και (τ) η αντίστοιχη διατμητική τάση.

Συμφώνα με όσα προαναφέρθηκαν ο νόμος αστοχίας (νόμος Coulomb), που καθορίζει τους κρίσιμους συνδυασμούς αστοχίας των ενεργών τάσεων μπορεί να δοθεί από την σχέση:



Σχήμα 27: Αστοχία κοκκωδών εδαφών
[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]

$$\tau = \sigma' * \tan \varphi \quad (2.9)$$

Όπου:

τ = διατμητική τάση.

φ = γωνία τριβής του εδαφικού υλικού.

σ' = ενεργός τάση στο επίπεδο αστοχίας

Αν σε όλα τα επίπεδα του εδαφικού στοιχείου οι ορθές και διατμητικές τάσεις είναι μικρότερες του μηδενός και ισχύει:

$$\tau - \sigma' * \tan \varphi < 0 \quad (2.10)$$

Τότε το εδαφικό στοιχείο δεν αστοχεί.

Αν σε κάποιο επίπεδο του εδαφικού στοιχείου ισχύει:

$$\tau - \sigma' * \tan \varphi = 0 \quad (2.11)$$

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

Αν σε όλα τα επίπεδα του εδαφικού στοιχείου οι ορθές και διατμητικές τάσεις είναι μεγαλύτερες του μηδενός και ισχύει:

$$\tau - \sigma' * \tan \varphi > 0 \quad (2.12)$$

Τότε δεν είναι υπάρχει η δυνατότητα να συμβεί αστοχία, διότι το υλικό θα έχει ήδη αστοχήσει.

Κατά το νόμο του Coulomb (εξίσωση 2.6) 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:

$$\tau_u = \sigma' * \tan \varphi \quad (2.13)$$

Όπου:

τ_u = διαθέσιμη διατμητική αντοχή

φ = γωνία τριβής του εδαφικού υλικού.

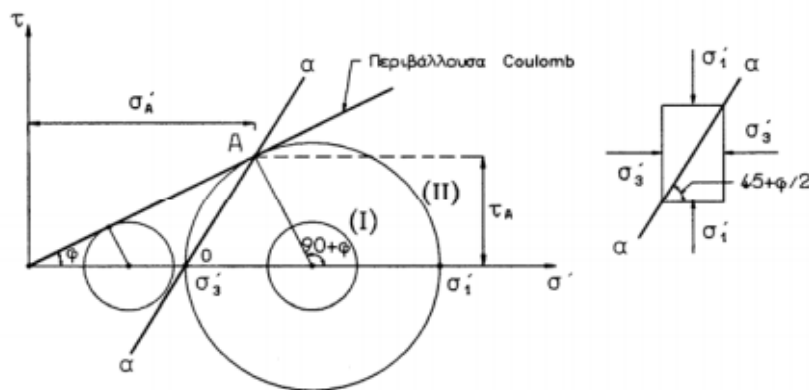
σ' = ενεργός τάση στο επίπεδο αστοχίας

Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα το εδαφικό στοιχείο αστοχεί όταν σε κάποιο επίπεδο (το επίπεδο αστοχίας) η διατμητική τάση (τ) γίνει ίση με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή (τ_u).

Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι 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.

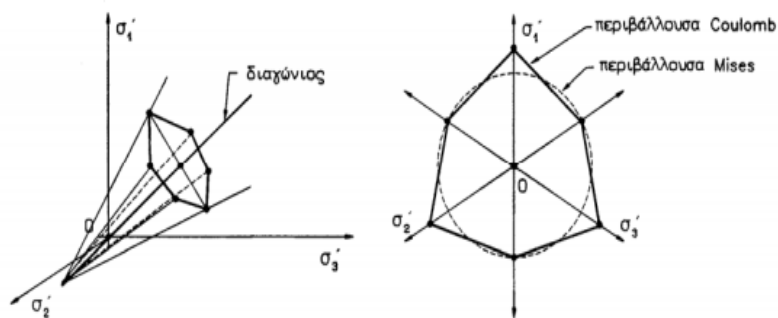
Κατά το νόμο του Coulomb για τα κοκκώδη εδάφη, το έδαφος δεν αστοχεί κατά μήκος του επιπέδου στο οποίο αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση αλλά κατά μήκος ενός επιπέδου στο οποίο ο λόγος της διατμητικής τάσης (τ) προς την ορθή τάση (σ') έχει μια ορισμένη τιμή (είναι ίσος με $\tan\varphi$). Ωστόσο, υπάρχει και μία άλλη συνέπεια του νόμου του Coulomb για τα κοκκώδη εδάφη είναι ότι η διατμητική τους αντοχή μηδενίζεται όταν μηδενισθεί η ορθή τάση. (Καββαδας Μ.,2006 ; Σιούτα Λ., Πλαστήρα Β., 2010)

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η μορφή του νόμου αστοχίας που δίνεται από τη σχέση (2.9) δεν είναι πρακτική επειδή κατά τον έλεγχο της αστοχίας απαιτεί τον υπολογισμό των ορθών και διατμητικών τάσεων σε όλες τις διευθύνσεις επιπέδων του εδαφικού στοιχείου. Για την κατανόηση αυτού δίνεται η γραφική παράσταση του νόμου αστοχίας του Coulomb (Σχήμα 28 και 29) όπου είναι μια ευθεία με κλίση φ και ονομάζεται περιβάλλουσα Coulomb ή περιβάλλουσα αστοχίας.



Σχήμα 28: Περιβάλλουσα αστοχίας Coulomb σε άμμους.

[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]



Σχήμα 29: Κριτήριο αστοχίας Coulomb σε άμμους
[Πηγή: Καββαδας Μ.,2006]

Γενικότερα, η περιβάλλουσα Coulomb έχει τις εξής ιδιότητες:

- Όταν η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του εδάφους (εδαφικό στοιχείο) δεν τέμνει την περιβάλλουσα αστοχίας (όπως π.χ. ο κύκλος Ι), τότε η κατάσταση του εδαφικού στοιχείου είναι ευσταθής.
- Όταν η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του εδάφους εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας (όπως ο κύκλος ΙΙ), τότε το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και μάλιστα η ολίσθηση συμβαίνει κατά μήκος ενός επιπέδου που δίνεται με το σημείο (Α), το σημείο επαφής του κύκλου με την περιβάλλουσα αστοχίας.
- Εντατική κατάσταση κατά την οποία ο κύκλος τέμνει την περιβάλλουσα είναι ανέφικτη, επειδή αντιστοιχεί σε διατμητικές τάσεις μεγαλύτερες από τη διατμητική αντοχή του εδάφους στα επίπεδα που παριστάνονται με σημεία του κύκλου πάνω από την περιβάλλουσα. (Καββαδας Μ.,2006)

Άρα σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν η αντοχή των κοκκωδών εδαφών εξαρτάται αποκλειστικά από την ύπαρξη ορθών ενεργών τάσεων και συνεπώς μηδενίζεται όταν οι ενεργές τάσεις μηδενισθούν.

2.3.2. Συνεκτικά εδάφη

Στα συνεκτικά ή αργιλικά εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται σε δύο παράγοντες και αυτοί είναι οι εξής:

- ✓ Στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων
- ✓ 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.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά των άμμων και των αργίλων κατά την αστοχία. Πιο συγκεκριμένα η διατμητική αντοχή των αμμωδών εδαφών εξαρτάται μόνο από την ύπαρξη ορθής ενεργού τάσης, με συνέπεια όταν η τάση αυτή μηδενισθεί μηδενίζεται και η αντοχή τους. Ωστόσο, τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν πραγματική συνοχή και έτσι εμφανίζουν διατμητική αντοχή ακόμη και όταν η ορθή τάση είναι μηδέν.

Πειραματικές μελέτες κατέληξαν ότι η διατμητική αντοχή συνεκτικών εδαφών περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση του νόμου αστοχίας των αργιλικών εδαφών.

$$\tau = c + \sigma' * \tan\varphi \quad (2.14)$$

Όπου:

φ = η γωνία τριβής

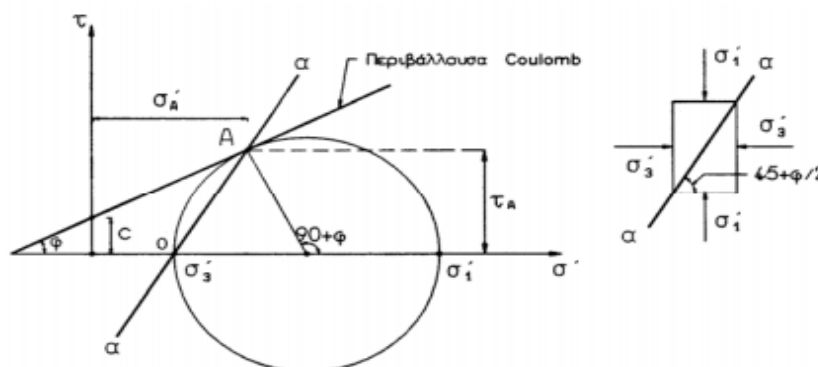
c = πραγματική συνοχή του υλικού

σ' = ενεργός τάση στο επίπεδο αστοχίας

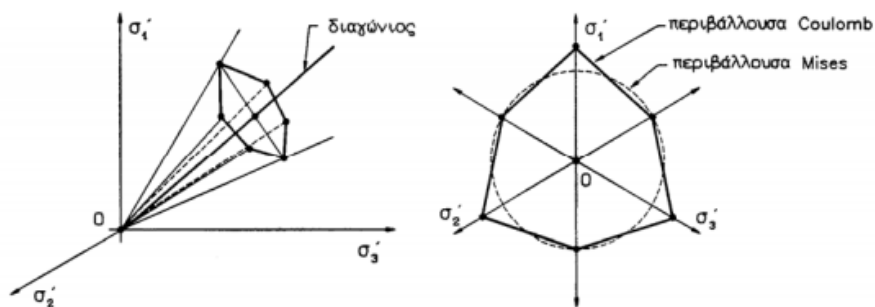
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία τριβής και η συνοχή ονομάζονται παράμετροι διατμητικής αντοχής. Επιπλέον, η γωνία τριβής και η πραγματική συνοχή δεν είναι ιδιότητα του υλικού με αποτέλεσμα να μην είναι σταθερή αλλά να εξαρτάται από την προϊστορία των φορτίσεων και άλλους παράγοντες.

Στα συνεκτικά εδάφη η διατμητική τάση (τ) ενός εδαφικού στοιχείου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη διαθέσιμη διατμητική αντοχή με συνέπεια το εδαφικό στοιχείο να μην αστοχεί. Ωστόσο, στην περίπτωση που σε κάποιο επίπεδο του εδαφικού στοιχείου η διατμητική τάση είναι ίση με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή, τότε το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και η αστοχία εκδηλώνεται με ολίσθηση κατά μήκος του επιπέδου αυτού (επίπεδο αστοχίας).

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή των κοκκωδών εδαφών δίνοντας από τα Σχήματα 30 και 31 τις μέγιστες τιμές των γωνιών καθώς και το κρίσιμο επίπεδο αστοχίας και τις κύριες τάσεις που δημιουργούνται στο εδαφικό υλικό.



Σχήμα 30: Περιβάλλουσα αστοχίας Coulomb σε αργίλους
[Πηγή: Καββαδας Μ., 2006]



Σχήμα 31: Κριτήριο αστοχίας Coulomb σε αργίλους.
(Καββαδας Μ.,2006)

Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 30 διακρίνεται ο κύκλος Mohr που παριστάνει την εντατική κατάσταση στο εδαφικό στοιχείο. Ο κύκλος Mohr εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας και συνεπώς το εδαφικό στοιχείο αστοχεί. Συγκεκριμένα, στο επίπεδο (αα), που παριστάνεται από το σημείο Α του κύκλου Mohr, αναπτύσσεται ο κρίσιμος συνδυασμός ορθής και διατμητικής τάσης που ικανοποιεί τις σχέσεις (2.14), με αποτέλεσμα το επίπεδο αυτό είναι επίπεδο αστοχίας.

Επιπλέον, στο Σχήμα 31 διακρίνονται οι κύριες τάσεις που οδηγούν το εδαφικό υλικό σε αστοχία. Τονίζεται ότι το Σχήμα 31 αναφέρεται σε μία τυχαία διάταξη των κύριων τάσεων και είναι η γενική έκφραση του νόμου αστοχίας. Γραφικά απεικονίζεται μια στρεβλή εξάπλευρη πυραμίδα όπου η κορυφή της πυραμίδας συνήθως ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων, επειδή τα αργιλικά εδάφη συνήθως εμφανίζουν συνοχή. Ωστόσο, στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών ένα στοιχείο δεν αστοχεί όταν καταπονηθεί σε ισότροπη συμπίεση.

Οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των αργιλικών εδαφών, δηλαδή της γωνίας τριβής και της συνοχής, παρατηρούνται τα εξής:

- Οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι, οι άργιλοι δηλαδή που δεν έχουν υποστεί στο παρελθόν μεγαλύτερη «συμπίεση» από αυτή στην οποία υποβάλλονται κατά τη δοκιμή προσδιορισμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής, συνήθως δεν εμφανίζουν συνοχή ($c = 0$), οπότε η περιβάλλουσα αστοχίας των υλικών αυτών είναι ευθύγραμμη και διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας είναι σταθερή φ_{NC} και ονομάζεται γωνία τριβής της κανονικά στερεοποιημένης άργιλου.
- Οι υπερστερεοποιημένες άργιλοι, οι άργιλοι δηλαδή που έχουν υποβληθεί στο παρελθόν σε «συμπίεση» μεγαλύτερη από αυτή στην οποία υποβάλλονται κατά τη δοκιμή προσδιορισμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής, εμφανίζουν μη-μηδενική συνοχή και γωνία τριβής φ_{OC} μικρότερη από τη γωνία φ_{NC} του ίδιου υλικού. Η γωνία φ_{OC} είναι πρακτικά σταθερή για μια συγκεκριμένη άργιλο, δηλαδή ανεξάρτητη της τιμής της τάσης προστερεοποίησης. Αντίθετα, η συνοχή εξαρτάται από τον εκάστοτε δείκτη πόρων (e) (ή ισοδύναμα τη φυσική υγρασία) και μάλιστα αυξάνει όσο μειώνεται ο δείκτης πόρων. Ειδικότερα, ο Hvorslev πρότεινε μια σχέση της μορφής:

$$c = c(e) = a * \exp\left(\frac{e_0 - e}{\lambda}\right) \quad (2.15)$$

Όπου:

a = σταθερά του υλικού

e = σταθερά του υλικού

λ = σταθερά του υλικού

Η Σχέση (2.15) παριστάνεται με μία ευθεία σε διάγραμμα (e , $\log c$). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω της μικρής συμπίεστότητας των υπερστερεοποιημένων αργίλων, το εύρος διακύμανσης των τιμών του δείκτη πόρων (e) είναι μικρό και συνεπώς η συνοχή δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Ωστόσο, βάσει της τυχαίας μεταβλητότητας των εδαφικών υλικών στις συνήθεις εφαρμογές, συχνά θεωρείται ότι η συνοχή είναι σταθερή.

Συμπερασματικά λοιπόν, στις πρακτικές εφαρμογές γίνονται οι εξής παραδοχές:

- ✓ Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι: $c=0$, $\varphi=\varphi_{NC}$ = σταθερό
- ✓ Υπερστερεοποιημένες άργιλοι: c = σταθερό, $\varphi = \varphi_{OC}$ = σταθερό
όπου: $\varphi_{OC} < \varphi_{NC}$. (Καββαδας Μ.,2006 ; Σιούτα Λ., Πλαστήρα Β., 2010)

3. ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος αντιμετωπίζει καθημερινά διάφορα προβλήματα, τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

- ✓ Καθίζηση εδαφών (φυσική διάβρωση)
- ✓ Διόγκωση εδαφών (φυσική διάβρωση)
- ✓ Σπήλαια και καταβόθρες (χημική διάβρωση)

Τα προαναφερόμενα προβλήματα μπορούν να επηρεάσουν μεγάλες εκτάσεις γης που είτε είναι κατοικημένες περιοχές είτε έχουν πραγματοποιηθεί ή πραγματοποιούνται τεχνικά έργα είτε είναι ανεκμετάλλευτες περιοχές. Ωστόσο, σε όποια περίπτωση και αν δημιουργηθούν υπάρχουν πιθανότητες να προκαλέσουν ανθρώπινα ατυχήματα, να καταστραφούν κατοικίες και καλλιέργειες.

Στην συνέχεια δίνεται περιγραφή των τριών προαναφερόμενων φαινομένων. Τονίζεται ότι στην διόγκωση των εδαφών θα δοθεί εκτενέστερη ανάλυση αφού είναι και το θέμα της παρούσας Πτυχιακής εργασίας.

Καθίζηση εδαφών

Η καθίζηση θεωρείται υποχώρηση ή παραμόρφωση του εδάφους, που προκαλείται από το βάρος ενός τεχνικού έργου, που βρίσκεται πάνω σε αυτό. Είναι η συμπίεση του εδάφους, όταν το υπερκείμενο έργο υπερβεί την αντοχή του. Το φαινόμενο της καθίζησης συνδέεται με διάφορους παράγοντες, οι οποίοι είναι οι κάτωθι:

- Γεωλογικοί - γεωτεχνικοί
- Τοπογραφία - μορφολογία της περιοχής,
- Ύψος των βροχοπτώσεων (απότομες θεομηνίες σεισμικότητα της περιοχής)
- Είδος της κατασκευής
- Τύπο της θεμελιωσής
- Κατασκευαστικά υλικά
- Σωστή επίβλεψη έργου
- Χρόνος κατασκευής έργου.

Τα είδη των καθιζήσεων διαχωρίζονται με τον τρόπο που πραγματοποιούνται, δηλαδή στις γενικές ή ολικές καθιζήσης το έδαφος υποχωρεί ομοιόμορφα και «συμπαράσφύρει» ομοιόμορφα το υπερκείμενο έργο, σε αυτή την περίπτωση η καθίζηση παρουσιάζεται με

ρωγμές και είναι συνήθως λίγες και αδύνατες. Σε διαφορετικές περιπτώσεις το έδαφος το έδαφος υποχωρεί ανομοιόμορφα με συνέπεια να δημιουργούνται συνήθως πολλές και μεγάλες ρωγμές με διαφορετική κλίση και κατεύθυνση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των μαλακών εδαφών (χαμηλής αντοχής), παρατηρούνται καθιζήσεις του εδάφους και ρωγμές. Όταν ένα έργο έχει κατασκευαστεί πάνω σε χαλαρές ή μαλακές προσχώσεις (κορήματα) στις επιφάνειες των πλαγιών (πρανών) ορεινών περιοχών δύσκολα να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα. Τα μαλακά εδάφη είναι πολύ ευάλωτα στη διάβρωση από βροχές και εξασθενούν ακόμη περισσότερο, όταν δέχονται ισχυρές βροχοπτώσεις, οι καθιζήσεις αυτές είναι δυνατό να μετεξελιχθούν σε κατολισθήσεις.



Εικόνα 2: Καθίζηση εδαφών

[Πηγή: <http://www.corfupress.com>]

Διογκούμενα εδάφη

Η διογκωση εδαφών θεωρείται και αυτό ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των γεωλογικών σχηματισμών. Αυτό συμβαίνει διότι αποτελούνται από αργίλους που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν νερό με αποτέλεσμα να αυξάνουν τον όγκο τους και τελικά να «ανασηκώνουν» τα υπερκείμενα έργα. Τονίζεται ότι το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συνήθως τους χειμερινούς μήνες όπου οι ποσότητες του νερού λόγω βροχοπτώσεων είναι μεγαλύτερες. Ωστόσο, στη συνέχεια του φαινομένου αυτού τα εδάφη αποβάλλουν το νερό με συνέπεια ο όγκος τους να μειώνεται – συρρικνώνεται, η διαδικασία αυτή οδηγεί στην καθίζηση-υποχώρηση τις υπερκείμενες κατασκευές.

Η διαδικασία αυτή έχει την δυνατότητα να επαναλαμβάνεται διαρκώς, δηλαδή να υπάρχουν συνεχή «ανεβοκατεβάσματα» ανάλογα με την εποχή (χειμώνα – καλοκαίρι), αποτέλεσμα αυτού είναι στο εδαφικό υλικό να προκαλούνται ρηγματώσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα εδάφη αυτά γίνονται ακόμη πιο επικίνδυνα, όταν περιέχουν το ορυκτό πεντονίτη, που επαυξάνει τη διογκωσιμότητά τους με συνέπεια να είναι δυνατή και εκδήλωση κατολισθήσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι όταν βρίσκονται σε τοπογραφικά επικλινείς επιφάνειες του εδάφους.

Ως εκ τούτου παρόμοια προβλήματα αλλά σε μικρότερο βαθμό παρατηρούνται σε περιοχές που αποτελούνται από μαργαϊκά εδάφη. Πρόκειται γενικά για στρώματα που εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές του τόπου μας, ορεινές και πεδινές, με παρόμοια χαρακτηριστικά και φαινόμενα, όπως οι διογκούμενοι άργιλοι. Η εκδήλωση καθιζήσεων και η

επακόλουθη ρωγμάτωση τεχνικών έργων είναι, συνήθως άμεσα συνδεδεμένη με απότομες βροχοπτώσεις ή και μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις του εδάφους.



Εικόνα 3: Διογκούμενα Εδάφη
[Πηγή: Κύρου Κ.,2014]

✚ Σπήλαια και καταβόθρες

Ένα ακόμα σοβαρό πρόβλημα είναι τα σπήλαια μέσα σε ασβεστόλιθους και οι καταβόθρες μέσα σε γύψους. Τα φαινόμενα αυτά δημιουργούνται λόγω της χημικής διάβρωσης/διάλυσης των πετρωμάτων αυτών, έστω και αν δεν εμφανίζονται επιφανειακά. Τα προβλήματα εκδηλώνονται συνήθως μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις, διότι διαλύονται και καταρρέουν οι υπερκείμενες οροφές τους, συμπαρασύροντας στη συνέχεια σε καθίζηση ή αλλιώς υποχώρηση των εδαφικών στρωμάτων, που βρίσκονται πάνω από αυτά. Αυτά με τη σειρά τους συμπαρασύρουν τις υπερκείμενες κατασκευές (κατοικίες, δρόμους, τεχνητά πρηνή κτλ).

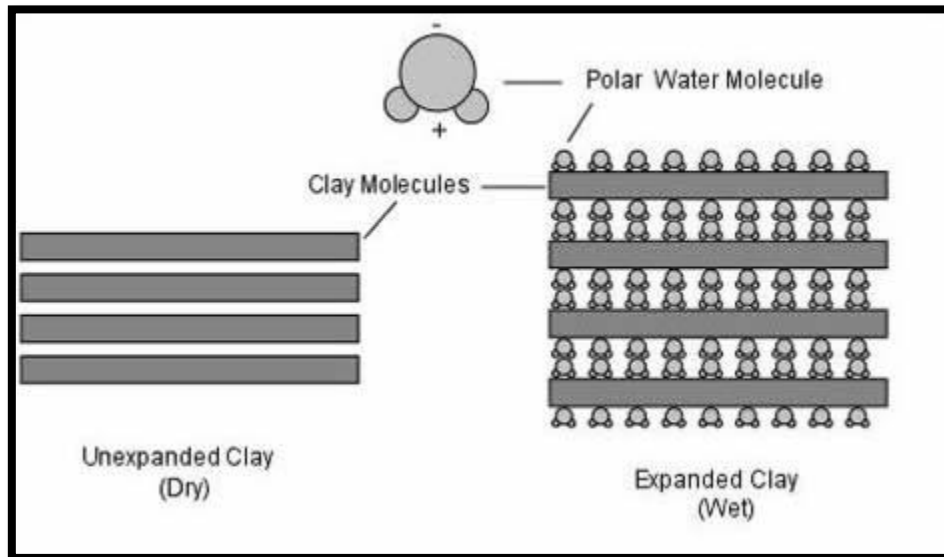
Ωστόσο, παρόμοια προβλήματα όπως τα προαναφερόμενα παρουσιάζονται επίσης σε περιοχές, όπου στα παλαιότερα χρόνια κατασκευάστηκαν λαούμια για σκοπούς υδροληψίας του υπόγειου νερού. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατό να καταρρεύσουν τα τοιχώματά τους ή οι υπόγειες σήραγγες, που συνδέουν τα λαούμια, με αποτέλεσμα να υποστούν καθιζήσεις-παραμορφώσεις και οι υπερκείμενες κατασκευές (Κλεόπας Χ., 2003 & Τόλιος Ι., Παρασκευόπουλος Γ., 2013).



Εικόνα 4: Σπήλαια και καταβόθρες.
[Πηγή: <http://urbanspeleology.blogspot.gr>]

3.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Ως διογκούμενα εδάφη ορίζονται τα εδάφη τα οποία περιέχουν αργιλικά ορυκτά που επιδέχονται μεγάλες ογκομετρικές αλλαγές με την διακύμανση της υγρασίας. Η διόγκωση προκαλείται από την προσέλκυση νερού από τα αργιλικά πλακίδια ορισμένων αργιλικών. (Κυρού Κ.,2014)



Σχήμα 32: Απεικόνιση αργιλικού εδάφους πριν και μετά την διόγκωση
[Πηγή: http://www.geology.ar.gov/geohazards/expsoils_geninfo.htm]

3.2.1. Παρουσία διογκούμενων εδαφών

Τα διογκούμενα εδάφη παρουσιάζονται σε πολλές περιοχές του κόσμου, ωστόσο, κάνουν έντονη την παρουσία τους σε χώρες με ημίξηρα κλίματα. Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζονται συνήθως σε περιοχές με μεγάλες ξηρές περιόδους και μικρής διάρκειας έντονες βροχοπτώσεις.

Περιοχές που έχουν το προαναφερόμενο κλίμα και αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της διόγκωσης εδαφών εντονότερο είναι:

- ΗΠΑ (Colorado, Texas, Wyoming)
- Ινδία
- Αφρικανικές χώρες
- Μέση Ανατολή (Κύπρος)

Η παρουσία των διογκούμενων εδαφών προκαλεί πολλά προβλήματα ιδιαίτερα σε κτίρια, κατασκευές, δρόμους και υπηρεσίες. Ωστόσο, το πρόβλημα μεγαλώνει όσο αυξάνεται η οικοδομική δραστηριότητα στο δομημένο περιβάλλον με συνέπεια οι περιοχές με το φαινόμενο της διογκώσης να παρουσιάζονται συχνότερα.

Όπως προαναφέρθηκε τα διογκούμενα εδάφη αποτελούν μια από τις χειρότερες φυσικές καταστροφές και οι ζημιές που προκαλούνται είναι περισσότερο από πλημμύρες, κατολισθήσεις και σεισμούς.

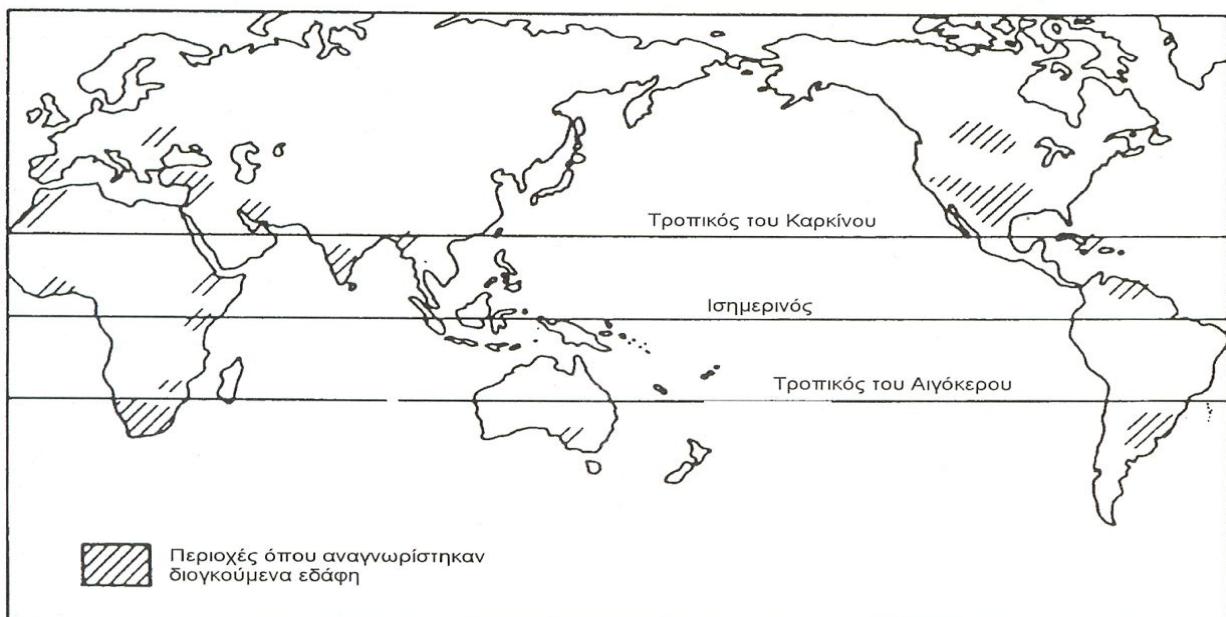
3.2.2. Διάσταση προβλήματος

Σχεδόν σε ολόκληρο τον κόσμο, τα επιφανειακά αποθέματα αποτελούνται από διογκούμενα μαλακά εδάφη, που εμφανίζονται προβληματικά μαλακά εδάφη, που εμφανίζονται προβληματικά σε κατασκευές. αυτά τα διογκούμενα μαλακά εδάφη όταν έρθουν σε επαφή με το νερό διογκώνονται σημαντικά με αποτέλεσμα να χάνουν την αντοχή τους.

Το πρόβλημα των διογκούμενων δεν είχε αναγνωριστεί πριν από το 1930. Μέχρι το 1920 τα περισσότερα κτίρια είχαν μικρά φορτία (ελαφρά ξύλινα ή από οπτόπλινθους) και δεν παρουσίαζαν προβλήματα. Από το 1930 και μετά, στις βιομηχανικές χώρες χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα τα τούβλα. Οι κατασκευές αυτές ρηγματώθηκαν σε πολλά σημεία και οι ζημιές αποδόθηκαν σε κακή κατασκευή και σε καθιζήσεις των θεμελίων χωρίς να αναγνωριστεί η επίδραση των διογκούμενων εδαφών.

Αργότερα και με την εκτεταμένη χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος στις κατασκευές, ακόμη και σε περιπτώσεις κοιτόστρωσης, αυξήθηκαν, αντίθετα με ότι πίστευαν, περισσότερο οι ζημιές που οφείλονται στην παρουσία των διογκούμενων εδαφών.

Αν και τα εδάφη αυτά είναι προβληματικά για τις κατασκευές, εντούτοις σε όλο τον κόσμο ένας μεγάλος αριθμός έργων θεμελιώνεται σε παρόμοια εδάφη. Στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές κατανομής των διογκούμενων εδαφών σύμφωνα με G.W.Dolaldson.



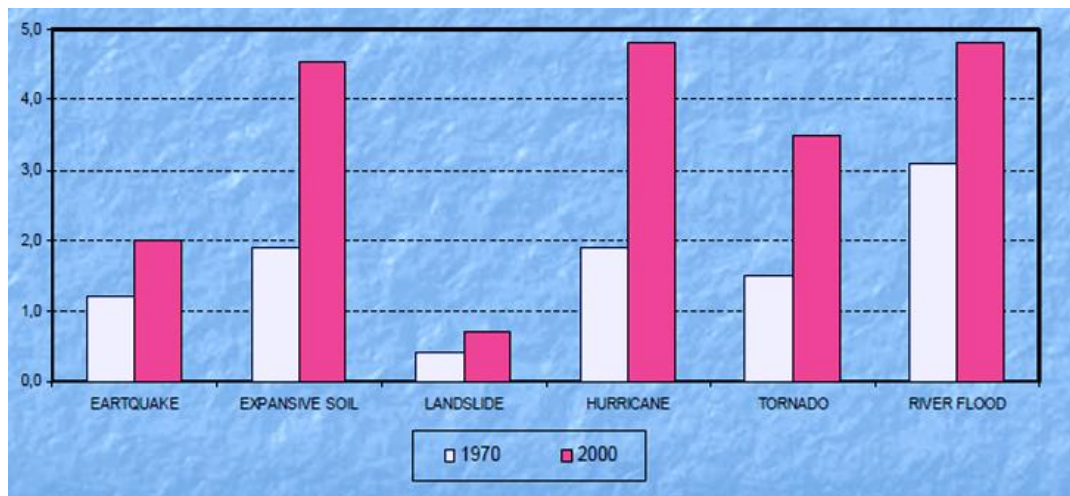
Εικόνα 5: Χάρτης κατανομής των διογκούμενων εδαφών που έχουν αναφερθεί.

[Πηγή: Παπαχαρίσης και συν., 1999]

Στις περιοχές αυτές τα διογκούμενα εδάφη είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα στις θεμελιώσεις, εάν ο κατασκευαστής τα παραβλέψει. Ένα ενεργοποιημένο έδαφος λόγω συρρίκνωσης ή διόγκωσης, προκαλεί αλλαγή στον όγκο του και για αυτό αναπτύσσονται τάσεις που ενεργούν στις κατασκευές που είναι θεμελιωμένες πάνω στο έδαφος αυτό. Τέτοιες αλλαγές στον όγκο εδάφους είναι δυνατόν να προκληθούν από την παρουσία της ομάδας των ορυκτών της αργίλου, ειδικά του μοντμολλονίτη, ο οποίος χαρακτηρίζεται για τις τεράστιες διασταλτικές του ικανότητες. Η διόγκωση της ομάδας αυτής ενεργοποιείται από την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους, δηλαδή από την ξηρή κατάσταση στην οποία βρισκόταν κατά τη κατασκευή κάποιου έργου, σε μία κατάσταση με κρίσιμο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας.

Σύμφωνα με τον Chen (1988) κοστολογήθηκαν τα προβλήματα που προκαλούν τα διογκούμενα εδάφη. Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν κατέληξαν ότι οι ζημιές στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) το 1970 ξεπερνούν τα 2 δισεκατομμύρια δολάρια, επισημαίνοντας ότι οι ζημιές που είχαν προκληθεί από τους σεισμούς κυμαινόντουσαν σε πολύ χαμηλότερα χρηματικά ποσοστά.

Ωστόσο, ο Chen και η ερευνητική του ομάδα προσπαθώντας να προσδιορίσουν το πρόβλημα της διόγκωσης κοστολογούν ανά έτη τα προβλήματα φτάνοντας το 2000 το πόσο των ζημιών να ακουμπά τα 4,5 δισεκατομμύρια δολάρια. Το 2010 οι ερευνητικές μελέτες αποκαλύπτουν ότι το πόσο αυξάνεται ραγδαία φτάνοντας στα 10 δισεκατομμύρια δολάρια από ζημιές που έχουν προκληθεί σε υποδομές των δημοσίων έργων κτιρίων κ.τ.λ. (Κύρου Κ., 2014).



Διάγραμμα 1: Διάσταση προβλήματος διόγκωσης εδαφών από το 1970 έως το 2000
[Πηγή: Κύρου Κ., 2014]

Όσο αφορά την Ελλάδα, τα τελευταία 20 χρόνια οι επιστήμονες δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα διογκούμενα εδάφη, πραγματοποιώντας πειραματικές μελέτες για την αξιολόγηση των ελληνικών εδαφών και την αποφυγή του φαινομένου της διόγκωσης (Cristodoulis J., et all 2006).

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, τα προβλήματα της διόγκωσης εδαφών είναι ένα θέμα με μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον, όχι μόνο από άποψης ασφάλειας των ανθρώπων,

των ζώων και των έργων υποδομής αλλά και από οικονομικής άποψης διότι αποτελεί ένα τεράστιο πλήγμα για τις οικονομίες των χωρών που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους φαινόμενα. Στην συνέχεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα αναλυθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την διόγκωση των εδαφών καθώς επίσης και οι τρόποι αντιμετώπισης τους.

3.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΑ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Τα προβλήματα που προκαλούν τα διογκούμενα εδάφη ποικίλουν. Υπάρχει περίπτωση να προκαλέσουν αστοχίες στα τεχνικά έργα αφού παρουσιάζουν μέτρια χαρακτηρίστηκα αντοχής. Επιπλέον, υπάρχουν και οι περιπτώσεις που οι πιέσεις της διόγκωσης προκαλούν αντίστοιχες αναπτυσσόμενες πιέσεις στις κατασκευές. Πειραματικές μελέτες αποδεικνύουν ότι πολλά γεωτεχνικά προβλήματα κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή αποδίδονται στην διαστολή και την διόγκωση.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διόγκωση θα πρέπει να εξετάζονται με ιδιαίτερη προσοχή. Αρχικά κατά την εξέταση των παραγόντων θα πρέπει να γίνεται διάκριση ανάμεσα στο δυναμικό διόγκωσης και στο μέγεθος διόγκωσης. Αναλυτικότερα το δυναμικό διόγκωσης εκφράζει την ικανότητα ενός εδάφους να παρουσιάζει σημαντική μεταβολή του όγκου μετά από κάποια αλλαγή είτε της υγρασίας είτε του εξωτερικού φορτίου. Όσο αφορά το μέγεθος διόγκωσης αναφέρεται στην έκταση στην οποία ενεργοποιείται το δυναμικό διόγκωσης και ποίες θα είναι οι συνθήκες κατά τις οποίες θα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο.

Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ποιοτικά το δυναμικό διόγκωσης θα μπορούσε να οριστεί ως το ποσοστό μεταβολής του όγκου ενός πλευρικά παρεμποδιζόμενου δείγματος το οποίο υφίσταται κορεσμό υπό κατακόρυφη πίεση (1kg/cm^2) μετά την συμπίκνωση του στην βέλτιστη υγρασία και στην μέγιστη ξηρή πυκνότητα.

Οι κυριότερες αιτίες εκδήλωσης διαστολής και της διόγκωσης εδαφών είναι:

- i. Η μηχανική διαστολή από προσρόφηση ύδατος
- ii. Η μεταβολή της ικανότητας συγκράτησης ύδατος στη διεπιφάνεια των αργιλικών ορυκτών
- iii. Η αλλαγή της υφής λόγω προσρόφησης ύδατος
- iv. Η μεταβολή της κρυσταλλικής δομής ως επιφάνειας μεταβολής των τιμών της θερμοκρασίας και της πίεσης
- v. Οι πλαστικές παραμορφώσεις από τεκτονικές κινήσεις
- vi. Η ψύξη του ύδατος των πόρων

Σύμφωνα λοιπόν με τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν η μεταβολή της ικανότητας συγκράτησης ύδατος στη διεπιφάνεια των κόκκων θεωρείται από τις βασικές αιτίες εμφάνισης του φαινομένου της διόγκωσης.

Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται κύριος με το νερό και επηρεάζονται άμεσα από τις παρακάτω συνθήκες:

- i. Το είδος και η ποσότητα του εδαφικού υλικού
- ii. Η αρχική περιεκτικότητα και ο βαθμός κορεσμού
- iii. Οι υποπίεσεις του ύδατος των πόρων
- iv. Η ποιότητα και η ποσότητα του ύδατος των πόρων
- v. Ο βαθμός στερεοποίησης
- vi. Η διάταξη των εδαφικών κόκκων και η εδαφική δομή
- vii. Το μέγεθος της πίεσης και η εντατική κατάσταση
- viii. Η θερμοκρασία
- ix. Ο απαιτούμενος για τη διόγκωση χρόνος
- x. Η παρουσία οργανικών ουσιών
- xi. Τα ανταλλάξιμα ιόντα που υπάρχουν στο έδαφος
- xii. Ο περιεχόμενος ηλεκτρολύτης της υδατικής φάσης

Σε οδοστρώματα κατασκευασμένα πάνω σε εδαφικά υλικά στα οποία είναι ενεργοποιημένο το φαινόμενο διόγκωσης παρουσιάζονται φθορές με τις παρακάτω μορφές (Αθανασόπουλος Α., 2000):

- Διαμήκειες ρωγμές παράλληλα προς το κεντρικό άξονα της οδού ή κοντά στα ερείσματα
- Τοπικές παραμορφώσεις είτε κοντά σε αγωγούς είτε σε δεντροφυτεμένες περιοχές στο άκρο του οδοστρώματος, συνοδευόμενες από πλευρική ρηγμάτωση
- Τοπικές αστοχίες του οδοστρώματος, σχετιζόμενες με την υποβάθμιση της επιφάνειας της οδού λόγω ανεπαρκούς φέρουσας ικανότητας
- Ανωμαλίες σε σημαντικό μήκος της επιφάνειας της οδού χωρίς εμφάνιση φθοράς σε οποιουδήποτε τύπου ρηγμάτωσης.



Εικόνα 6: Προβλήματα διόγκωσης εδαφών στο οδόστρωμα
[Πηγή: <http://www.pavementinteractive.org/article/pumping>]

Το ελεύθερο νερό στους πόρους του εδάφους είναι δυνατόν να υπάρχει με μηδενική πίεση, σε συμπίεση ή σε εφελκυσμό. Κάτω από τη στάθμη του υπογείου νερού, το νερό των πόρων βρίσκεται σε κανονική υδροστατική πίεση και η πίεση αυξάνει ανάλογα το βάθος.

Επάνω στη στάθμη του υπόγειου νερού το έδαφος είναι δυνατόν να συγκρατεί μεγάλη ποσότητα νερού, μέχρι και τον πλήρη κορεσμό. Το νερό αυτό διατηρείται με την βοήθεια της τριχοειδούς έλξης και του επιφανειακού εφελκυσμού στους πόρους. Οι δύο αυτές δυνάμεις δρουν και ισορροπούν την βαρύτητα.

Όταν το ελεύθερο νερό βρίσκεται στη επιφάνεια ενός κορεσμένου αργιλικού εδάφους η εφελκυστική τάση στο νερό των πόρων είναι μηδέν. Κατά την διάρκεια ξηρασίας σχηματίζονται μηνίσκοι στους επιφανειακούς πόρους και μία εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στο νερό των πόρων. Οι κόκκοι του εδάφους στην επιφάνεια υφίστανται μια θλίψη ίση με την ολική τάση που παράγεται από την εφελκυστική τάση του νερού πόρων. Αυτή η λειτουργία προκαλεί μια συστολή στο αργιλικό έδαφος, όπως ακριβώς στην περίπτωση εφαρμογής ενός βάρους στην επιφάνεια. Μεγαλύτερη εξάτμιση προκαλεί υποχώρηση των μηνίσκων στο στενότερο σημείο των τριχοειδών. Σε αυτή τη φάση αναπτύσσεται η μεγαλύτερη εφελκυστική τάση στο νερό των πόρων και αντίστοιχη είναι η θλίψη στους κόκκους, οπότε το αργιλικό έδαφος, εμφανίζει την μεγαλύτερη συρρίκνωση.

Κατά την διάρκεια της υγρής περιόδου καθώς το νερό συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της κορεσμένης αργίλου που ευρίσκεται στο σημείο συρρίκνωσης, οι μηνίσκοι καταστρέφονται, η εφελκυστική τάση από το νερό των πόρων αναιρείται και η άργιλος είναι ελεύθερη για διόγκωση εφόσον το απαιτούμενο νερό είναι διαθέσιμο. ο χρόνος που απαιτείται για να συμπληρώσει την διόγκωση του ένα αργιλικό στρώμα εξαρτάται από τον συντελεστή διαπερατότητας του, το πάχος της στρώσης και επειδή τα διογκούμενα εδάφη συνήθως περιέχουν μοντμολλονίτη, η τελική διόγκωση εξαρτάται και από την επί τοις εκατό περιεκτικότητας αυτού του ορυκτού στο έδαφος.

Η διόγκωση του αργιλικού εδάφους μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου λόγω της εφαρμογής ενός βάρους επιφάνειας, για παράδειγμα θεμελίωση μιας κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση λόγω της εκσκαφής, η εξάτμιση στην επιφάνεια αυξάνεται και το έδαφος από κάτω αναγκάζεται και απορροφά νερό από το τριχοειδή που ευρίσκονται βαθύτερα για να διατηρήσει τον κορεσμό του. Εάν η πίεση που εφαρμόζεται από την κατασκευή είναι μικρότερη από τη μέγιστη πίεση που μπορεί να παραχθεί από τη δράση των τριχοειδών, τότε το έδαφος πάλι διογκούνται. Σημαντικός παράγοντας είναι η μεταβαλλόμενη στάθμη του υπόγειου νερού.

Όλα τα παραπάνω αναφέρονται για τις κατακόρυφες διογκώσεις των αργιλικών εδαφών κάτω από τις θεμελιώσεις, διότι συνήθως η οριζόντια διαστολή εμποδίζεται από το γύρω έδαφος. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι υπερστερεοποιημένοι άργιλοι διογκούνται και καθέτως και οριζοντίως. Αυτή η οριζόντια διαστολή μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημίες ιδίως σε τοίχους αντιστήριξης.

3.4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Ο προσδιορισμός του φαινομένου της διόγκωσης των εδαφών θεωρείται σημαντικός διότι μπορούν να αποφευχθούν οι δυσμενείς συνθήκες που δημιουργούνται. Όπως αναφέρθηκε η διόγκωση των εδαφών είναι μία διεργασία η οποία συνδέεται άμεσα με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους, που λαμβάνει χώρα κάτω από συγκεκριμένες

περιβαλλοντικές – κλιματολογικές συνθήκες καθώς και φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών.

Η επίδραση της συμπεριφοράς των διογκούμενων εδαφών στις κατασκευές είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού υπάρχει η δυνατότητα να επιφέρει μέχρι και αστοχία του φορέα. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων πραγματοποιήθηκε πληθώρα πειραματικών μελετών με στόχο να προσδιορίζεται η τάση και το ποσοστό διόγκωσης των διογκούμενων εδαφών. Στις πειραματικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που έκαναν χρήση της συσκευής μονοδιάστατης στερεοποίησης, το οιδήμετρο (Holtz and Gibbs, 1956, Jennings & Knight, 1957 & Lambe and Whitman, 1959).

Ο προσδιορισμός της τάσης και το ποσοστό διόγκωσης με την χρήση οιδήμετρου διαχωρίζεται σε 2 κατηγορίες και είναι οι κάτωθι:

- Δοκιμή διόγκωσης υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση: πραγματοποιείται με την επιβολή σταθερής κατακόρυφης τάσης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής
- Δοκιμή σταθερού όγκου: πραγματοποιείται με την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση να αυξάνει με σκοπό να παραμείνει σταθερός ο όγκος του δοκιμίου

Οι δοκιμές διόγκωσης υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση μπορούν να χωρισθούν επιπλέον σε δυο υποκατηγορίες.

1. Τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης στην οποία η τιμή της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης κυμαίνεται στο 1 kPa.
2. Τη δοκιμή σταθερού φορτίου, κατά την οποία εξετάζονται περισσότερα του ενός δοκίμια με διαφορετική επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση.

Στην συνέχεια του Κεφαλαίου θα αναλυθεί κάθε κατηγορία με σκοπό να καταγραφεί κάθε μέθοδος, καθώς επίσης και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δοκιμών (Xeidakis et al, 2004). Η αναφορά των δοκιμών γίνεται για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου διόγκωσης. Ωστόσο σημειώνεται ότι θα πραγματοποιηθεί αναφορά στην κατάταξη των διογκούμενων εδαφών καθώς επίσης και η διαδικασία που πραγματοποιείται για την ταξινόμηση τους.

3.4.1. Κατάταξη διαδικασιών για διογκούμενα εδάφη

Οι περισσότεροι εθνικοί κώδικες εφαρμογής δεν δίδουν χαρακτηρισμό η κατάταξη για τα διογκούμενα εδάφη, παρόλο που τα διογκούμενα εδάφη είναι κατανομημένα παγκοσμίως σχεδόν σε όλες στις γεωγραφικές τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο, προκαλώντας διαταραχές στις κατασκευές που βρέθηκαν πάνω σε αυτά και ταλαιπωρία στους χρήστες. Μια απλή προσέγγιση φιλική στο χρήστη βασίστηκε στον ελεύθερο λόγο διόγκωσης, οριζόμενος ως ο όγκος του εδαφικού ιζήματος σε αποσταγμένο νερό προς αυτό σε τετραχλωράνθρακα ή κηροζίνη. Είναι διατυπωμένος θεωρώντας την συμβατότητα των αποτελεσμάτων με οιδήμετρο δοκιμών ελεύθερης διόγκωσης και ορυκτολογίας της αργίλου του εδάφους. Οι

στατιστικές ενδείξεις οι οποίες παρέχονται αποδεικνύουν ξεκάθαρα ότι ενώ η αξιολόγηση της διογκωσιμότητας του εδάφους είναι βασισμένη σε ιδιότητες δεικτών, είναι υπερεκτιμημένη, υπάρχει μια συνέπεια στην κατηγοριοποίηση που βασίζεται στα αποτελέσματα των οιδημετρικών δοκιμών και την προτεινόμενη προσέγγιση. Συνιστάται ότι απλές προσεγγίσεις σαν αυτή που προτείνεται αρκούν ώστε να κατατάξουν την διογκωτική φύση των εδαφών και να εισαχθούν στους κανονισμούς.

Μια ταξινόμηση εδάφους είναι μια συστηματική μέθοδος κατηγοριοποίησης των εδαφών σε διάφορες ομάδες και υποομάδες σύμφωνα με τη πιθανή μηχανική τους συμπεριφορά αλλά χωρίς λεπτομερείς περιγραφές. Τα περισσότερα από τα παλαιότερα συστήματα ταξινόμησης ήταν βασισμένα στην κοκκομετρία (π.χ. MIT ταξινόμηση) και την υφή του εδάφους (π.χ. ταξινόμηση υφής). Ωστόσο, με την εισαγωγή των ορίων Atterberg, νέες ταξινομήσεις συστημάτων έχουν προκύψει.

Είναι εφικτός ο εντοπισμός αρκετών συστημάτων ταξινόμησης όπως του ενοποιημένου συστήματος ταξινόμησης εδαφών Casagrande (USCS), το American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), το εδαφολογικό σύστημα ταξινόμησης, το ομοσπονδιακό σύστημα των αερομεταφορών (EAA), το σύστημα της κυβέρνησης των ΗΠΑ για δημόσιους δρόμους (PRA) και το σύστημα ταξινόμησης βάσει της υφής. Επί του παρόντος το USCS και το AASHTO σύστημα, χρησιμοποιούνται σε έργα εφαρμογής πολιτικού μηχανικού.

Το USCS αρχικά αναπτύχθηκε από τον Casagrande και τροποποιήθηκε αργότερα από το Αμερικάνικο γραφείο των εγγειοβελτιωτικών (USBR) και το Αμερικανικό σώμα των μηχανικών του στρατού, για τη βελτίωση της εφαρμογής του σε περισσότερους τομείς. Περισσότεροι εθνικοί κώδικες όπως ο ASTM D2487-93, BS 5930 και IS1498 ακολουθούν αυτή την τροποποιημένη εκδοχή του USCS ως έχει ή με ελαφριά τροποποίηση.

Και τα δύο συστήματα, δηλαδή τα USCS και AASHTO βασίζουν την ταξινόμηση των εδαφών για τους σκοπούς της μηχανικής στα χαρακτηριστικά του μεγέθους των κόκκων, του ορίου υδαρότητας (WL), και του δείκτη πλαστικότητας (LP) των εδαφών. Η υποομάδα των χονδρόκοκκων εδαφών γίνεται με τη βοήθεια των παραμέτρων όπως η ομοιομορφία του συντελεστή (Cu) και του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου καμπυλότητας (Cc) που είναι το κριτήριο για τη διαβάθμιση τους. Η υποομάδα των λεπτόκοκκων εδαφών βασίζεται εξ ολοκλήρου σε ένα διάγραμμα πλαστικότητας (δηλαδή Ip συναρτήσει WI).

Επιπλέον ορισμένοι κώδικες δίνουν μερικά χρήσιμα κριτήρια που πρέπει να ακολουθηθούν για να αποκτηθεί μια χονδρική εκτίμηση των χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως το γωνιώδες των κόκκων συνοχής, τσιμέντωσης, αντοχής εν ξηρώ, πλαστικότητα, διογκωσιμότητα, (χονδρόκοκκα εδάφη), διόγκωσης, σκληρότητας, οργανικό περιεχόμενο (π.χ. ονομασία ASTM D2488-93,5 Is 14984). Ωστόσο, εκτός από την IS1498,4 αυτά τα συστήματα δεν έχουν τα κριτήρια για την αξιολόγηση της διόγκωσης του εδάφους.

Όπως έχει προαναφερθεί τα διογκούμενα εδάφη βρίσκονται εκτενώς στις τροπικές περιοχές. Η παρουσία διογκούμενων εδαφών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις κατασκευαστικές δραστηριότητες σε πολλά μέρη στις νότιο-δυτικές Ηνωμένες πολιτείες, τη Νότια Αμερική, τον Καναδά, την Αφρική, την Αυστραλία, την Ευρώπη, την Ινδία, την Κίνα και τη Μέση Ανατολή. Όλο και περισσότερες περιοχές με διογκούμενα εδάφη ανακαλύπτονται κάθε χρόνο, με την αύξηση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, ιδιαίτερα στις υπό ανάπτυξη χώρες. Αυτά τα εδάφη χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός

μεγάλου ποσοστού πολύ δραστικών αργιλικών ορυκτών της ομάδας μοντμοριλλονίτη που είναι υπεύθυνες για την έντονη ικανότητα μεταβολής του όγκου των εδαφών. Ένας αριθμός εδαφών, όπως ηφαιστειακή τέφρα και διατομών δεν μπορούν να ομαδοποιηθούν με τη χρήση των υπαρχόντων συστημάτων ταξινόμησης. Ωστόσο, η εμφάνιση τους περιορίζεται σε ορισμένες περιοχές. Σε αντίθεση με αυτά τα διογκούμενα εδάφη κατανέμονται γεωγραφικά πολύ ευρέως και καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός και η ταξινόμηση αυτών των εδαφών είναι απαραίτητη.

Πολλά κριτήρια είναι διαθέσιμα για να προσδιοριστούν και να χαρακτηριστούν τα διογκούμενα εδάφη, όπως το όριο υδαρότητας (Πίνακας 12), δείκτης πλαστικότητας (Πίνακας 13), όριο συρρίκνωσης (Πίνακας 14), δείκτης ελεύθερης διόγκωσης (FSI) (Πίνακας 14), τη δραστηριότητα της υγρασίας επί τοις εκατό.

Βαθμός διόγκωσης	WI%	
	Chen	IS 1498
Χαμηλός	<30	20-35
Μεσαίος	30-40	35-50
Υψηλός	40-60	50-70
Πολύ υψηλός	>60	70-90

Πίνακας 12: Όριο υδαρότητας
[Πηγή: <https://www.researchgate.net/>]

Βαθμός διόγκωσης	I _p %		
	Holtz and Gibbs	Chen	IS 1498
Χαμηλός	<20	0-15	<12
Μεσαίος	12-32	10-35	12-23
Υψηλός	23-45	20-55	23-32
Πολύ υψηλός	>32	>35	>32

Πίνακας 13: Δείκτης πλαστικότητας
[Πηγή: <https://www.researchgate.net/>]

Βαθμός διόγκωσης	Κολλοειδές περιεχόμενο % μείον 0.001 mm	Όριο συρρίκνωσης %	Δείκτης συρρίκνωσης %	Δείκτης ελεύθερης διόγκωσης %	Διόγκωση % σε οιδήμετρο κατά τους Holtz and Gibbs	Διόγκωση % σε οιδήμετρο κατά τους Seed et al.
Χαμηλός	<17	>13	<15	<50	<10	0-1.5
Μεσαίος	12-27	8-18	15-30	50-100	10-20	1.5-5.0
Υψηλός	18-37	6-12	30-60	100-200	20-30	5-25
Πολύ υψηλός	<27	<10	>60	>200	>30	>25

Πίνακας 14: Όριο συρρίκνωσης
[Πηγή: <https://www.researchgate.net/>]

Δείκτης ελεύθερης διόγκωσης MFSI: cm ³ /g	Όγκος ιζήματος σε τετραχλωράνθρακα cm ³ /g	Τύπος αργίλου	Διογκωσιμότητα του εδάφους
--	---	---------------	----------------------------

<1.5	1.10-3.00	Μη διογκούμενη	Αμελητέα
1.5-2.0	>1.1 και <MFSI	Μείγμα διογκούμενης και μη διογκούμενης	Χαμηλή
1.5-2.0	≤1.1	Διογκούμενη	Μέτρια
2.0-4.0	≤1.1	Διογκούμενη	Υψηλή
>4.0	≤1.1	Διογκούμενη	Πολύ υψηλή

Πίνακας 15: Δείκτης ελεύθερης διόγκωσης (MFSI)

[Πηγή:<https://www.researchgate.net>]

Ο Chen (1975) παρατήρησε ότι δεν υπήρχε κανένα αποδεικτικό στοιχείο συσχέτισης μεταξύ δυναμικού διόγκωσης και ορίου συρρίκνωσης. Οι Sridhavan και Ptakash (1998) έχουν επίσης δείξει ότι το όριο συρρίκνωσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για την πρόβλεψη του δυναμικού διόγκωσης του εδάφους και ότι οι μηχανισμοί που διέπουν την συρρίκνωση και διόγκωση είναι εντελώς διαφορετικοί.

Οι Holtz και Gibbs (1956) πρότειναν την δοκιμή της ελεύθερης διόγκωσης επί τοις εκατό. Αποτελείται ρίχνοντας αργά 10 cm³ του ξεραμένου σε φούρνο εδάφους (περνώντας από κόσκινο 425 μm) σε 100 cm³ ογκομετρικού δοχείου γεμάτο με αποσταγμένο νερό και σημειώνοντας τον όγκο του εδάφους αφού τελειώσει η καθίζηση στον πυθμένα του δοχείου. Η ελεύθερη διόγκωση αναφέρεται στη συνέχεια ως η αύξηση του όγκου του εδάφους που εκφράζεται ως το ποσοστό του αρχικού όγκου. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η μέτρηση 10 cm³ του εδάφους δεν είναι τόσο εύκολη και ως εκ τούτου η διαδικασία εισάγει προσωπική κρίση ως έναν ακόμα παράγοντα. Είναι φυσιολογικό να ποσοτικοποιηθεί το 10 cm³ ως ο όγκος που καταλαμβάνεται από 10 gr έδαφος. Αυτό δεν περιλαμβάνει παραλλαγές της πυκνότητας.

Ο IS 14984 δίνει ένα κριτήριο για την πρόβλεψη της διογκωσιμότητας των εδαφών που βασίζεται στην ελεύθερη διόγκωση και υπολογίζεται από την σχέση:

$$FSI = \frac{(V_d - V_k)}{V_k} \times 100 \quad (3.1)$$

Όπου:

V_d= ο όγκος του ιζημάτος των 10 gr του ξηρανθέντος σε φούρνο χώματος που περνά από κόσκινο 425 μm, τοποθετώντας σε ογκομετρικό δοχείο μέτρησης των 100 ml που περιέχει αποσταγμένο νερό,

V_k = ο όγκος των ιζημάτων 10 gr αποξηραμένου εδάφους στον φούρνο που περνά από κόσκινο 425 μm στο οποίο έχει τοποθετηθεί 100 ml ογκομετρικού δοχείου μέτρησης το οποίο περιέχει κηροζίνη.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δίνει αρνητικούς δείκτες ελεύθερης διόγκωσης για εδάφη πλούσια σε ο καολινίτη και ενδέχεται να υποτιμούν τη διογκωσιμότητα των μοντοριλλωνιτικών εδαφών, εάν τα εδάφη περιέχουν μια σημαντική ποσότητα καολινιτικής αργίλου. Για να εξαιρεθεί αυτή η διαστολή Shidharan et.al (1985) έχουν ορίσει τον τροποποιημένο δείκτη ελεύθερης διόγκωσης (MFSI) ως ο λόγος του όγκου ιζήματος

ισορροπίας (V_d) μετά από ανάμειξη 10 gr αποξηραμένου εδάφους με αποσταγμένο νερό ώστε να σχηματιστεί ένα μείγμα εδάφους – νερού 100 ml αφού αφηθεί να ηρεμήσει, προς το ξηρό βάρος του εδάφους.

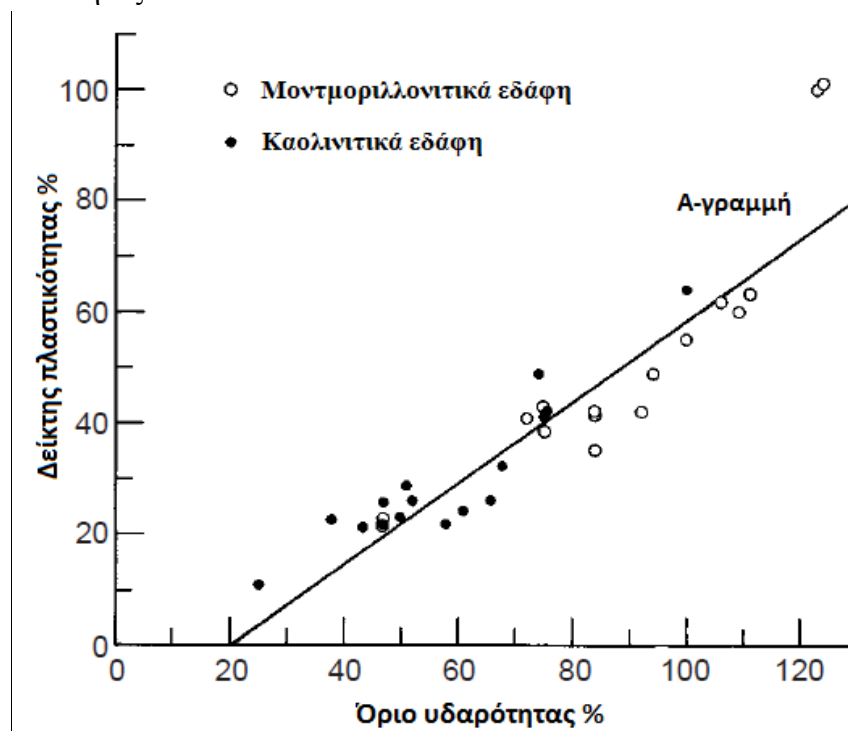
$$MFSI = \frac{V_d}{10} \quad (3.2)$$

Όπου:

V_d = λόγος του όγκου ιζήματος ισορροπίας

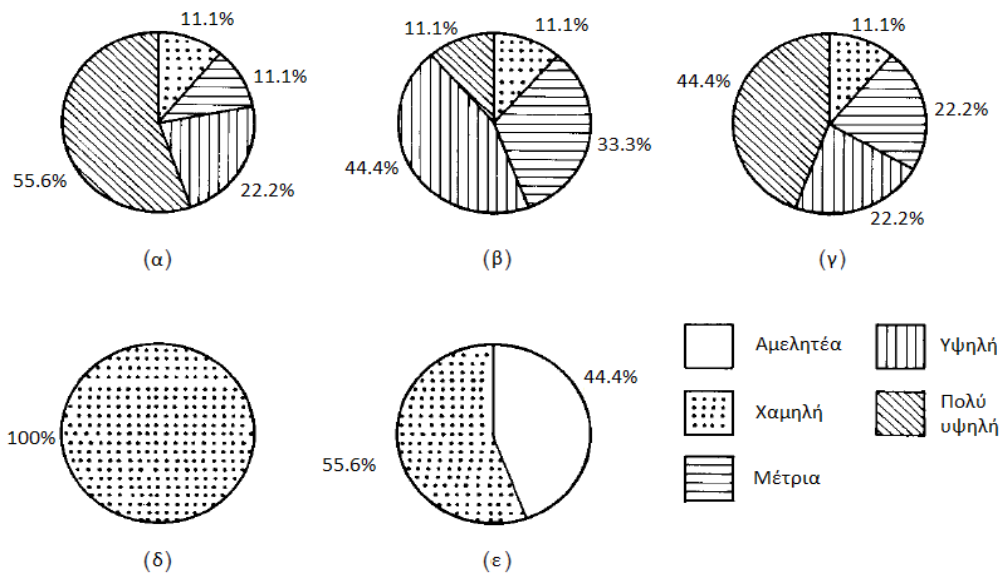
Ο Sridharan et.al (1986) έχει παρατηρήσει ότι ο όγκος των ιζημάτων που καταλαμβάνεται στη μονάδα βάρους του ξηρού εδάφους σε αποσταγμένο νερό μαζί με τετραχλωράνθρακα παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη διαστολή του εδάφους και τη φύση του εδάφους τύπου διογκούμενα/μη διογκούμενα/συνδυασμός των δύο.

Η προβλεπτική ικανότητα των MFSI είναι προφανή από τις ακόλουθες στατιστικές απεικονίσεις. Περίπου 32 εδάφη από διάφορα μέρη της Ινδίας, 16 των οποίων καολινίτης (25% 4WL 24%) και τα υπόλοιπα 16 μοντμοριλλονίτης (47% 4WL41 24%) ελήφθησαν υπόψη για την ανάλυση. Αυτά τα εδάφη τοποθετήθηκαν στο διάγραμμα πλαστικότητας όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2. Μπορεί να σημειωθεί ότι τόσο τα καολινιτικά και τα μοντμοριλλονιτικά εδάφη βρίσκονται πάνω και κάτω από την A-γραμμή. Ως εκ τούτου, τίποτα δεν μπορεί να συναχθεί σχετικά με την διογκούμενη φύση τους μόνο με τη θέση τους στον χάρτη πλαστικότητας.



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα πλαστικότητας σε διάφορα εδάφη

[Πηγή: <https://www.researchgate.net/>]



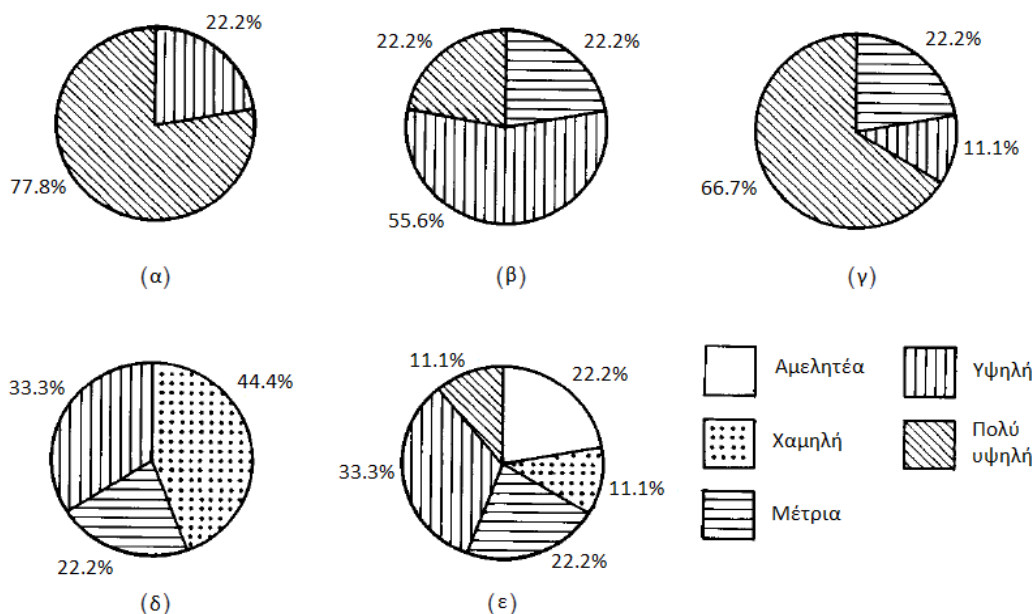
Σχήμα 33: Πρόβλεψη της διογκωσιμότητας των καολινιτικών εδαφών από: (α)το όριο υδαρότητας, (β)το δείκτη πλαστικότητας, (γ)την ενεργότητα, (δ)την οιδομετρική δοκιμή και (ε)τον δείκτη ελεύθερης διόγκωσης MFSI
[Πηγή:<https://www.researchgate.net/>]

Η προαναφερόμενη διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο φάσεις οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια.

❖ *Πρώτη φάση*

Στην πρώτη φάση της ανάλυσης θεωρούνται 18 εδάφη (9 καολινίτη και 9 μοντμοριλλονίτη). Ο βαθμός διόγκωσης αυτών των εδαφών έχει αξιολογηθεί με βάση το όριο υδαρότητας τους, του δείκτη πλαστικότητας, της ενεργότητας, ποσοστό διόγκωσης στο τεστ του οιδήμετρου και MFSI. Οι Winterkorn και Fang (1986) και Chen (1975) δείχνουν ότι η πιο χρήσιμη και αξιόπιστη αξιολόγηση της σε δυνατότητες διόγκωσης για τα διογκούμενα εδάφη μπορούν να ληφθούν από συμβατικές δοκιμές με οιδήμετρο. Η συνολική μεταβολή του όγκου του εδάφους από την ξηρή (στον αέρα) κατάσταση έως την κορεσμένη κάτω από επιφόρτιση 7 kPa σε οιδήμετρο. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το οιδημετρικές δοκιμές διόγκωσης που διεξήχθησαν σε ξηρά εδάφη αξιολογούμενα σύμφωνα με τον Πίνακα 14, λαμβάνονται σαν σημείο αναφοράς.

Το Σχήμα 33 δείχνει τη σύγκριση μιας τέτοιας αξιολόγησης για εδάφη καολινίτη. Ενώ οι οιδημετρικές δοκιμές ορίζουν ένα χαμηλό βαθμό διόγκωσης για τα εν λόγω εδάφη πιστά στην ορυκτολογία τους (σημειώστε ότι ο καολινίτης είναι ένα μη διογκούμενο ορυκτό αργίλου), τα κριτήρια με βάση το όριο υδαρότητας, του δείκτη πλαστικότητας και της ενεργότητας δείχνουν ένα μεγάλο ποσοστό των μη διογκούμενων εδαφών για να έχουν μια χαμηλή έως πολύ υψηλού βαθμού διαστολή περίπου σε 55.5, 66.6 και 77.8% των περιπτώσεων αντίστοιχα. Ωστόσο, οι αξιολογήσεις βασίζονται στην MFSI που είναι σε καλύτερη συμφωνία με εκείνα από τις οιδημετρικές δοκιμές και δίνονται στον Πίνακα 15.



Σχήμα 34: Πρόβλεψη της διογκωσιμότητας των μοντμοριλλονιτικών εδαφών από: (α)το όριο υδαρότητας, (β)το δείκτη πλαστικότητας, (γ)την ενεργότητα, (δ)την οιδομετρική δοκιμή και (ε)τον δείκτη ελεύθερης διόγκωσης MFSI
[Πηγή:<https://www.researchgate.net/>]

Το Σχήμα 34 απεικονίζει την σύγκριση της αξιολόγησης του βαθμού διόγκωσης των μοντμοριλλονιτικών εδαφών από τα διαφορετικά κριτήρια. Πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλαστικότητας και η δραστηριότητα υπερεκτιμούν σημαντικά τη διόγκωση του εδάφους σε σύγκριση με εκείνες που παρατηρήθηκαν σε οιδομετρικές δοκιμές. Εισαγωγικά ενώ μπορεί να είναι αλήθεια ότι το έδαφος υψηλής διόγκωσης θα εκδηλωθεί σαν ένα ακίνητο υψηλό δείκτη, το αντίστροφο δεν είναι απαραίτητο να συμβεί. Από άλλη πλευρά, οι προβλέψεις της διόγκωσης του εδάφους με βάση την προτεινόμενη MFSI είναι και πάλι αρκετά ικανοποιητική.

Δεν είναι πρόωρο να αναφέρουμε ότι οι μηχανισμοί που ελέγχουν το ορίου υδαρότητας του καολινιτικού και του μοντμοριλλονιτικού εδάφους είναι εντελώς διαφορετικός το ένας από το άλλο. Ενώ το όριο υδαρότητας ενός εδάφους καολινίτη ελέγχεται από τη διάταξη των σωματιδιακών και των διασωματιδιακών δυνάμεων έλξης, εκείνη του εδάφους μοντμοριλλονίτη ελέγχεται από το διπλό πάχος στρώματος. Ως εκ τούτου αυτά τα υψηλότερα όρια υδαρότητας δεν σημαίνει κατ ανάγκη διογκούμενα εδάφη μοντμοριλλονίτη. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το όριο υδαρότητας και οι σχετικές ιδιότητες του δείκτη, χωρίς θεώρηση της ορυκτολογίας του εδάφους, δεν μπορούν να δείξουν ικανοποιητικά τη διόγκωση του εδάφους. Αντ αυτού μπορούν να δώσουν μια εντελώς διαφορετική και λάθος εικόνα.

Έχει παρατηρηθεί από τους συγγραφείς ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι τιμές του όγκου των ιζημάτων, που λαμβάνονται από τις ελεύθερες δοκιμές σε νερό και σε τετραχλωράνθρακα δεν εμπίπτουν σε καμία από τις κατηγορίες που αναφέρονται στον πίνακα 5, με αποτέλεσμα την ασάφεια. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση του

λόγου της ισορροπίας του όγκου ιζήματος 10 gr αποξηραμένο σε κλίβανο εδάφους που περνά από κόσκινο 425 μm σε αποσταγμένο νερό, προς αυτόν σε τετραχλωράνθρακα, η οποία ορίζεται εδώ ως **ελεύθερος λόγος διόγκωσης**. Είναι η εμπειρία των συγγραφέων που ασχολήθηκαν με τα εδάφη του Ινδικού μαύρου βαμβακιού όπου οι προβλέψεις διόγκωσης από την οιδομετρική δοκιμή που προτείνει ο Holtz και ο Gibbs είναι ελαφρώς υποτιμημένες. Με την εμπειρία θεωρώντας την ορυκτολογία της αργίλου των εδαφών, οι συγγραφείς προτείνουν ένα κριτήριο για την ταξινόμηση των εδαφών με βάση την διογκωτική φύση τους όπως φαίνεται στον Πίνακα 16.

Το Σχήμα 35 δείχνει τις στατιστικές προβλέψεις της διόγκωσης του εδάφους, 18 εδαφών τα οποία θεωρούνται στη πρώτη φάση της ανάλυσης, με την προτεινόμενη ταξινόμηση βασισμένη στην διόγκωση από οιδομετρικές δοκιμές και από τον λόγο της ελεύθερης διόγκωσης.

❖ Δεύτερη Φάση

Οι Seed et al. (1962) έχουν επίσης προτείνει μια ταξινόμηση της διόγκωσης με βάση το ποσοστιαίο δυναμικό διόγκωσης που παρατηρείται σε συμπαγή εδάφη στη μέγιστη ξηρή πυκνότητα και βέλτιστες συνθήκες υγρασίας, κάτω από επιφόρτιση των 7 KPa. Προκειμένου να αποδεχθεί η βελτιωμένη ικανότητα του προτεινόμενου λόγου διόγκωσης στην ταξινόμηση των εδαφών, η δεύτερη φάση της ανάλυσης γίνεται ως εξής.

Δεκατέσσερα εδάφη, επτά καολινίτη και επτά μοντμοριλλονίτη, συμπίεστηκαν σε μέγιστη ξηρή πυκνότητα και βέλτιστες συνθήκες υγρασίας με πρότυπο Proctor και αφήθηκαν να διογκωθούν κάτω από την τιμή των 7 kPa. Χρησιμοποιώντας τα κριτήρια των Seed et al. (1962) και με βάση τον προτεινόμενο λόγο ελεύθερης διόγκωσης, τα δεκατέσσερα εδάφη ταξινομούνται με βάση την διογκωτική φύση τους και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχ.5. Μια πολύ καλή συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των προβλέψεων από δύο εντελώς διαφορετικές διαδικασίες δοκιμών που δείχνει την αποδοχή του λόγου ελεύθερης διόγκωσης για την πρόβλεψη της διαστολής του εδάφους.

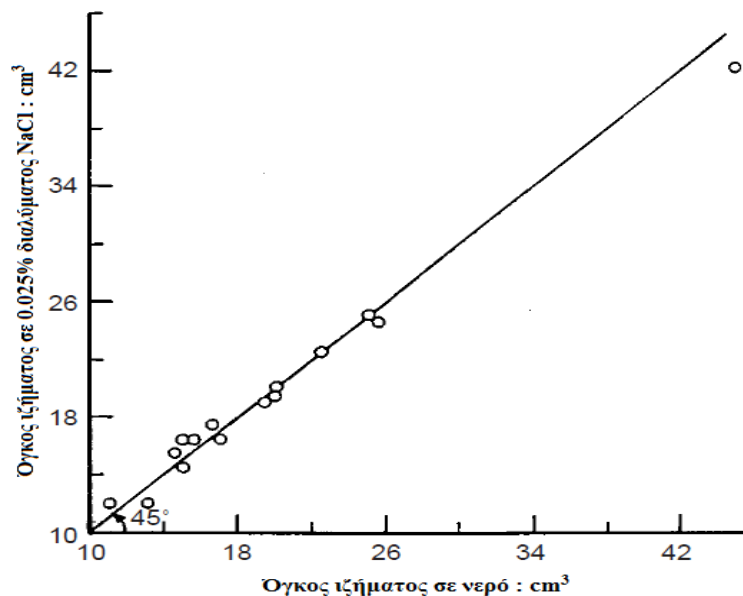
Ο προσδιορισμός του όγκου ιζήματος της εξαιρετικά διογκούμενων εδαφών σε αποσταγμένο νερό μπορεί να είναι προβληματικός, καθώς τέτοια εδάφη χρειάζονται απαγορευτικά πολύ χρόνο για να καθιζήσουν. Αυτή η δυσκολία μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση 0,025% διαλύματος NaCl αντί του αποσταγμένου νερού, η οποία μειώνει το χρόνο σημαντικά χωρίς καμιά αλλαγή στον τελικό όγκο ισορροπίας ιζήματος. Έχει παρατηρηθεί ότι τα εδάφη έχουν χρειαστεί περίπου 24-216 ώρες για να φθάσουν σε ισορροπία με νερό ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Ωστόσο τα ίδια εδάφη χρειάστηκαν περίπου 4-24 ώρες για να φθάσουν στην ισορροπία σε διάλυμα το οποίο είναι σχετικά λιγότερο πτητικό από τον τετραχλωράνθρακα. Οι όγκοι ισορροπίας ιζήματος που επιτυγχάνονται σε αυτά τα δύο υγρά είναι σχεδόν οι ίδιοι με ένα μέγιστο σφάλμα $\pm 5\%$. Ως εκ τούτου η χρήση της κηροζίνης αντί του τετραχλωράνθρακα προτείνεται, λόγω μεγαλύτερης προσβασιμότητας της.

Η ανάλυση που περιγράφηκε προηγουμένως έδειξε σαφώς ότι οι ιδιότητες του δείκτη, όπως το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλαστικότητας και οι σχετικές παράμετροι δεν μπορούν να προβλέψουν ικανοποιητικά τη διόγκωση του εδάφους, καθώς δεν θεωρούν την επιρροή της ορυκτολογίας της αργίλου. Η προσέγγιση του δείκτη ελεύθερης διόγκωσης, εκτός από το γεγονός για πρόβλεψη της διόγκωσης του εδάφους, πιο ρεαλιστικά και ικανοποιητικά, δίνει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τη φύση της ορυκτολογίας των

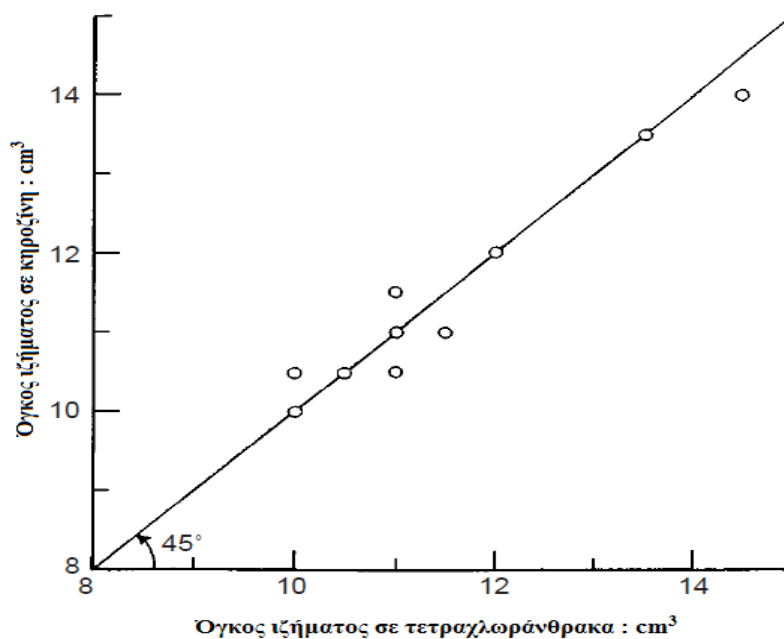
εδαφών της αργίλου. Η δοκιμή του δείκτη ελεύθερης διόγκωσης αναφέρεται σε αυτό το άρθρο και είναι μια πολύ απλή και φιλική διαδικασία δοκιμής στον χρήστη, που απαιτεί απλά εργαστηριακά εργαλεία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με τη μορφή λόγου ελεύθερης διόγκωσης προτείνεται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αποκτηθεί πολύ αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τον βαθμό διόγκωσης του εδάφους και για το είδος του (Πίνακας 16). Καθώς οι όγκοι του ιζήματος στο μη πολικό τετραχλωριούχο άνθρακα και την υγρή κηροζίνη είναι σχεδόν ίσες, η δυνατότητα εφαρμογής της δοκιμής μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με τη χρήση κοινής διαθέσιμης κηροζίνης στη θέση του τετραχλωράνθρακα. Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι θα ήταν χρήσιμη η συμπερίληψη μιας τέτοιας απλής δοκιμής για να αξιολογήσουν την διογκωτική φύση των εδαφών στους κώδικες των διάφορων εθνικών οργανώσεων θα ήταν χρήσιμη.

Διόγκωση % στο οιδήμετρο	Λόγος ελεύθερης διόγκωσης	Τύπος αργίλου	Διογκωσιμότητα του εδάφους
<1	≤ 1.0	Μη διογκούμενη	Αμελητέα
1-5	1.0-1.5	Μείγμα διογκούμενης και μη διογκούμενης	Χαμηλή
5-15	1.5-2.0	Διογκούμενη	Μέτρια
15-25	2.0-4.0	Διογκούμενη	Υψηλή
>25	>4.0	Διογκούμενη	Πολύ υψηλή

Πίνακας 16: Προτεινόμενη κατηγοριοποίηση διογκούμενων εδαφών
[Πηγή:<https://www.researchgate.net/>]



Διάγραμμα 3: Σύγκριση του όγκου ισορροπίας ιζήματος σε 0.025% διαλύματος NaCl με αυτού σε αποσταγμένο νερό
[Πηγή:<https://www.researchgate.net/>]



Διάγραμμα 4: Σύγκριση του όγκου ισορροπίας ιζήματος σε κηροζίνη με αυτού σε τετραχλωράνθρακα

[Πηγή:<https://www.researchgate.net/publication/>]

3.4.2. Δοκιμή αναγνώρισης των διογκούμενων εδαφών

Στην ύπαιθρο κάθε αργιλικό, άμμο-αργιλώδες ή άργιλο-αμμώδες έδαφος το οποίο θρυμματίζεται εύκολα με το χέρι, και κατά την διάρκεια του θέρους σχηματίζει μεμβρανοειδή επιφάνεια με μπακλαβαδωτή σχιστότητα, θα πρέπει να θεωρείται ύποπτο για ενδεχόμενη διόγκωση. Το χρώμα δίνει μια πρώτη εικόνα για το είδος των ορυκτών της αργίλου που περιέχονται στο έδαφος. Η εργαστηριακή έρευνα είναι απαραίτητη στις περιπτώσεις αυτές.

Στο εργοστάσιο ο τύπος του ορυκτού και το ποσοστό συμμετοχής, προσδιορίζεται χωρίς αμφιβολία με την μέθοδο ακτινών X (x-ray diffraction) και με την ταχύτητα καθίζησης με βάση το νόμο του Stokes. Η ολική δυνατότητα διόγκωσης και συρρίκνωσης προσδιορίζεται εργαστηριακά με το οιδήμετρο. Τα όρια του Atterberg εμπειρικά έχουν αποδείξει ότι η δυνατότητα διόγκωσης υπάρχει σε εδάφη που έχουν όριο υδαρατότητας μεγαλύτερου του 40 και δείκτη πλαστικότητας μεγαλύτερου του 15.

Όταν η διόγκωση του εδάφους εμποδίζεται τότε εμφανίζεται μια πίεση διόγκωσης ποικίλου μεγέθους. Πίεση διόγκωσης της τάξης του $1,50\text{kg/cm}^2$ μέχρι και $3,00\text{kg/cm}^2$ παρουσιάζεται συχνά. Για τον προσδιορισμό αυτής της πίεσης διόγκωσης σχεδιάστηκε μια συσκευή δοκιμής πίεσης διόγκωσης που παρουσιάζεται παρακάτω.

Απαιτούμενα όργανα είναι τα ακόλουθα:

- Πλαίσιο φόρτισης
- Χειροκίνητος μοχλός (4tn)

- Τυποποιημένος μορφοποιητής τύπου proctor με στεφάνη και διάτρητη βάση
- Διάτρηση επάνω πλάκα με ένα κεντρικό έμβολο φόρτισης
- Μετρητικός δακτύλιος (δυνατότητα 2tn)
- Μετρητικός δακτύλιος παραμόρφωσης (0,01 mm)
- Στυπόχαρτο, λιπαντικό
- Σκεύος ανάμιξης, σέσουλα, μαχαιράκι, παχύμετρο
- Δοχείο κορεσμού
- Χρονόμετρο

Διαδικασία δοκιμής

❖ Προετοιμασία δοκιμίου

Το προς δοκιμή εδαφικό υλικό αρχικά ξηραίνεται και κατόπιν το χτυπάμε με ένα ελαστικό σφυρί. Παίρνουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα εδάφους και στην συνέχεια το περνάμε από κόσκινο 200. Απαιτούνται 3-4 kg εδαφικό υλικό. Το κοσκινισμένο υλικό το ξηραίνουμε στον φούρνο για 24h.

❖ Συμπύκνωση του δείγματος και δοκιμή

Η συμπύκνωση του δείγματος γίνεται σε τυποποιημένο μορφοποιητή διαμέτρου 10cm ύψους 12cm και όγκου 945cm³. Η ποσότητα του εδαφικού υλικού που απαιτείται να συμπυκνωθεί σε μια τιμή γ_a που αντιστοιχεί στην επί τόπου ξηρή πυκνότητα δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_a \times \text{όγκος} = \text{βάρος ξηραμένου εδάφους} \quad (3.3)$$

Ο μορφοποιητής στερεώνεται σε κατάλληλη διάτρητη βάση και τοποθετούμε στυπόχαρτο πάνω στη βάση του. Το έδαφος έχει είδη ζυγιστεί και χωρίζεται σε περίπου τρία ίσα μέρη. Το υλικό συμπυκνώνεται κατά στρώση, σε τρεις διαδοχικές στρώσεις πολύ προσεκτικά με στατική μορφοποίηση και τακτοποιείται στο μορφοποιητή έτσι ώστε η επάνω επιφάνεια του να είναι επίπεδη. Κατόπιν βάζουμε την επάνω στεφάνη και ένα στυπόχαρτο (φίλτρο) στην επιφάνεια του υλικού τοποθετούμε μια διάτρητη πλάκα με διάμετρο ελαφρά μικρότερη των 10cm μέσα στη στεφάνη. Αυτή η πλάκα φέρει ένα κεντρικό έμβολο που καταλήγει σε ένα σφαιρίδιο φόρτισης.

❖ Συσκευή δόκιμης και διαδικασίας

Τοποθετούμε το όλο σύνολο στο δοχείο κορεσμού και το ίδιο δοχείο μαζί με το μορφοποιητή πάνω στο πλαίσιο αντίδρασης της συσκευής, πάνω στο οποίο προσαρμόζουμε τον χειροκίνητο κοχλία με το μετρητικό δακτύλιο. Αυτό ο χειροκίνητος ανυψωτικός κοχλίας μαζί με τον δακτύλιο μέτρησης φέρεται αργά προς τα κάτω ώστε να ακουμπήσει το σύστημα σφαιριδίου φόρτισης του επάνω εμβόλου. Μόλις ο μετρητικός δακτύλιος έρθει σε επαφή με το σύστημα του σφαιριδίου φόρτισης και το έμβολο, ο δείκτης του μετρητικού δακτυλίου κινείται. Οι αρχικές ενδείξεις αντιστοιχούν στο φορτίο έδρασης και στην παραλαβή των τριβών.

Ο μετρητικός παραμορφωτής είναι προσαρμοσμένος σε μια από τις δοκούς του πλαισίου στήριξης και στερεώνεται κατάλληλα ώστε να παραμείνει πάνω στην πλάκα που συνδέεται με τον άξονα του εμβόλου. Ο μετρητής καταγράφει την παραμόρφωση του δοκιμίου όταν αρχίζει να είναι κορεσμένο.

Τόσο ο μετρητικός δακτύλιος φόρτισης όσο και ο μετρητής παραμόρφωσης τοποθετούνται σε μηδενική ένδειξη. Το όλο σύστημα είναι έτοιμο για την έναρξη του πειράματος. Γεμίζουμε εντελώς το δοχείο κορεσμού. Μόλις το νερό χυθεί μέσα στο δοχείο κορεσμού, τότε αμέσως κινείται με γρήγορο ρυθμό μέσα στο συμπυκνωμένο διογκούμενο έδαφος από την πάνω και την κάτω βάση του δοκιμίου και το έδαφος παρουσιάζει την τάση διόγκωσης.

Η παραμόρφωση καταγράφεται από το μετρητή της παραμόρφωσης και από το μετρητικό δακτύλιο. Στο αρχικό στάδιο του κορεσμού η διαδικασία αυτή είναι πολύ γρήγορη και πρέπει να στρέφουμε τον χειροκίνητο ανυψωτικό κοχλία προς τα κάτω για να επαναφέρει τον μετρητή παραμόρφωσης σε μηδενική ένδειξη. Με τον χειρισμό αυτό ο μετρητικός δακτύλιος δίνει όλο και μεγαλύτερες ενδείξεις. Οι ενδείξεις του καταγράφονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπου και αυτά στην συνέχεια συμπληρώνονται. Ο πλήρης κορεσμός του συμπυκνωμένου στο μορφοποιητή εδάφους απαιτεί κατά ελάχιστο χρόνο 4 ημέρες. Μετά από τις 4 ημέρες οι ενδείξεις είναι σταθερές και δείχνουν την πλήρη ανάπτυξη της πίεσης χωρίς μεταβολή του όγκου.

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

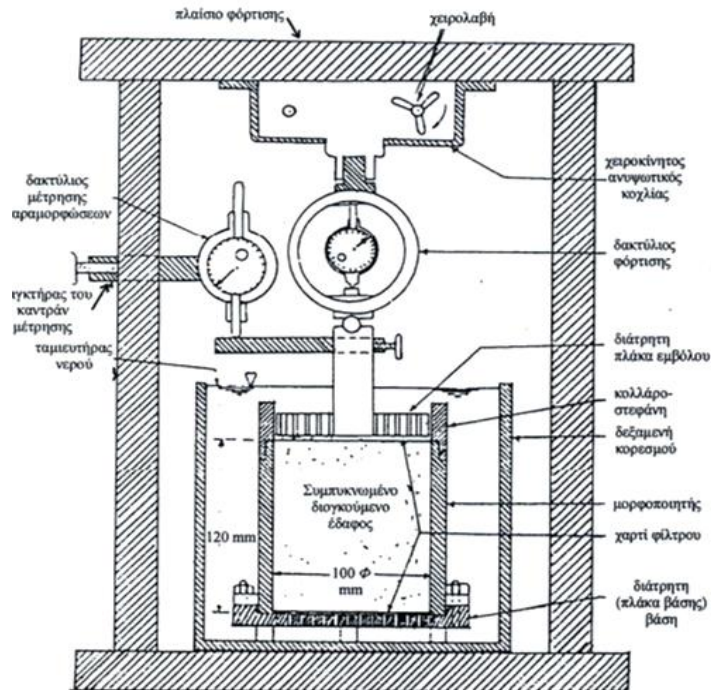
Μετά από 4 μέρες η μέγιστη ένδειξη του μετρητικού δακτυλίου σημειώνεται (σε υποδιαίρεσεις). Ισχύει:

- Max ένδειξη σε υποδιαίρεσεις x την σταθερά του μετρητικού δακτυλίου = φορτίο σε Kg (εμφανίζεται σαν προς τα επάνω ώθηση του διογκούμενου εδάφους)
- Πίεση διόγκωσης (χωρίς μεταβολή όγκου) δίνεται από την σχέση:

$$q_{sw} = \frac{\text{φορτίο (kg)}}{\text{επιφάνεια δοκιμίου cm}^2} \quad (3.4)$$

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η πραγματική τιμή πίεσης διόγκωσης του εδάφους είναι πάντα σε μηδενική περιεκτικότητα σε νερό (έδαφος ξηραμένο σε φούρνο).

Έχει παρατηρηθεί ότι καθώς αυξάνει η περιεχόμενη υγρασία κατά τη μορφοποίηση του δοκιμίου, η πίεση διόγκωσης μειώνεται. Στη δοκιμή διόγκωσης είναι απαραίτητο να λαμβάνουμε έδαφος εντελώς ξηραμένο από τον φούρνο, όπως ήδη έχει προαναφερθεί, για να είναι σωστή η εκτίμηση της πίεσης διόγκωσης.



Σχήμα 35: Συσκευή δόκιμης αναγνώρισης διογκούμενων εδαφών
[Πηγή: Παπαχαρίσης και συν.,1999]

3.4.3. Δόκιμη Καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας (CBR - CALIFORNIA BEARING RATIO TEST)

Με την μέθοδο CBR πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της διογκωτικής ιδιότητας των εδαφών και αφορά την καταλληλότητα των εδαφών για οδοστρωσία.

Ο λόγος CBR είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την αντοχή εδαφών. Συγκεκριμένα, είναι ένα μέγεθος που προτάθηκε από τον Τομέα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνιας το 1928, ώστε να εκτιμηθεί η ικανότητα των εδαφών ως υλικά έδρασης έργων οδοποιίας. Η μέθοδος υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων με την χρήση του CBR μάλιστα, υιοθετήθηκε κατά τον Β΄ παγκόσμιο πόλεμο από τον αμερικάνικο στρατό, για την μελέτη - κατασκευή διαδρόμων απογείωσης - προσγείωσης αεροσκαφών.

Η δοκιμή CBR, εκτιμά την διατμητική αντοχή ενός εδάφους υπό ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας - πυκνότητας. Από την εκτέλεση της δοκιμής προκύπτει ο λόγος φέρουσας ικανότητας. Ο λόγος είναι χαρακτηριστικός για τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά την δοκιμή (δηλαδή για την συγκεκριμένη υγρασία - πυκνότητα).

Ο αριθμός CBR υπολογίζεται από τον λόγο της πίεσης που απαιτείται ώστε να προκληθεί ένα συγκεκριμένο βάθος διείδυσης του εμβόλου της δοκιμής, σε ένα συμπυκνωμένο δείγμα εδάφους, σε ορισμένη πυκνότητα και υγρασία, προς την πίεση αναφοράς η οποία είναι η απαιτούμενη πίεση ώστε να προκληθεί αυτό το βάθος σε δείγμα σπασμένης πέτρας. Το βάθος αναφοράς είναι 2.54 mm και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα

της σπασμένης πέτρας) είναι 6.9 MPa (70.3 Kg/cm²) καθώς επίσης και 5.08 mm και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα της σπασμένης πέτρας) είναι 10.35 MPa (105.5 Kg/cm²).

Η σπασμένη πέτρα θεωρείται πως έχει την καλύτερη συμπεριφορά για τα έργα οδοποιίας και θα έχει λόγο CBR σχεδόν 100%. Ένα μαλακό έδαφος θα έχει μικρότερο λόγο CBR. Σύμφωνα με τον λόγο CBR, γίνεται και η επιλογή του πάχους του οδοστρώματος, βάσει νομογραφημάτων (μικρές τιμές CBR, απαιτούν μεγάλο πάχος οδοστρώματος). Τα νομογραφήματα αυτά συντάσσονται ανάλογα με το φορτίο που πρόκειται να φέρει το οδόστρωμα (Σακελλαρίου Μ., 2003).

Συνοψίζοντας τα όσα προαναφέρθηκαν η εκτίμηση της διατμητικής αντοχής εξαρτάται από των υπολογισμό των κάτωθι:

- Η δοκιμή CBR εκτιμά την διατμητική αντοχή ενός εδάφους
- Η δοκιμή γίνεται σε ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας – πυκνότητας
- Από την εκτέλεση της δοκιμής προκύπτει ο λόγος της φέρουσας ικανότητας
- Ο λόγος είναι χαρακτηριστικός για τις συνθήκες που επικρατούν κατά την δόκιμη.

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της δόκιμη του Καλιφορνιακού λογού φέρουσας ικανότητας (CBR - California Bearing Ratio Test), καθώς και η περιγραφή του εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για την υλοποίηση του (Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013).

3.4.3.1. Υπολογισμός αριθμού CBR

Ως CBR ορίζεται ο λόγος, επί τοις εκατό, της δύναμης (ή τάσης) η οποία απαιτείται για να διεισδύσει το έμβολο της συσκευής εντός του εδαφικού υλικού κατά ένα συγκεκριμένο βάθος, προς την δύναμη (ή τάση) που απαιτείται για το αντίστοιχο βάθος διείσδυσης εντός προτύπου υλικού.

Ο λόγος CBR ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$CBR = \frac{\text{ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗΣ}}{\text{ΠΡΟΤΥΠΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗ}} * 100 \quad (3.5)$$

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή CBR πραγματοποιείται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Όπως προαναφέρθηκε το βάθος αναφοράς είναι 2.54 mm και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα της σπασμένης πέτρας) είναι 6.9 MPa (70.3 Kg/cm²) η σχέση υπολογισμού του λόγου τυπώνεται ως εξής:

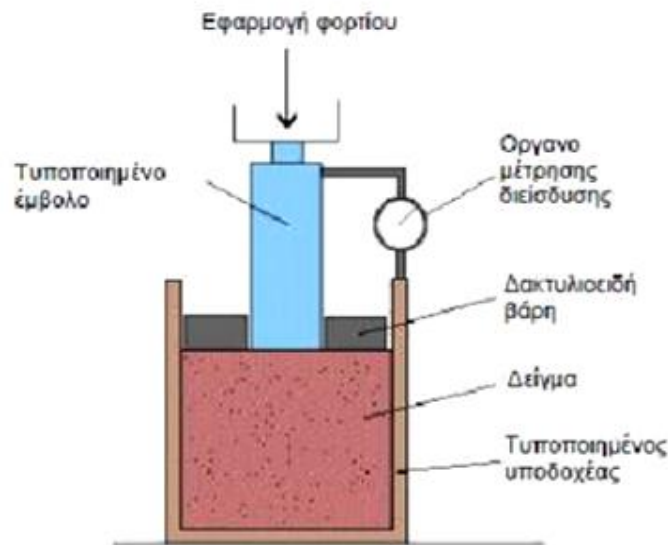
$$CBR_{2.54} = \frac{(\text{ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗΣ}) \text{MPa}}{(\text{ΠΡΟΤΥΠΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗ}_{2.54=6.9}) \text{MPa}} * 100 \quad (3.6)$$

$$CBR_{2.54} = \frac{(\text{ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗΣ}) \text{Kg/cm}^2}{(\text{ΠΡΟΤΥΠΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗ}_{2.54=70.3}) \text{Kg/cm}^2} * 100 \quad (3.7.)$$

Επιπλέον στην περίπτωση που είναι 5.08 mm και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα της σπασμένης πέτρας) είναι 10.35 MPa (105.5 Kg/cm²) τότε η σχέση υπολογισμού του λόγου τυπώνεται ως εξής:

$$CBR_{5.08} = \frac{(\text{ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗΣ})\text{MPa}}{(\text{ΠΡΟΤΥΠΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗ}_{5.08}=10.35)\text{MPa}} * 100 \quad (3.8)$$

$$CBR_{5.08} = \frac{(\text{ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗΣ})\text{Kg/cm}^2}{(\text{ΠΡΟΤΥΠΗ ΤΙΜΗ ΤΑΣΗ}_{5.08}=105.5)\text{Kg/cm}^2} * 100 \quad (3.9)$$



Εικόνα 7: Συσκευή προσδιορισμού CBR
[Πηγή: <http://e-archimedes.gr>]

3.4.3.2. Δόκιμη προσδιορισμού CBR

Η δοκιμασία προσδιορίσμου του CBR διεξάγεται συνηθέστερα στο εργαστήριο, σε διαταραγμένα (αναζυμωθέντα) δοκίμια, που έχουν συμπυκνωθεί έτσι ώστε να έχουν τις συνθήκες υγρασίας και το ξηρό ειδικό βάρος (βαθμό συμπύκνωσης %) που εκτιμάται ότι θα έχει το εξεταζόμενο υλικό στο έργο. Όταν υπάρχει το ενδεχόμενο να βρεθεί το υλικό (εδαφικό ή αδρανές) κατά την λειτουργία του έργου υπό συνθήκες αυξημένης υγρασίας, τότε η δοκιμασία διεξάγεται επί δοκιμίων που έχουν κορεσθεί, ύστερα από κατάλληλο υδρεμποτισμό 4 ημερών.

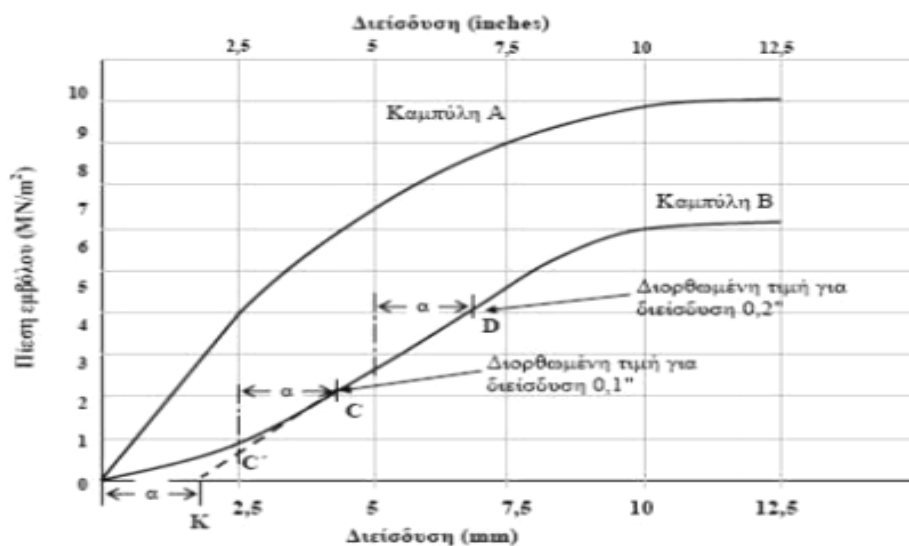
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για ακριβέστερα αποτελέσματα θα ήταν επιθυμητό να ελεγχθούν οι εργαστηριακές τιμές CBR με αυτές που προσδιορίζονται επί τόπου, κατά την κατασκευή. Τότε διεξάγεται εργοταξιακή δοκιμασία με ειδικό εξοπλισμό, δια του οποίου πιέζεται το τυποποιημένο έμβολο επί της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού. Η δοκιμή πάντοτε συνοδεύεται από τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας και του ξηρού ειδικού βάρους του υλικού.

Τα αποτελέσματα των εργοταξιακών δοκιμών δεν συσχετίζονται πάντοτε ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα εργαστηριακά. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στα χονδρόκοκκα

υλικά, των οποίων η τοποθέτηση και συμπύκνωση στις εργαστηριακές μήτρες επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Αντίθετα στα αργιλώδη εδάφη παρουσιάζονται συνήθως μικρές αποκλίσεις μεταξύ εργαστηριακών και εργοταξιακών τιμών CBR.

Η διεξαγωγή εργοταξιακής δοκιμασίας συνιστάται όταν η εξεταζόμενη στρώση δεν αναμοχλεύεται ή συμπυκνώνεται κατά την κατασκευή, οπότε ενδιαφέρει η γνώση της τιμής CBR του αδιατάρακτου υλικού. Βέβαια, μπορούν να διεξαχθούν και εργαστηριακές δοκιμασίες σε αδιατάρακτα δοκίμια, που λαμβάνονται με προσοχή και ειδική δοκιμασία από ερευνητικά ορύγματα.

Η εργαστηριακή δοκιμασία εκτελείται με την τυποποιημένη συσκευή και ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία με σχετικές προδιαγραφές. Ωστόσο, υπάρχουν μικρές παραλλαγές μεταξύ των προδιαγραφών που ισχύουν σε διάφορα κράτη, στην περίπτωση της Ελλάδας εφαρμόζεται η προδιαγραφή AASHTO T193-63.



Διάγραμμα 5: Καμπύλες πίεσης-διείσδυσης δοκιμής CBR
[Πηγή: <http://e-archimedes.gr>]

3.4.3.3. Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής CBR θα πρέπει το εργαστήριο να είναι εξοπλισμένο με τα εξής:

- Μήτρες (καλούπια)
- Παρέμβλημα
- Κόπανο
- Συσκευή μέτρησης διόγκωσης
- Μηκυσιόμετρα
- Βάρη επιφόρτισης
- Έμβολο διείσδυσης

- Συσκευή φόρτισης
- Δοχείο υδρεμποτισμού
- Κλίβανος ξήρανσης
- Δοχεία αναμίξεις, σπάτουλες, διηθητικό χαρτί, ζυγαριές κ.α.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι λεπτομέρειες και η απεικόνιση του εργαστηριακού εξοπλισμού με σκοπό την πλήρη κατανόηση του τρόπου διεξαγωγής της δοκιμής.

❖ *Μήτρες (καλούπια)*

Οι μήτρες θα πρέπει να είναι μεταλλικές και κυλινδρικού σχήματος. Η εσωτερική τους διάμετρος είναι $152,4 \pm 0,66 \text{ mm}$ και το ύψος τους είναι $177,8 \pm 0,41 \text{ mm}$.

Σημειώνεται για την σωστή διεκπεραίωση της δοκιμής θα πρέπει να υπάρχουν τρεις διαθέσιμες μήτρες



Εικόνα 8: Μήτρα – καλούπι
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Παρέβλημα*

Το παρέβλημα είναι κυλινδρικός μεταλλικός δίσκος διαμέτρου $150,8 \pm 0,8 \text{ mm}$ και το ύψος τους είναι $61,37 \pm 0,13 \text{ mm}$. Το ανώτερο ύψος συμβάλει έτσι ώστε να ληφθεί το πάχος δείγματος.



Εικόνα 9: Παρέβλημα
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Κόπανος*

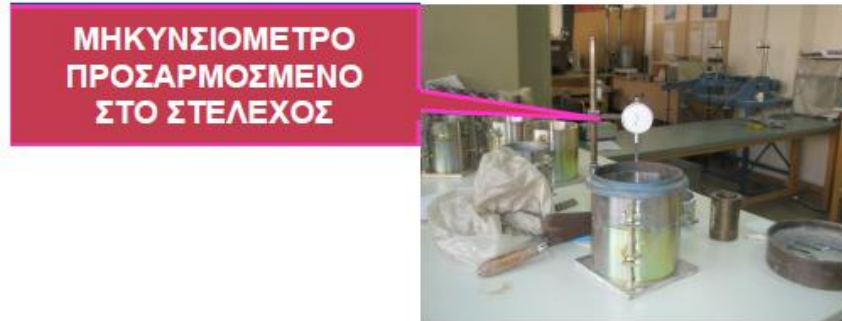
Ο κόπανος έχει βάρος 2,49kg. Η επιφάνεια κρούσης του είναι κυλινδρική και έχει διάμετρο 50,8 mm. Επιπλέον, φέρει διάταξη για τον έλεγχο του ύψους πτώσης. Ωστόσο, η ελεύθερη πτώση είναι 304,8mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου



Εικόνα 10: Κόπανος
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Συσκευή μέτρησης διόγκωσης*

Αποτελείται από ένα δακτύλιο ενωμένο με στέλεχος και από το προσαρμοσμένο μηκυνσιόμετρο. Η εικόνα 11 απεικονίζει την συσκευή μέτρησης διόγκωσης.



Εικόνα 11: Συσκευή μέτρησης διόγκωσης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]



Εικόνα 12: Συσκευή μέτρησης διόγκωσης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Μηκυνσιόμετρα*

Για την μέτρηση της διόγκωσης των εδαφών χρησιμοποιείται ένα μηκυνσιόμετρο, το οποίο έχει την δυνατότητα μέτρησης μέχρι και 25,5mm και με προσέγγιση 0,02mm. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι 100 υποδιαιρέσεις αντιστοιχούν σε 2,55mm.



Εικόνα 13: Μηκυνσιόμετρα
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ Βάρη επιφόρτισης

Τα βάρη επιφόρτισης αποτελούνται από δύο μέρη τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- 1^ο Μέρος: ένας δακτυλιοειδές μεταλλικό φορτίο με κυκλική οπή στο μέσο, διαμέτρου 54mm.



Εικόνα 14: Βάρη επιφόρτισης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]



Εικόνα 15: Βάρη επιφόρτισης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

- 2^ο Μέρος: μερικά μεταλλικά φορτία με εγκοπή ή διαιρούμενα όλα διαμέτρου 149,2 mm και βάρος $2,27 \pm 0,004 \text{ kg}$

❖ Έμβολο διείσδυσης

Το έμβολο διείσδυσης είναι μεταλλικό, έχει κυκλική διατομή διαμέτρου $49,63 \pm 0,13 \text{ mm}$. Το εμβαδό του είναι 1935 mm^2 και το μήκος του $\geq 102 \text{ mm}$



Εικόνα 16: Έμβολο διείσδυσης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Συσκευή φόρτισης*

Η συσκευή φόρτισης στην ουσία είναι μια συσκευή θλίψης, η οποία έχει την ικανότητα να επιβάλλει φόρτιση ομοιόμορφα αυξανόμενου φορτίου μέχρι $44,5 \text{ kN} \cong 4450\text{kg}$. Η ταχύτητα φόρτισης είναι $1,3\text{mm/min}$. Η λειτουργία της συσκευής έχει στόχο τον εξαναγκασμό του Έμβολου να διεισδύσει στο δοκίμιο.



Εικόνα 17: Συσκευή φόρτισης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Δοχείο υδρεμποτισμού*

Το δοχείο υδρεμποτισμού έχει στο εσωτερικό του νερό, όπου σε αυτό τοποθετούνται τα δείγματα. Επιπλέον, δοχείο υδρεμποτισμού πρέπει να είναι κατάλληλο ώστε να διατηρείται η στάθμη του νερού στα $25,4\text{mm}$ πάνω από τα δοκίμια.



Εικόνα 18: Δοχείο υδρεμποτισμού
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

❖ *Κλίβανο ξήρανσης*

Ο κλίβανος ξήρανσης πρέπει να έχει την δυνατότητα να διατηρεί την θερμοκρασία στους $110 \pm 5^\circ \text{C}$. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι για την ξήρανση των δειγμάτων που θα πρέπει να πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας.



Εικόνα 19: Κλίβανος ξήρανσης
[Πηγή: Βγενοπούλου Ε. κ.α., 2013]

3.4.3.4. Περιγραφή εργασίας

Τα δείγματα ετοιμάζονται συμφωνά με το πρότυπο της Μεθόδου PROCTOR, με τη διαφορά ότι θα ζυγίζει 35 kg ή περισσότερο. Το υλικό θα πρέπει να έχει περάσει από κόσκινο 19 mm θα αντικαθίσταται με υλικό που διέρχεται από το κόσκινο ανοίγματος 19 mm και συγκρατείται στο κόσκινο Νο 4 (4.75 mm). Στην συνέχεια εκλέγεται αντιπροσωπευτική ποσότητα βάρους περίπου 11 kg για ένα έλεγχο υγρασίας - πυκνότητας και διαχωρίζεται το υπόλοιπο του δείγματος, ώστε να ληφθούν τρεις αντιπροσωπευτικές ποσότητες βάρους περίπου 6,8 kg η κάθε μία.

Θα πρέπει η σχέση υγρασίας πυκνότητας, όπου η ποσότητα των 11 kg, να χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας και της μέγιστης ξηρής πυκνότητας, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο Proctor.

3.4.3.5. Διαδικασία δοκιμής

Η διαδικασία δοκιμής των δειγμάτων πραγματοποιεί με τα ακόλουθα βήματα:

- Συμπυκνώνονται τρία δείγματα έτσι ώστε οι πυκνότητες που θα προκύψουν να κυμαίνονται από 95% (ή λιγότερο) μέχρι 100% (ή περισσότερο) της μέγιστης ξηρής πυκνότητας.
- Συνδέεται η μήτρα στο δίσκο της βάσης, στερεώνεται ο δακτύλιος προέκτασης και ζυγίζεται με προσέγγιση 5 g. Εισάγεται το παρέμβλημα στη μήτρα και τοποθετείται τραχύ διηθητικό χαρτί στην επάνω επιφάνεια του δίσκου.
- Αναμιγνύεται κάθε μία από της ποσότητες των 6,8 kg, που έχουν παρασκευασθεί με αρκετό νερό, ώστε να ληφθεί η βέλτιστη υγρασία.
- Συμπυκνώνεται ποσότητα του μίγματος του εδάφους - νερού μέσα στη μήτρα σε τρεις ίσες στρώσεις και λαμβάνεται συμπυκνωμένο δοκίμιο εδάφους πάχους περίπου 127 mm.
- Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με τον ελάχιστο αριθμό κτύπων, που έχει εκλεγεί, ώστε να ληφθεί από την συμπύκνωση πυκνότητα 95% ή λιγότερη της μέγιστης πυκνότητας.
- Προσδιορίζεται η περιεχόμενη υγρασία του υλικού στην αρχή και στο τέλος της συμπύκνωσης αυτής. Κάθε δείγμα για τον καθορισμό της υγρασίας πρέπει να ζυγίζει τουλάχιστον 100 g για τα λεπτόκοκκα εδάφη και 500 g για τα χονδρόκοκκα.
- Εξάγεται ο δακτύλιος προέκτασης και με ράβδο επιπεδώνεται το έδαφος που συμπυκνώθηκε στο ύψος των χειλέων της μήτρας.
- Επιφανειακές ανωμαλίες γεμίζουν με λεπτόκοκκο υλικό. Απομακρύνεται το παρέμβλημα, τοποθετείται τραχύ διηθητικό χαρτί στο διάτρητο δίσκο της βάσης, αντιστρέφεται η μήτρα και το συμπυκνωμένο δοκίμιο εδάφους τοποθετείται πάνω σε διηθητικό χαρτί.
- Στερεώνεται η διάτρητη πλάκα της βάσης στη μήτρα και προσαρμόζεται ο δακτύλιος προέκτασης. Ζυγίζεται η μήτρα και το δοκίμιο με προσέγγιση 5g.

- Οι δύο άλλες ποσότητες των 6,8 kg συμπυκνώνονται με μόνη διαφορά ότι ένας ενδιάμεσος αριθμός κτύπων κατά στρώση χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση του δεύτερου δοκιμίου και ο μέγιστος αριθμός κτύπων κατά στρώση χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση του τρίτου δοκιμίου.

❖ Υδρεμοτισμός

Στην συνέχεια ακολουθούν τα βήματα του υδρεμοτισμού των δειγμάτων, όπου είναι:

- Τοποθετείται πάνω στο εδαφικό δείγμα, μέσα στη μήτρα, πλάκα με στέλεχος ρύθμισης της διόγκωσης και τοποθετούνται επαρκή δακτυλιοειδή βάρη για την πραγματοποίηση φόρτισης, ίσης προς την πραγματοποιούμενη από το βάρος των στρώσεων υπόβασης, βάσης και στρώσης κυκλοφορίας, πάνω από το προς δοκιμή υλικό, με απόκλιση $\pm 2,26$ kg απ' αυτό. Σε καμιά περίπτωση τα φορτία αυτά δεν θα είναι στο σύνολο τους μικρότερα από 4,54 kg. Τοποθετείται ο τρίποδας με το μηκυσιόμετρο στην κορυφή της μήτρας και λαμβάνεται μια αρχική ανάγνωση.
- Εμβαπτίζεται η μήτρα στο νερό, ώστε το επάνω και το κάτω μέρος του δοκιμίου να βρίσκεται σε ελεύθερη επαφή με το νερό. Κατά την διάρκεια του υδρεμοτισμού διατηρείται η στάθμη του νερού στη μήτρα και στο δοχείο υδρεμοτισμού περίπου 25,4 mm επάνω από την κορυφή του δοκιμίου. Ο υδρεμοτισμός του δοκιμίου διαρκεί 96 ώρες (4 μέρες).
- Μετά από 96 ώρες εκτελείται μια τελευταία ανάγνωση στα δοκίμια που βρίσκονται μέσα στο νερό και υπολογίζεται η διόγκωση, ως ποσοστό του αρχικού μήκους του δείγματος. Το ποσοστό διόγκωσης ισούται με τη μεταβολή του μήκους σε mm κατά τη διάρκεια υδρεμοτισμού x 100 ανά 116,4 mm.
- Εξάγονται τα δοκίμια από το δοχείο υδρεμοτισμού, απομακρύνεται το νερό από την άνω βάση των δοκιμίων και αφήνονται επί 15 min να στραγγίσουν με τη βαρύτητα. Πρέπει να καταβάλλεται προσοχή ώστε να αποφεύγεται η διατάραξη της επιφανείας των δοκιμίων κατά την απομάκρυνση τους από το νερό. Τα βάρη επιφορτίσεως και οι διατηρητές πλάκες αφαιρούνται μετά την αποστράγγιση.

❖ Δοκιμή διείσδυσης

Η δοκιμή διείσδυσης πραγματοποιείται με τα ακόλουθα βήματα:

- Προκαλείται επιφόρτιση στα δοκίμια με όσα δακτυλιοειδή φορτία χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υδρεμοτισμό.
- Μόλις γίνεται η τοποθέτηση ενός φορτίου επάνω στο δοκίμιο και για να αποφευχθεί διαρροή μαλακού υλικού κατά την φόρτιση, αφήνεται να επικαθήσει επάνω στο δοκίμιο το έμβολο διεισδύσεως
- Μετά την επικαθήση του εμβόλου διεισδύσεως, τοποθετούνται τα υπόλοιπα βάρη φορτίσεως γύρω από το έμβολο.
- Το έμβολο διεισδύσεως με φορτίο 44,5 N (4,54 kg), αφήνεται να επικαθήσει επάνω στο δοκίμιο, και στη συνέχεια μηδενίζονται οι ενδείξεις των οργάνων μετρήσεως της διεισδύσεως και του φορτίου.
- Τα φορτία εξασκούνται πάνω στο έμβολο διεισδύσεως έτσι ώστε η διείσδυση να είναι ομοιόμορφη και με ταχύτητα περίπου 1,3 mm/min.

❖ Υπολογισμοί - τήρηση στοιχείων

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Για κάθε δοκίμιο σχεδιάζεται η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αρχική διείσδυση λαμβάνει χώρα χωρίς αναλογική αύξηση της αντιδράσεως σε διείσδυση και η καμπύλη πιθανόν να είναι κοίλη προς τα άνω. Για να προκύψει η πραγματική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων, γίνεται διόρθωση της καμπύλης αυτής, ειδικά στο τμήμα της κοντά στην αρχή των συντεταγμένων, αναπροσαρμόζοντας τη θέση της αρχής. Η νέα θέση της αρχής των συντεταγμένων καθορίζεται με προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων μέχρις ότου αυτό τμήσει τον άξονα των τεταγμένων.
- Οι διορθωμένες τιμές πίεσεως θα καθορισθούν για κάθε δοκίμιο από τις διεισδύσεις 2,54 mm και 5,08 mm. Οι λόγοι CBR λαμβάνονται σε ποσοστό %, με διαίρεση των διορθωμένων τιμών πίεσεων που αντιστοιχούν στις διεισδύσεις των 2,54 mm και 5,08 mm δια των αντιστοίχων προτύπων πιέσεων 6,9 MPa (70.3 kg/cm²) και 10,35 MPa (105,5 kg/cm²). Ο λόγος αυτός πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 100. Το CBR ισούται με τη διορθωμένη τιμή πίεσεως x 100 προς τη πρότυπη πίεση.
- Ως τιμή του Καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας εκλέγεται αυτή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 2,54 mm. Εάν ο λόγος της φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί σε διείσδυση 5,08 mm είναι μεγαλύτερος η δοκιμή θα επαναληφθεί. Εάν η δοκιμή επαληθεύσεως δώσει όμοια αποτελέσματα, θα χρησιμοποιηθεί ο λόγος που αντιστοιχεί σε διείσδυση 5,08 mm.
- Με χρησιμοποίηση των στοιχείων που λαμβάνονται από τα τρία δοκίμια παριστάνεται γραφικά η σχέση CBR και πυκνότητας ξηρού συμπυκνωμένου εδάφους. Κατόπιν ορίζεται το CBR της μελέτης στο επιθυμητό ποσοστό της μέγιστης πυκνότητας. Συνήθως εκλέγεται το CBR που αντιστοιχεί στο ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό συμπυκνώσεως σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου.

❖ Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Το δελτίο θα περιλαμβάνει τα ακόλουθα για κάθε δοκίμιο:

- Ενέργεια συμπυκνώσεως (αριθμός κτύπων ανά στρώση).
- Ξηρή πυκνότητα συμπυκνωμένου δείγματος σε kg/m³.
- Περιεχόμενη υγρασία όταν συμπυκνώνεται στη μήτρα %.
- Διόγκωση %, αναφέρεται εν προκειμένω και το βάρος επιφορτίσεως για της τρεις περιπτώσεις των δοκιμίων, (10 - 30 - 65 κτύποι), με ακρίβεια ακέραιας μονάδας.
- Καλιφορνιακός Λόγος Φέρουσας Ικανότητας, εκφραζόμενος % με ένα δεκαδικό ψηφίο για τιμές του CBR < 10, ενώ για μεγαλύτερες τιμές σαν ακέραιος αριθμός.

3.4.4. Δοκιμές προσδιορισμού της τάσης και του ποσοστού διόγκωσης

Ο προσδιορισμός της τάσης και το ποσοστό διόγκωσης με την χρήση οιδήμετρου διαχωρίζεται σε 2 κατηγορίες και είναι οι κάτωθι:

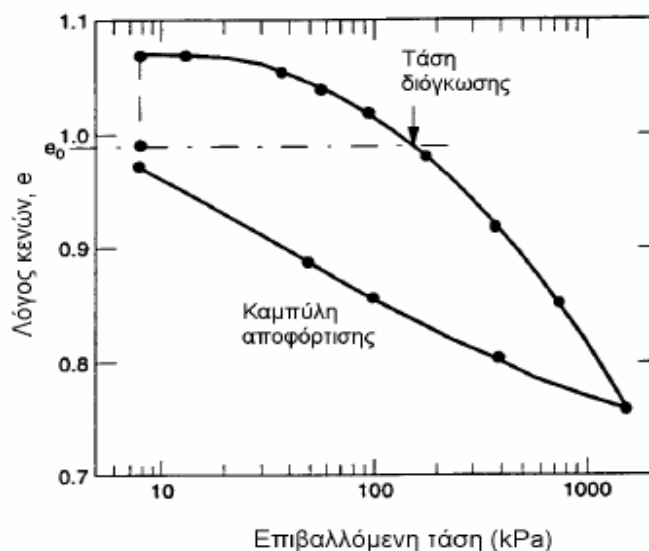
- Δοκιμή διόγκωσης υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση: πραγματοποιείται με την επιβολή σταθερής κατακόρυφης τάσης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής
- Δοκιμή σταθερού όγκου: πραγματοποιείται με επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση αυξάνει με σκοπό να παραμείνει σταθερός ο όγκος του δοκιμίου

Στην συνέχεια του Κεφαλαίου θα αναλυθεί κάθε κατηγορία με σκοπό να καταγραφεί κάθε μέθοδος, καθώς επίσης και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δοκιμών

3.4.4.1. Δοκιμές διόγκωσης υπο σταθερή κατακόρυφη φόρτιση

3.4.4.1.1. Δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης στο οιδήμετρο

Κατά τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης στο οιδήμετρο, το δοκίμιο κατακλύζεται με νερό και αφήνεται να διογκωθεί ελεύθερα υπό συμβολική επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση, η οποία κυμαίνεται από 1 έως 7 kPa. Στη συνέχεια το δοκίμιο σταδιακά συμπιέζεται στον αρχικό του όγκο όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6.



Διάγραμμα 6: Μεταβολή λόγου κενών συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης κατά τη δοκιμή «Ελεύθερης διόγκωσης» (Fredlund G., 1995)

Η τάση διόγκωσης ορίζεται ως η τάση που απαιτείται για να επανέλθει το δοκίμιο στον αρχικό λόγο κενών, στην κατάσταση δηλαδή πριν την επαφή του με το νερό. Πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για να κάνουν τις απαραίτητες δοκιμές για την ελεύθερη διόγκωση. Τονίζεται ότι στο A.S.T.M. D 4546 περιγράφεται μια τροποποιημένη δοκιμή η οποία παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με δύο μεθόδους και είναι οι κάτωθι:

- **Μέθοδος Α:** Η δοκιμή αυτή περιλαμβάνει την αρχική φόρτιση του δοκιμίου με τάση ίση με την τάση των υπερκείμενων γαιών. Στη συνέχεια το δοκίμιο αποφορτίζεται και κατακλύζεται με νερό υπό συμβολική κατακόρυφη τάση.
- **Μέθοδος Β:** Στη δοκιμή αυτή το δοκίμιο αρχικά φορτίζεται με τάση ίση με την τάση των υπερκείμενων γαιών ή ίσο με το επιβαλλόμενο από την κατασκευή φορτίο ή με το άθροισμα αυτών και κατακλύζεται με νερό, υπό την τάση αυτή. Η τροποποίηση συνίσταται στο γεγονός ότι με την τοποθέτηση αρχικού φορτίου ίσου με την τάση των υπερκείμενων γαιών, αναπαρίστανται καλύτερα η επιτόπου εντατική και φυσική κατάσταση του δοκιμίου.

Ωστόσο η δοκιμή της ελεύθερης διόγκωσης έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αρχικά ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστεί εύκολα στην συσκευή μονοδιάστατης στερεοποίησης. Επιπλέον, η κριτική που δέχεται η δοκιμή της ελεύθερης διόγκωσης είναι ότι δεν μπορεί να αντικατοπτριστεί η αλληλουχία των φορτίσεων που δέχεται το έδαφος επί τόπου. Δηλαδή το έδαφος δε θα απορροφήσει πρώτα νερό, θα διογκωθεί και στη συνέχεια θα εφαρμοσθεί το φορτίο της κατασκευής, αλλά αντίστροφα. (Brackley A., 1975 ; Justo et al., 1984 ; El Sayed T.& Rabbaa A., 1986).

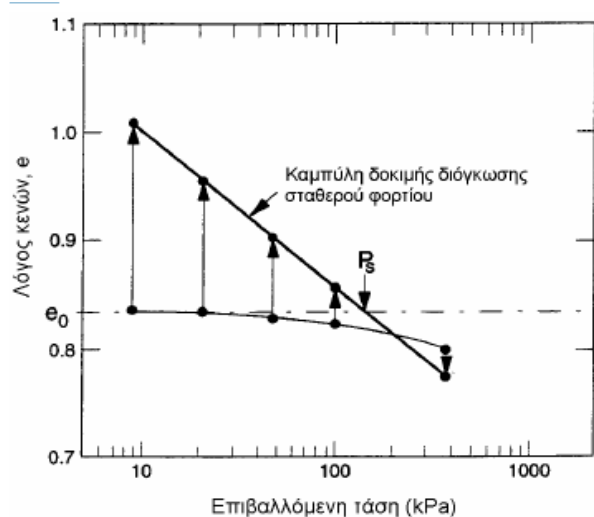
Όμως δεν θα πρέπει να παραβληθεί το γεγονός ότι σε αυτή την κατηγορία των δοκιμών περιλαμβάνονται δύο αντίστροφες διαδικασίες, η οποίες είναι της διόγκωσης και της συμπίεσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι δοκιμές να περιλαμβάνουν υστερήσεις τόσο στη διαδικασία ισορρόπησης των καταστάσεων αυτών όσο και στον καθορισμό της τάσης διόγκωσης.

3.4.4.1.2. Δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου

Στη δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου, αριθμός όμοιων δοκιμίων αφήνονται να διογκωθούν υπό διαφορετική επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση. Τα αποτελέσματα, ο τελικός όγκος και η επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση (Διάγραμμα 7). Η τάση που αντιστοιχεί σε μηδενική μεταβολή όγκου ορίζεται ως τάση διόγκωσης (Gizienski et al., 1965, Nobel A., 1966).

Οι δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί είναι πληθώρες με σκοπό να καταλήξουν οι επιστήμονες σε κάποιο έγκυρο αποτέλεσμα. Έτσι τα αποτελέσματα των πειρατικών μελετών έδειξαν πως υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του ποσοστού διόγκωσης και του λογαρίθμου του φορτίου για δεδομένες αρχικές συνθήκες, περιεχόμενη υγρασία και λόγο κενών.

Οι μελετητές βασιζόμενοι στα προαναφερόμενα δεδομένα πρότειναν να προεκταθεί η καμπύλη διόγκωσης και να υπολογισθεί η τάση διόγκωσης και για διαφορετικές αρχικές συνθήκες.



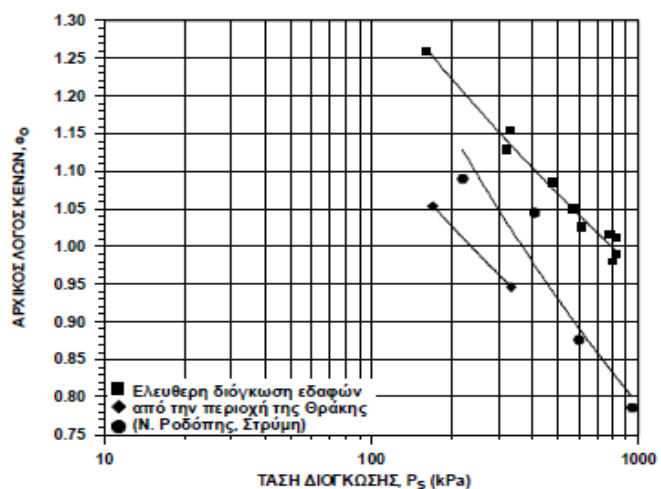
Διάγραμμα 7: Μεταβολή τελικού λόγου κενών συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης [Πηγή: Shuai H, 1996].

Η δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου δίνει ένα βασικό πλεονέκτημα, το οποίο είναι η σύγκριση της προσομοίωσης των φορτίσεων όπως αυτές λαμβάνουν χώρα στο έδαφος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σημειώνεται ότι καμία άλλη μέθοδος δεν δίνει τέτοια δυνατότητα.

Αρχικά στην διόγκωση σταθερού φορτίου ασκείται φορτίο με το οποίο συμπιέζεται το έδαφος και στην συνέχεια έρχεται σε επαφή με το νερό με αποτέλεσμα να διογκωθεί. Η δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου εφαρμόζεται συχνά λόγω της σωστής προσομοίωσης της επί τόπου διαδρομής τάσεων (Brackley A., 1975 ; El Sayed T.& Rabbaa A., 1986).

Ωστόσο η δοκιμή διόγκωσης υπό σταθερό φορτίο δεν λαμβάνει υπόψη της τη διατάραξη του δοκιμίου. Επίσης, υπόκειται στον περιορισμό ότι απαιτεί όμοια δοκίμια, τρία ή και περισσότερα, τα οποία αρκετές φορές είναι δύσκολο να υπάρξουν.

Σε διογκούμενα εδάφη της Ελλάδας και συγκεκριμένα της Θράκης, οι πειραματικές μελέτες έδειξαν την μεταβολή της τάσης διόγκωσης, P_s , συναρτήσει του αρχικού λόγου κενών, e_0 , όπως δίνεται στο Διάγραμμα 8.



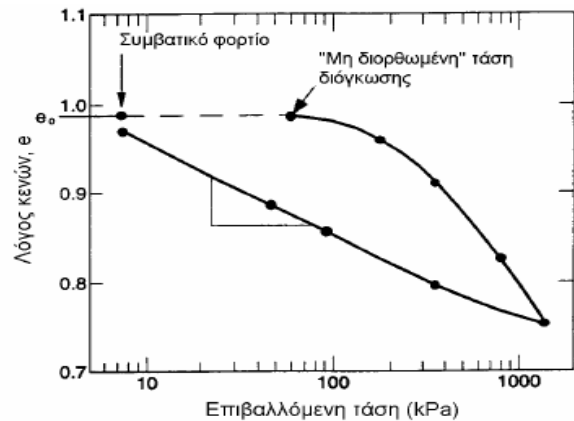
Διάγραμμα 8: Τάση διόγκωσης, P_s , συναρτήσει του αρχικού λόγου κενών, e_0 .

[Πηγή: Παπακυριακόπουλος Π. & Κουδουμάκης Π., 2001)

Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα παρατηρείται ότι σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα η τάση διόγκωσης αυξάνει γραμμικά με τη μείωση του αρχικού λόγου κενών, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα δοκιμών σε συμπυκνωμένα δοκίμια αργίλου (Παπακυριακόπουλος Π. & Κουδουμάκης Π., 2001 ; Xeidakis et al., 2004).

3.4.4.2. Δοκιμή σταθερού όγκου

Κατά τη δοκιμή σταθερού όγκου αρχικά ασκείται στο δοκίμιο μικρή συμβολική κατακόρυφη τάση και κατακλύζεται με νερό. Ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται σταθερός σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής, αυξάνοντας το επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο. Η σταδιακή αύξηση του φορτίου συνεχίζεται μέχρις ότου σταματήσει η τάση του δοκιμίου για διόγκωση. Η επιβαλλόμενη στο σημείο αυτό κατακόρυφη τάση αναφέρεται ως τάση διόγκωσης P_s . Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται με τη μορφή του Διαγράμματος 9.



Διάγραμμα 9: Μεταβολή λόγου κενών συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης κατά τη δοκιμή «Σταθερού όγκου»
[Πηγή: Fredlund G., 1995]

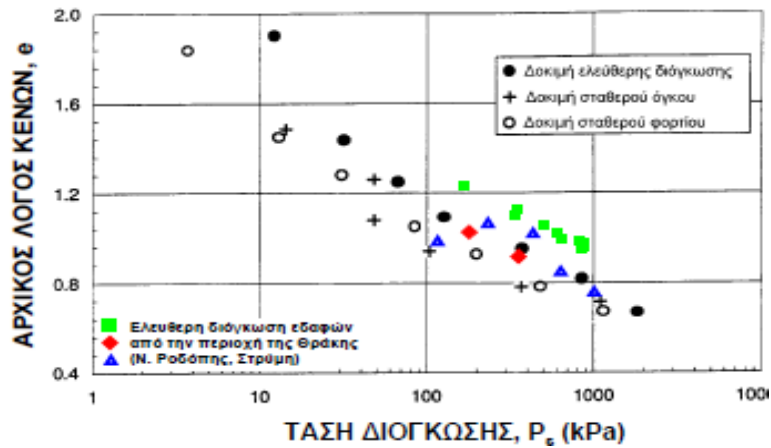
Η δοκιμή διόγκωσης σταθερού όγκου παρουσιάζει το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι δεν εμπεριέχει αντίστροφες διαδικασίες, διόγκωση και συμπίεση και άρα υστέρηση στην εμφάνιση της τάσης διόγκωσης. Ωστόσο η υπολογισθείσα τιμή τάσης διόγκωσης εξαρτάται από την ακαμψία της συσκευής που επιβάλλει τη διατήρηση του σταθερού όγκου.

Θα πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι οι συσκευές με μεγάλη ακαμψία αδυνατούν να μετρήσουν μικρές τιμές τάσης διόγκωσης ενώ συσκευές με μικρή ακαμψία είναι δυνατόν να παραμορφωθούν επιτρέποντας στο δοκίμιο μετατοπίσεις σε αντίθεση με τη βασική αρχή της δοκιμής που είναι η διατήρηση σταθερού όγκου (Παπακυριακόπουλος Π. & Κουδουμάκης Π., 2001 ; Xeidakis et al., 2004)

3.5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

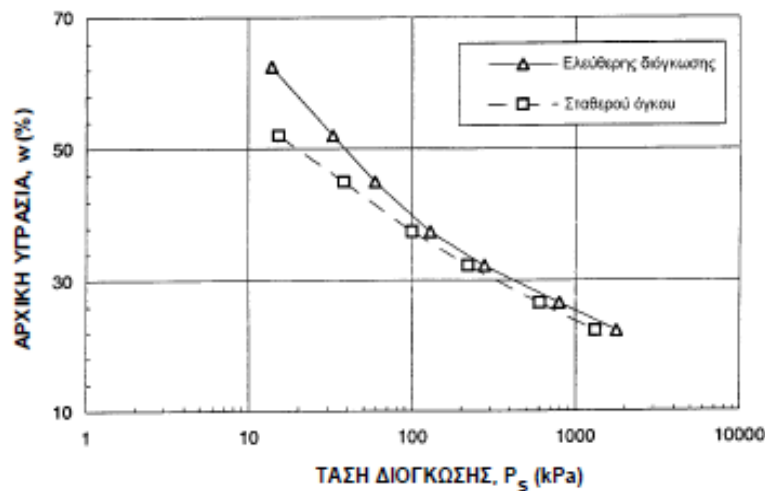
Η τάση και το ποσοστό διόγκωσης εξαρτώνται άμεσα από τη δοκιμή με την οποία προσδιορίζονται. Προσεκτικές έρευνες των αποτελεσμάτων της δοκιμής μονοδιάστατης διόγκωσης συμπυκνωμένης αργίλου της περιοχής Regina του Καναδά, από τον Gilchrist (1963), έδειξαν πως (Brackley A., 1975, Ali and Elturabi T., 1984, Sridharan et al., 1986):

- Η τάση διόγκωσης, που υπολογίζεται από τη δοκιμή σταθερού όγκου ή τη δοκιμή σταθερού φορτίου, είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης.
- Η διαφορά μεταξύ των τιμών της τάσης διόγκωσης που υπολογίζεται αυξάνει με την αύξηση του αρχικού λόγου κενών Διάγραμμα 10.



Διάγραμμα 10: Σχέση μεταξύ αρχικού λόγου κενών και τάσης διόγκωσης όπως υπολογίζεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους για τη συμπυκνωμένη άργιλο της Regina (Gilchrist, 1963) και για τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης για την άργιλο της Στρώμης (N. Ροδόπης) [Πηγή: Κουδουμάκης Π., 2002]

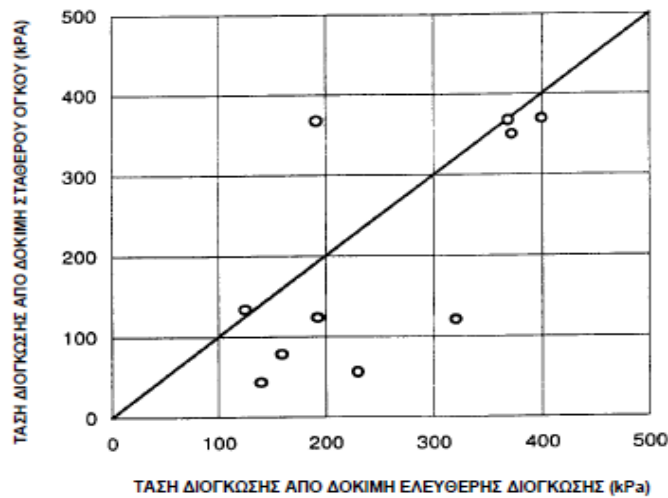
Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν μετά από έρευνες οι Noble A. (1966) και Lu Y. (1969), για την ίδια άργιλο της Regina και κατέληξαν στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 11.



Διάγραμμα 11: Τάση διόγκωσης συναρτήσει της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας για την άργιλο της Regina. [Πηγή: Noble A., 1966]

Ερευνητές θέλοντας να αναπτύξουν μια μεθοδολογία σύγκρισης των αποτελεσμάτων της τάσης διόγκωσης όπως αυτή προκύπτει από τις διάφορες δοκιμές, εκτέλεσαν εκτενές εργαστηριακό πρόγραμμα. Το εργαστηριακό πρόγραμμα περιελάμβανε τη μελέτη διαταραγμένων και αδιατάρακτων δοκιμίων. Όμοια δοκίμια υποβλήθηκαν σε δύο διαφορετικές εργαστηριακές δοκιμές. Ειδικότερα, έλαβαν χώρα δοκιμές ελεύθερης διόγκωσης και σταθερού όγκου στο οιδήμετρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η τιμή της

υπολογισθείσας τάσης διόγκωσης από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης είναι μεγαλύτερη από την τάση διόγκωσης, που υπολογίζεται από τη δοκιμή σταθερού όγκου, Διάγραμμα 12.



Διάγραμμα 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων τάσης διόγκωσης σταθερού όγκου και ελεύθερης διόγκωσης στο ίδιο έδαφος.
[Πηγή: Ali M. & Elturabi D.,1984]

Πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους El Sayed and Rabbaa (1986) απέδειξαν ότι η τιμή της τάσης διόγκωσης εξαρτάται άμεσα από τις εργαστηριακές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό της. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών καταγράφονται στον Πίνακα 17. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι έχει προταθεί η χρήση της δοκιμής διόγκωσης σταθερού φορτίου για τον υπολογισμό της επιτόπου τάσης διόγκωσης από εργαστηριακά αποτελέσματα.

Δοκιμή	Τασή διόγκωσης (kPascal)
Ελεύθερης διόγκωσης	2200
Σταθερού όγκου	1900
Σταθερού φορτίου	1800

Πίνακας 17: Τάση διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές δοκιμές σε όμοια εδαφικά δείγματα
[Πηγή: Ali M. & Elturabi D.,1984]

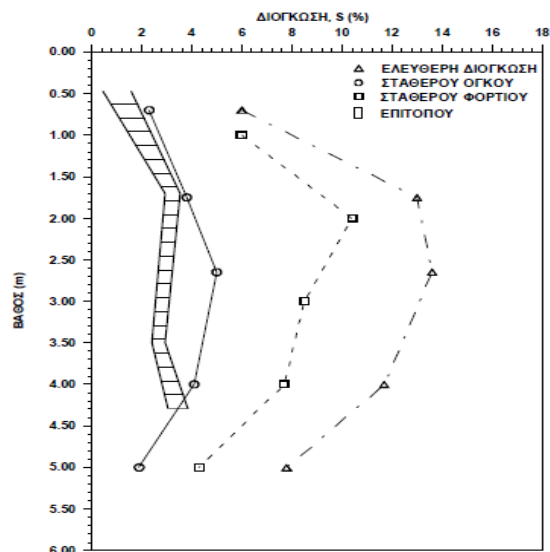
Ωστόσο, οι Sidharan et al. (1986), έδειξαν πως η δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης σε σύγκριση με τη δοκιμή σταθερού φορτίου και τη δοκιμή σταθερού όγκου, δίνει την υψηλότερη τιμή τάσης διόγκωσης, οι τιμές καταγράφονται στον Πίνακας 18.

α/α	Αρχικές συνθήκες		Τάση διόγκωσης (kPascal)		
	E	w (%)	Ελεύθερη διόγκωση	Σταθερού φορτίου	Σταθερού όγκου
1	0.893	0.0	30	160	190
2	1.002	0.0	390	160	220
3	0.742	0.0	510	140	310
4	0.572	0.0	1300	340	380
5	0.656	20.8	150	...	70

Πίνακας 18: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους
[Πηγή: Sridharan et al., 1986]

Ακολούθησαν και άλλες εργαστηριακές μελέτες από τους Erol et al. (1987), με σκοπό τον καθορισμό της επίδρασης της μεθόδου στον υπολογισμό της τάσης διόγκωσης. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αποστέλλονταν από τρεις πρότυπες δοκιμές διόγκωσης εκτελέστηκαν σε αδιατάρακτα δείγματα αργιλικού σχιστολίθου. Χωρίς καμία εξαίρεση, η δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης δίνει υψηλότερες τιμές τάσης διόγκωσης, συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους. Η διαφορά γίνεται μεγαλύτερη για μεγάλες τιμές της τάσης διόγκωσης.

Επίσης, εκτελέστηκαν επιτόπου μετρήσεις σε ειδικά προς τούτο κατασκευασμένους σταθμούς, όπου ο αργιλικός σχιστόλιθος με τεχνητούς τρόπους κατακλύζταν με νερό. Το σύστημα κορεσμού αποτελείται από κατακόρυφα αμμώδη στραγγιστήρια βάθους 4m. Οι μετακινήσεις της περιοχής καταγράφονταν από καθορισμένο σύστημα επί 54 εβδομάδες στη διάρκεια των οποίων συνεχώς τροφοδοτούνταν με νερό. Οι υπολογισθείσες εργαστηριακά μεταβολές όγκου συγκρίνονται με τις επιτόπου μετρήσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 13.

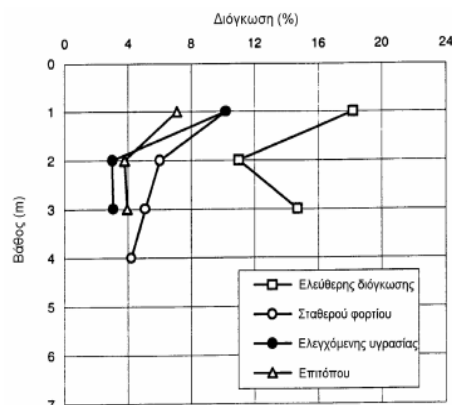


Διάγραμμα 13: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών διόγκωσης εργαστηριακών και επιτόπου μετρήσεων.
[Πηγή: Erol et al., 1987]

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σταθερού όγκου βρίσκονται σε συμφωνία με τις επιτόπου μετρήσεις. Η απόκλιση των εργαστηριακών μετρήσεων σε σχέση με τις επιτόπου μετρήσεις οφείλονται, στη διαφορετική προσομοίωση της πλευρικής κατάστασης στο εργαστήριο, σε σχέση με αυτή που επικρατεί στο πεδίο. Επιπλέον, οι επιτόπου μετρήσεις έδειξαν πως η τελική περιεχόμενη υγρασία που υπολογίστηκε στο πεδίο ήταν πολύ μικρότερη από αυτήν που υπολογίζεται μετά το τέλος της δοκιμής στο εργαστήριο.

Επιπλέον, έγινε υπερεκτίμηση του ποσοστού και της τάσης διόγκωσης σε δείγματα που προερχόταν από δύο περιοχές στο Σουδάν. Στην περίπτωση αυτή οι παρατηρήσεις περιελάμβαναν μετρήσεις μετακινήσεων σε συνάρτηση με το βάθος ύστερα από μακρά περίοδο υδρεμποτισμού.

Τα αποτελέσματα δοκιμών διόγκωσης στο οιδήμετρο περιελάμβαναν δοκιμές ελεύθερης διόγκωσης, και δοκιμές διόγκωσης σταθερού φορτίου. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα συγκρινόμενα με τις επιτόπου μετρήσεις βρέθηκε ότι υπερεκτιμούν το ποσοστό διόγκωσης, Διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 14: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών διόγκωσης και επιτόπου μετρήσεων.

[Πηγή: Osman A. & Sharief M., 1987]

Ωστόσο, εκτελέστηκαν δοκιμές διόγκωσης στο οιδήμετρο υπό ελεγχόμενες συνθήκες περιεχόμενης υγρασίας. Η περιεχόμενη υγρασία ελεγχόταν προσθέτοντας επιθυμητή ποσότητα νερού στο εδαφικό δείγμα χρησιμοποιώντας δύο φίλτρα χαρτιού τοποθετημένα στην κορυφή και στη βάση του δοκιμίου. Η τελική περιεχόμενη υγρασία του δοκιμίου ήταν παρόμοια με αυτήν που υπολογίστηκε επιτόπου μετά την προσθήκη νερού. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα βρέθηκαν σε συμφωνία με τις μετρήσεις στο πεδίο.

Ο Sorochan (1991) συγκρίνει τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών στις περιοχές Khvalynsk, Sarmatsk και Aral'sk δίνοντας την δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προσδιορισμού της διόγκωσης των εδαφών. Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται οι τιμές στο πεδίο τάσης διόγκωσης και οι τιμές που μετρήθηκαν στο εργαστήριο από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης και τη δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου.

Εδαφικό δείγμα		Τάση διόγκωσης (kPa)		
		Σταθερού φορτίου	Ελεύθερης διόγκωσης	Επιτόπου τιμή
Khvalynsk	Διαταραγμένο	570	870	500
	Αδιατάρακτο	250	510	...
Sarmatsk	Διαταραγμένο	250	690	...
Aral'sk	Αδιατάρακτο	420	700	300

Πίνακας 19: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.

[Πηγή: Sorochan, 1991]

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που καταγράφονται στο Πινάκα 19 συμπεραίνεται ότι η τιμή της τάσης διόγκωσης, όπως αυτή μετράται από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης, είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από τη δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου και από αυτήν που υπολογίζεται επιτόπου.

Ο Sorochan (1991), πρότεινε ότι η τιμή της τάσης διόγκωσης θα πρέπει να υπολογίζεται από τη δοκιμή διόγκωσης σταθερού φορτίου, γιατί τα αποτελέσματά της βρίσκονται σε συμφωνία με τις μετρήσεις που έχουν πάρει από τις επιτόπου τιμές. Ωστόσο, οι Egoi et al. (1987) έχουν διαφορετικά συμπεράσματα με αποτέλεσμα να προτείνουν ότι η τάση διόγκωσης πρέπει να υπολογίζεται από τη δοκιμή σταθερού όγκου.

Με σκοπό την μελέτη του φαινομένου διόγκωσης και την διεξαγωγή πιο σαφή αποτελεσμάτων οι πειραματικές μελέτες συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Οι πιο πρόσφατες λοιπόν έρευνες λαμβάνουν χώρα για διαφορετικές δοκιμές διόγκωσης στο οιδήμετρο, σε αργίλους της περιοχής Flandres. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η υπολογισθείσα τάση διόγκωσης από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης είναι αρκετά υψηλότερη από αυτήν που προορίζεται από τις δοκιμές σταθερού όγκου και σταθερού φορτίου. Τα αποτελέσματα της έρευνας καταγράφονται στον Πίνακα 20 (Khaddaj et al., 1992).

Εδαφικό δείγμα	Τάση διόγκωσης (kPa)		
	Σταθερού φορτίου	Ελεύθερης διόγκωσης	Σταθερού όγκου
Flandres	185	300-360	275

Πίνακας 20: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους.

[Πηγή: Khaddaj et al., 1992]

Ωστόσο πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις για επιτόπου τιμή διόγκωσης με δοκιμές για την άργιλο της περιοχής Al-Qatif, με σκοπό την σύγκριση των τιμών και την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 21 (Abduljauwad et al., 1993)

Εδαφικό δείγμα	Τάση διόγκωσης (kPa)		
	Σταθερού φορτίου	Ελεύθερης διόγκωσης	Σταθερού όγκου
Al-Qatif	800	3100	180

Πίνακας 21: Συγκριτική παρουσίαση τιμών τάσης διόγκωσης μετρούμενη με διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους

[Πηγή: Abduljauwad et al., 1993]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις προαναφερόμενες μετρήσεις της περιοχής Al-Qatif εγκαταστάθηκε επιτόπου σύστημα μέτρησης της τάσης και του ποσοστού διόγκωσης. Το δοκιμαστικό φρέαρ είναι βάθος 0.9m όπου στο εσωτερικό τοποθετήθηκε άργιλος και στην επιφάνεια αυτής μεταλλική πλάκα. Στην επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας ασκήθηκε τάση 7 kPa για μισή ώρα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε νερό σε ειδικά διαμορφωμένα στραγγιστήρια που είχαν διανοιχτεί περιμετρικά του ερευνητικού φρέατος. Καταγράφηκαν η τάση και το ποσοστό της εμφανισθείσας διόγκωσης.

Από την πειραματική μελέτη γίνεται σαφές ότι η τιμή της τάσης διόγκωσης, όπως αυτή υπολογίζεται από τη δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης και τη δοκιμή διπλού οιδημέτρου, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που μετρήθηκε επιτόπου. Πλησιέστερα στη μετρηθείσα τιμή τάσης διόγκωσης, είναι η τιμή που υπολογίζεται από τη δοκιμή σταθερού όγκου αλλά και αυτή με μεγάλη απόκλιση (Abduljauwad et al.,1993 ; Xeidakis, G., Koudoumakis, P, Tsirambides, A., 2004).

3.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αντιληπτό ότι η μέτρηση της τάσης διόγκωσης είναι αρκετά δύσκολη και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες με αποτέλεσμα οι επιστήμονες να μην έχουν σταθερά αποτελέσματα.

Παρουσιάζονται αρκετές δυσκολίες κατά την μέτρηση του ποσοστού διόγκωσης των διογκούμενων εδαφών ωστόσο, δεν είναι μόνο αυτό ο παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά τις μελέτες. Υπάρχει μεγάλη έλλειψη αποδεκτών μεθόδων της μέτρησης του ποσοστού διόγκωσης των διογκούμενων εδαφών και αυτό υποδηλώνεται και από το πλήθος των εργαστηριακών μεθόδων προσδιορισμού των παραμέτρων αυτών που υπάρχει στη βιβλιογραφία.

Συμπέρασμα λοιπόν των όσων αναλύθηκαν παραπάνω είναι τα εξής:

- Οι τιμές της τάσης και του ποσοστού διόγκωσης που προσδιορίζονται εργαστηριακά διαφέρουν σημαντικά από μέθοδο σε μέθοδο. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται στις διαφορετικές συνθήκες προσομοίωσης των φυσικών συνθηκών διόγκωσης των εδαφών.
- Η δοκιμή ελεύθερης διόγκωσης στο οιδήμετρο υπερεκτιμά σημαντικά την τάση και το ποσοστό διόγκωσης, ενώ
- Η δοκιμή σταθερού όγκου δίνει ενδιάμεσες τιμές και η δοκιμή σταθερού φορτίου δίνει τις χαμηλότερες τιμές.
- Οι επιτόπου μετρήσεις δίνουν, πάντα σημαντικά μικρότερες τιμές, έως και 17 φορές, τάσης και ποσοστού διόγκωσης από τις εργαστηριακές

Υπάρχει έλλειψη ερευνητικών εργασιών για τα διογκούμενα εδάφη του ελλαδικού χώρου και η μελέτη της συμπεριφοράς τους αποτελεί μείζονος σημασίας ερευνητική δραστηριότητα με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον (Παπακυριακόπουλους Π. & Κουδουμάκης Π., 2001 ; Κουδουμάκης Π. 2002).

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα εδάφια η διόγκωση θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που χρήζει πρόληψη και αντιμετώπιση. Σε περίπτωση που δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα διόγκωση και δεν επιθυμείται να πραγματοποιηθεί κάποια από της μεθόδους αποστράγγισης δίνεται η δυνατότητα εναλλακτικών μέτρων. Έτσι λοιπόν, για την πρόληψη και την αποφυγή του φαινομένου πραγματοποιούνται διαδικασίες κατεργασία του υπεδάφους με σκοπό την αύξηση της αντοχής του εδαφικού υλικού.

Η πιο κλασική μέθοδος για την επίτευξη αυτή είναι η απομάκρυνση των προβληματικών υλικών και την αντικατάσταση τους με μη διογκούμενα εδάφη. Ωστόσο, πειραματικές μελέτες έχουν απόδειξη ότι η απομάκρυνση δεν αποτελεί την μόνη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Οι έρευνες έδειξαν ότι η κατεργασία του εδαφικού υλικού που θεωρείται ευάλωτο στην διόγκωση, με πρόσθετα υλικά έχει συνέπεια την αλλαγή των χαρακτηριστικών του και ιδιαίτερα της αντοχής του. Αποτέλεσμα αυτού είναι το έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον των νέων μεθόδων.

Τα διογκούμενα εδάφη μπορούν να σταθεροποιηθούν με την προσθήκη μικρής ποσότητας ασβεστού, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού καθώς και να βελτιώσει όλη την τεχνική συμπεριφορά. Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν καταλήξει σε αναλογίες που βελτιώνουν είτε τα φυσικά χαρακτηριστικά είτε την μηχανική αντοχή. Ειδικότερα ισχύει ότι οι αναλογίες υδράσβεστου κυμαίνονται 1 - 3% για βελτίωση φυσικών χαρακτηριστικών και 3 - 8% για βελτίωση μηχανικής αντοχής

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βελτίωση της αντοχής του μίγματος έχει αποδοθεί σε χημικές αντιδράσεις γύρω από το εδαφικό υλικό (αργιλικό ορυκτό). Επιπλέον, η μακροπρόθεσμη ανάπτυξη τους οφείλεται σε βαθμιαία κρυστάλλωση των προϊόντων αντίδρασης ανάμεσα στην άργιλο και την υδράσβεστο. Η ιπτάμενη τέφρα αποδεδειγμένα βελτιώνει τα χαρακτηριστικά αντοχής των εδαφικών υλικών με μεγάλο δυναμικό μεταβολής του όγκου τους. Όμως τονίζεται ότι οι έρευνες δεν έχουν εξετάσει εκτεταμένα την επιρροή της ιπτάμενης τέφρας στα χαρακτηριστικά διόγκωσης και συρρίκνωσης εδαφών.

Η ανάγκη αναγνώρισης και κατάταξης των διογκούμενων εδαφών οδήγησε σε εκτεταμένες έρευνες των ιδιοτήτων τους και των χαρακτηριστικών διόγκωσης τους, όμως δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο η χημική σταθεροποίηση στο δυναμικό διόγκωσης εδαφών. Τονίζεται ότι τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε εδάφη που έχουν υποστεί διόγκωση με υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα και η υδράσβεστος δεν δίνουν σαφή αποτελέσματα. Επιπλέον, το

ποσοστό μεταβολή διόγκωσης των μιγμάτων δεν είναι σταθερός σε καμία από τις προαναφερόμενες περιπτώσεις με αποτέλεσμα η μέθοδος προσθήκης υλικών για την βελτίωση των χαρακτηριστικών των εδαφών που ενδείκνυται να υποστούν διόγκωση να μην θεωρείται ακόμα κατάλληλη για χρήση (Αθανασόπουλος Α., 2010).

Σημειώνεται ότι τα εδαφικά χαρακτηριστικά έχουν υποστεί αλλαγές ιδιαίτερα σε περιοχές που χρησιμοποιούνται είτε για την κατασκευή έργων, είτε λόγω αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής όπως οδοποιία, λιμένες, εγκαταστάσεις επεξεργασία λυμάτων κ.ά. Συνέπεια όλων των προαναφερόμενων είναι η αναζήτηση μεθόδων βελτίωσης των χαρακτηριστικών του εδάφους με στόχο την αύξηση και την μείωση της συμπίεσής του. Οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα προβλήματα που αντιμετωπίζει κάθε περιοχή. Στοχεύουν στην αποφυγή καθιζήσεων και διογκώσεων κατά την διάρκεια λειτουργικής ζωής ενός έργου, στην αύξηση της διατμητικής του αντοχής καθώς και στην προφόρτιση, αυτά αντιμετωπίζονται κυρίως στα αργιλικά εδάφη.

Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αυτών δίνεται από τα στραγγιστήρια τα οποία ποικίλουν και κατασκευάζονται ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του προβλήματος. Στην συνέχεια του Κεφαλαίου θα αναπτυχθούν τα είδη των στραγγιστικών έργων καθώς και οι αρχές κατασκευής σε κάθε ένα από αυτά.

4.2. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Θεωρητικά το δυναμικό διόγκωσης ενός διογκούμενου εδάφους μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή να εξαλειφθεί πλήρως με μια από τις παρακάτω μεθόδους:

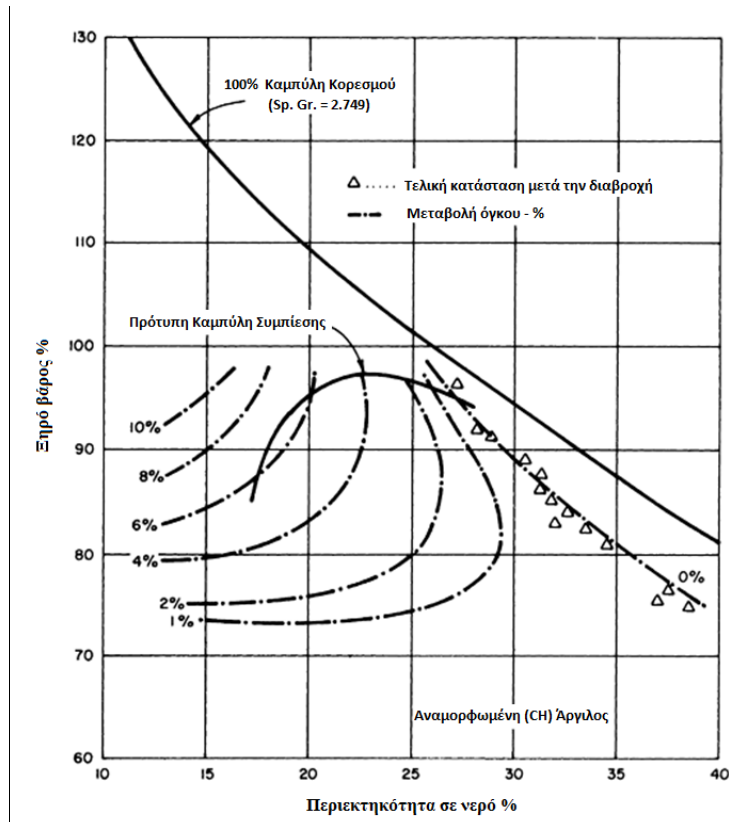
1. Πλημμύρα του καλοτοποθετημένου εδάφους για να επιτευχθεί διόγκωση πριν από την κατασκευή.

Σε μια παλιά καθιερωμένη έννοια μεταξύ των μηχανικών και των εργολάβων καθώς και του λαού, η αντιμετώπιση στη διόγκωση του εδάφους είναι η προδιαβροχή. Η υγρασία μπορεί να μετακινηθεί από ένα βάθος νερού σε ένα ανώτερο ελλειμματικό σε υγρασία μέσω τριχοειδούς ανύψωσης. Η μετανάστευση της υγρασίας μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη χαμηλής θερμοκρασίας μέσω θερμώσωσης ή άλλων μηχανισμών. Κανονικά η υγρασία εξατμίζεται στην επιφάνεια και διατηρείται μια υγρασία ισορροπίας στο έδαφος. Η παρουσία των καλυπτόμενων τομέων, όπως οι πλάκες δαπέδου, πεζοδρόμια ή παρόμοιες δομές που αναστέλλουν την εξάτμιση, αυξάνει την περιεκτικότητα της υγρασίας του εδάφους θεμελίωσης με αποτέλεσμα τη διόγκωση.

Η θεωρία της προδιαβροχής βασίζεται με την υπόθεση σχετικά με το βρέξιμο πριν από την κατασκευή και αν ο δείκτης υψηλής υγρασίας στο χώμα διατηρείται, ο όγκος του εδάφους θα παραμείνει ουσιαστικά σταθερός, έτσι επιτυγχάνεται μια κατάσταση μη διόγκωσης και συνεπώς δε θα συμβεί δομική βλάβη.

2. Μείωση της πυκνότητας του εδάφους με έλεγχο συμπίεσης

Ο Dawson (1959) πρότεινε ότι τα άκρως διογκούμενα εδάφη πρέπει να συμπυκνωθούν με κάποια ελάχιστη πυκνότητα και όχι με μια μέγιστη πυκνότητα. Οι Holtz και Gibbs (1959) δείχνουν την επίδραση της πυκνότητας και της υγρασίας για την επέκταση ενός συμπιεσμένου διογκούμενου αργίλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 36.



Σχήμα 36: Τις % της διόγκωσης του εδάφους για διάφορες συνθήκες τοποθεσιών υπο μοναδιαία φόρτηση PSI
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

3. Αντικατάσταση του διογκούμενου εδάφους με άλλο μη-διογκούμενο.

Αυτή η λύση θεωρείται ως την πιο απλή αφού πραγματοποιείται αποκατάσταση του διογκούμενου εδάφους με κάποιο μη διογκούμενο εδαφος. Προτείνεται δηλαδή η αντικατάσταση του εδάφους με εδαφος που μετά από επεξεργασία παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως μεγάλη αντοχή στην διόγκωση. Ωστόσο, δεν θεωρείται ως βέλτιστη λύση διότι η μετακίνηση εδάφους μεγάλου όγκου απαιτεί συγκεκριμένες προδιαγραφές.

4. Αλλαγή των ιδιοτήτων του διογκούμενου εδάφους με χημικές ενέσεις.

Εκτός από τη χρήση του ασβέστη, χημικές ουσίες και οργανικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σταθεροποίηση των διογκούμενων εδαφών. Το τσιμέντο και η ιπτάμενη τέφρα έχουν χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο με επιτυχή αποτελέσματα. Η ιπτάμενη τέφρα μερικές φορές προστίθεται στο μίγμα εδάφους- ασβέστη για την αύξηση ποζολανικής

αντίδρασης. Άλλα ανόργανα χημικά όπως το πυριτικό νάτριο, υδροξείδιο του ασβεστίου, χλωριούχο νάτριο, χλωριούχο ασβέστιο και το φωσφορικό οξύ έχουν χρησιμοποιηθεί για την σταθεροποίηση των διογκούμενων εδαφών. Πολλές από αυτές τις χημικές ουσίες είναι αποτελεσματικές σε εργαστηριακές συνθήκες, αλλά η εφαρμογή τους στο έδαφος είναι πολύ δύσκολη. Όπως προαναφέρθηκε οι πειραματικές μελέτες δεν δίνουν σαφή αποτελέσματα και στοιχεία με στόχο να αποδεικνύεται η ικανότητα της μεθόδου αυτής.

5. Μόνωση του εδάφους ώστε να μην υπάρχει μεταβολή της υγρασίας

Ο Terzaghi δήλωσε ότι χωρίς νερό δε θα υπήρχε ανάγκη της εδαφομηχανικής. Ο Terzaghi είχε μόνο περιορισμένη γνώση για τα διογκούμενα εδάφη. Ωστόσο, η δήλωση του μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια στην συμπεριφορά των διογκούμενων εδαφών. Από τότε που έγιναν γνωστά τα προβλήματα των διογκούμενων εδαφών, οι μηχανικοί προσπαθούν να απομονώσουν το νερό από τη δομή της θεμελίωσης. Είναι σχετικά μια απλή επιχείρηση για την αφαίρεση ελεύθερου νερού που μπορεί να διαρρεύσει στα θεμέλια ενός κτηρίου, παρέχοντας επαρκή αποστράγγιση της επιφάνειας και σωστά εγκαταστημένα συστήματα αποχέτευσης.

Έχουν χρησιμοποιηθεί φράγματα υδραμιού τόσο οριζόντια όσο και κάθετα, με περιορισμένο βαθμό επιτυχίας στην παρεμπόδιση της μεταφοράς της υγρασίας. Είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα τόσο στις εξωτερικές επί τόπου συνθήκες όσο και στο εργαστήριο για την καθιέρωση μιας οικονομικότερης μεθόδου για τον έλεγχο της μετανάστευσης της υγρασίας.

❖ *Οριζόντια φράγματα υγρασίας*

Τα οριζόντια φράγματα υγρασίας μπορούν να εγκατασταθούν γύρω από ένα κτήριο στη μορφή μεμβράνης, άκαμπτης πλάκας ή εύκαμπτης πλάκας. Ο σκοπός των οριζόντιων φραγμάτων είναι να αποτρέψουν την υπερβολική πρόσληψη της επιφανειακής υγρασίας. Η χρήση και η αποτελεσματικότητα των φραγμάτων υγρασίας αναφέρονται παρακάτω:

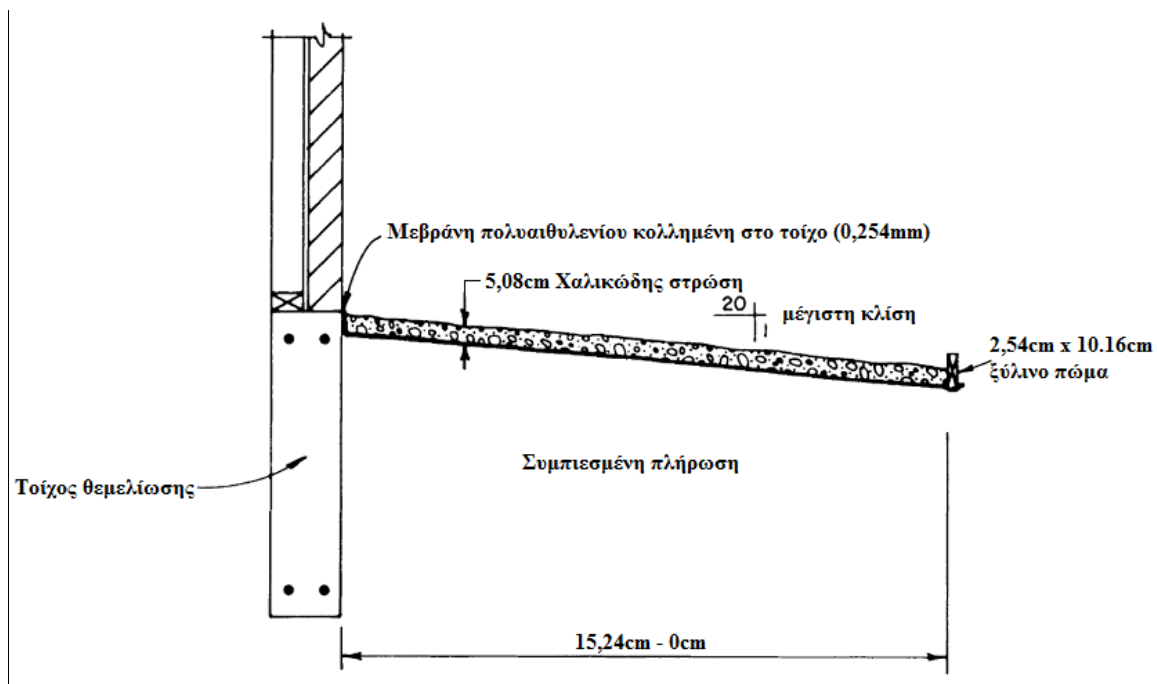
1. Μεμβράνες

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο οριζόντιο φράγμα υγρασίας είναι ένας συνδυασμός από μια μεμβράνη πολυαιθυλενίου που εκτείνεται πέρα από τα όρια της επίχωσης και τοποθετείται χαλαρό χαλίκι πάνω στη μεμβράνη. Μερικές φορές τοποθετείται μια σανίδα κατά μήκος της άκρης της μεμβράνης. Ο σκοπός μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι να προλαμβάνει την επιφανειακή εισροή ώστε να μη διαρρεύσει μέσω της επίχωσης μέσα στο κτίριο και να εμποδίσει την ανάπτυξη των ζιζανίων (Σχήμα 37).

Πρέπει να συνειδητοποιήσουμε ότι τα ξηρά εδάφη κάτω από μια αδιαπέραστη μεμβράνη με τον καιρό θα διαβραχούν ανεξάρτητα από την παρουσία της εν λόγω μεμβράνης επειδή πλέον δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εξάτμιση. Επίσης, πρέπει να αντιληφθούμε ότι η μεμβράνη του πολυαιθυλενίου κυμαίνεται περίπου από 4 έως 20 mm. Η μεμβράνη σκίζεται εύκολα με αποτέλεσμα με το πέρασμα του χρόνου να δημιουργούνται οπές. Μια επιφάνεια νερού συγκεντρώνεται σε μια περιορισμένη περιοχή όπου με το πέρασμα του χρόνου διαρρέει μέσα από τις τρύπες και τις άκρες της μεμβράνης και εισάγεται

κάτω από το έδαφος, ενώ η εξάτμιση και η ξήρανση του εδάφους κάτω από τη μεμβράνη είναι αδύνατη.

Ακόμη, και στην περίπτωση μιας τέλει αδιαπέρατης μεμβράνης, η μετανάστευση της υγρασίας λόγω της θερμικής μεταφοράς θα εισάγει επιπλέον υγρασία στο έδαφος της θεμελίωσης. Έτσι, φαίνεται ότι το αμφίβολο πλεονέκτημα της χρήσης μιας μεμβράνης γύρω από το κτίριο είναι να αυξήσει το χρόνο που απαιτείται για την διείσδυση της υγρασίας και κάνει πιο ομοιόμορφη την κατανομή της υγρασίας. Κατά την διάρκεια αρκετών ετών, το έδαφος της επίχωσης κάτω από μια μεμβράνη θα είναι πλήρως κορεσμένο. Ανασηκώνοντας την μεμβράνη, είναι εύκολο να διαπιστώσεις ότι το έδαφος έχει περιεκτικότητα σε υγρασία μεγαλύτερη από το όριο πλαστικότητας.



Σχήμα 37: Αδιαπέραστη μεμβράνη κατά μήκος των εξωτερικών τοίχων.

[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

2. Ποδιές σκυροδέματος

Οι εγκαταστάσεις των ποδιών σκυροδέματος ή των πεζοδρομίων έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στον έλεγχο της διακύμανσης της υγρασίας. Το πλεονέκτημα της χρήσης των ποδιών σκυροδέματος σε αντίθεση με τις πλαστικές μεμβράνες είναι ότι τα πρώτα προσφέρουν ένα θετικό εμπόδιο στο νερό. Προφανώς, είναι λογικό ότι, η συγκεκριμένη ποδιά προσφέρει περισσότερη και μεγαλύτερη προστασία στο κτίριο. Η πλακόστρωση ολόκληρης της περιοχής εκτός του κτηρίου είναι ανέφικτη και αντιαισθητική. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι η θεμελίωση μετακινείται λόγω των διογκωμένων εδαφών που σπάνια συμβαίνει στα πρατήρια υγρών καυσίμων καλύπτεται ολόκληρη η επιφάνεια του εδάφους.

Οι Mohan και Rao (1965) εγκατέστησαν ποδιά σκυροδέματος πλάτους 4 ποδιών γύρω από κτίρια που στηρίζονταν σε μαύρο οργανικό έδαφος, η οποία αποδείχτηκε αποτελεσματική. Ισχυρίζονται ότι η λειτουργία της ποδιάς είναι να απομακρύνει τη

διακύμανση της οριακής υγρασίας μακριά από το κτίριο. Ενώ η χρήση των ποδιών σκυροδέματος γύρω από το εξωτερικό του κτιρίου μπορεί να αποδειχθεί ευεργετική, πρέπει όμως να δοθεί προσοχή στην απόκτηση μιας αποτελεσματικής σφράγισης μεταξύ των ποδιών και των τειχών των θεμελίων. Η διόγκωση του εδάφους μπορεί να σηκώσει την ποδιά έτσι ώστε η αποστράγγιση της επιφάνειας αντί να φύγει μακριά από το κτίριο να πέφτει πάνω σε αυτό. Με μια πλημμελή κατασκευή αρθρώσεων, το νερό θα διαρρεύσει και θα εισαχθεί στο έδαφος της θεμελίωσης. Ωστόσο μια ποδιά μπορεί να προκαλέσει ζημιά παρά καλό, σε εκείνες τις περιοχές όπου απαιτείται φροντίδα σκυροδέματος και συντήρηση.

3. Ασφαλικές Μembrάνες

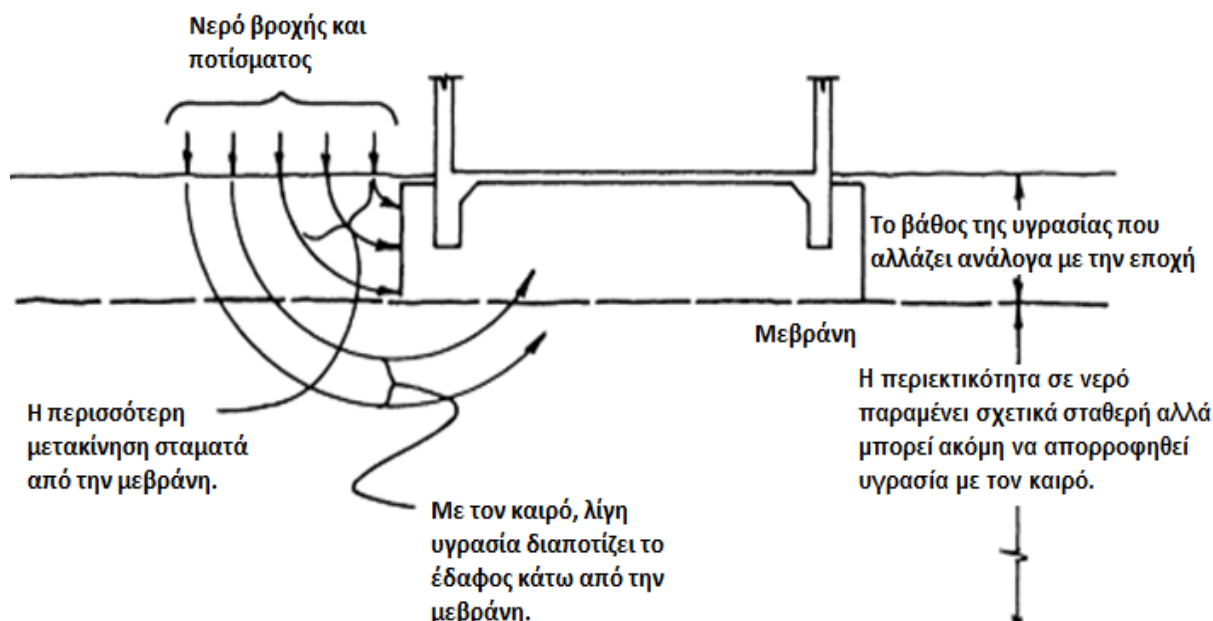
Ήδη από το 1933, το τμήμα Εθνικής οδού του Τέξας χρησιμοποιεί ασφαλικές μεμβράνες για την αποφυγή της εισόδου των επιφανειακών υδάτων στο διογκούμενο έδαφος της θεμελίωσης (1945). Στο τσιμεντένιο πεζοδρόμιο βρισκόταν ένας ασφαλικός τάπητας πλάτους 48 πόδια. Η εγκατάσταση αυτής της μεμβράνης μπορεί να επιβραδύνει τη διόγκωση αλλά δεν θα την εμποδίσει. Οι ασφαλικές μεμβράνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη της επιφάνειας των διογκούμενων εδαφών, έτσι τα μη διογκούμενα εδάφη μπορούν να τοποθετηθούν ως γέμισμα στην κορυφή των μεμβρανών. Αυτό θα ελαχιστοποιήσει την διείσδυση των επιφανειακών υδάτων εντός των εδαφών κάτω από την πλάκα. Όπου απαιτείται κατασκευή πλάκας σχετικά με το έδαφος, μια τέτοια θεραπεία μπορεί να είναι επωφελής. Η ποσότητα της τσιμεντο ασφάλτου που απαιτείται για την κατασκευή μιας μεμβράνης, σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ασφάλτου (1968), είναι περίπου 1,3 γαλόνια να τετραγωνική γιάρδα. Η χρήση της ασφαλικής μεμβράνης σε σχέση με μια κατασκευή πισίνας σε μια περιοχή διογκούμενου εδάφους είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Θα απαιτηθεί περαιτέρω έρευνα και παρατήρηση.

❖ *Κατακόρυφα φράγματα υγρασίας*

Τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας χρησιμοποιούνται περιμετρικά από το κτήριο για να ανακόψουν μια πηγή νερού που ενδεχομένως μπορεί να διεισδύσει στο έδαφος κάτω από την πλάκα.

Θεωρητικά, τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας μπορούν να γίνουν πιο αποτελεσματικά από τα οριζόντια φράγματα υγρασίας στην ελαχιστοποίηση της εποχιακής ξήρανσης και συρρίκνωσης της παραμέτρου του εδάφους θεμελίωσης, καθώς και τη μακροπρόθεσμη διατήρηση των ομοιόμορφων συνθηκών υγρασίας κάτω από τον σκεπαστό χώρο. Τα θαμμένα κατακόρυφα φράγματα μπορεί να αποτελούνται από μεμβράνη πολυαιθυλενίου συγκεκριμένα ή από άλλα ανθεκτικά στεγανά υλικά. Η διαδρομή της μετακίνησης της υγρασίας όταν χρησιμοποιείται ένα κάθετο φράγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 38.

Θεωρητικά τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας έχουν ένα σαφές πλεονέκτημα έναντι των οριζόντιων φραγμάτων υγρασίας. Ωστόσο, εν όψει του υψηλού κόστους που χρειάζεται στην εγκατάσταση ενός κατακόρυφου φράγματος υγρασίας, ειδικά όπου απαιτείτε μεγάλο βάθος, είναι επισφαλές ότι μια τέτοια εγκατάσταση είναι επαρκούς αξίας ώστε να δικαιολογεί την δαπάνη.

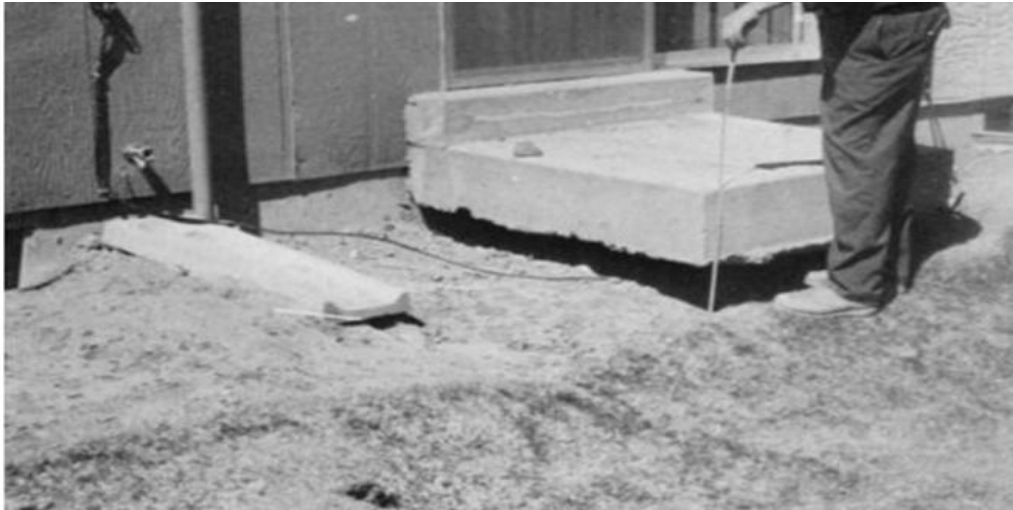


Σχήμα 38: Τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας εμποδίζουν την εισχώρηση νερού κάτω από την κατασκευή.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

❖ *Επίχωση*

Ένα σημαντικό στοιχείο που εμπλέκεται στην κατασκευή κτιρίων συνήθως είναι η επίχωση γύρω από το κτίριο. Όταν κατασκευαστεί σωστά η επίχωση εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό όπως και τα κατακόρυφα φράγματα υγρασίας. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε υπόγειο κτίριο, όπου σωστά η συμπιεσμένη επίχωση μπορεί να αποτρέψει τα επιφανειακά ύδατα να εισαχθούν στο έδαφος θεμελίωσης. Δυστυχώς, σπάνια μια επίχωση συμπιέζεται σωστά. Πολλοί κατασκευαστές επιλέγουν να ωθούν το χαλαρό έδαφος μέσα στην εκσκαφή χωρίς περαιτέρω σωστή συμπίεση. Άλλοι προσπαθούν να εδραιώσουν την επίχωση με μαλάξεις.

Είναι προφανές ότι η κατάλληλη συμπύκνωση της επίχωσης δεν μπορεί να επιτευχθεί με τέτοιες διεργασίες. Όταν συμπιέζεται εσφαλμένα, το σύνολο σχεδόν όλης της επίχωσης κατά μήκος των τοίχων της θεμελίωσης είναι σε μια χαλαρή κατάσταση. Τα επιφανειακά ύδατα μπορούν στη συνέχεια να εισέλθουν στην επίχωση και να διαρρεύσουν ελεύθερα εντός του εδάφους της θεμελίωσης. Τα αποτελέσματα εγκατάστασης της χαλαρής επίχωσης φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Τυπική περίπτωση χαλάρωσης της επίχωσης γύρω από το κτίριο. Η χαλαρή επίχωση αφήνει τα επιφανειακά ύδατα να εισχωρήσουν στο έδαφος της θεμελίωσης.

Προσοχή στις ρηγματώσεις όπου παγιδεύεται νερό.

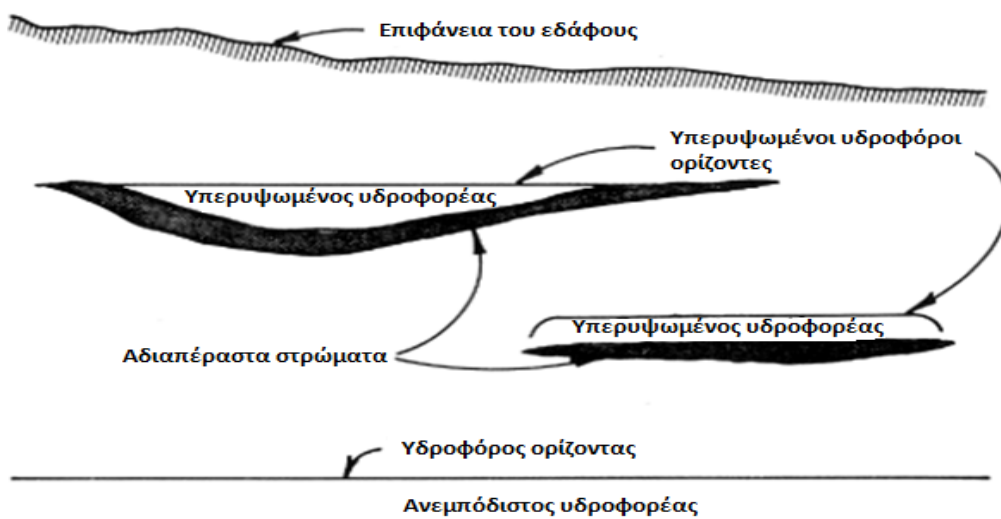
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

❖ Αποστάγιση

1. Αποστράγγιση εδάφους

Οι σκοποί της αποστράγγισης του εδάφους είναι οι παρακάτω:

- Διακόπτει την ροή της βαρύτητας του ελεύθερου νερού
- Το νερό κάτω από το έδαφος επικαθήμενο νερό
- Σύλληψη της τριχοειδούς υγρασίας και την μετακίνηση της υγρασίας σε κατάσταση ατμών.



Σχήμα 39: Υπερυψωμένοι υδροφορείς

[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

2. Αποστράγγιση της επιφάνειας

Η επιφάνεια του εδάφους γύρω από ένα κτίριο πρέπει να κλιμακώνεται έτσι ώστε τα επιφανειακά ύδατα να στραγγίζουν μακριά από την κατασκευή προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό συνήθως δεν επιτυγχάνεται και οφείλεται σε αμέλεια, στο κόστος, στου μικρού μεγέθους της ιδιοκτησίας και άλλων λόγων. Σε πολλές περιπτώσεις, η περιοχή γύρω από το κτίριο έχει σωστά διαβαθμιστεί μετά την κατασκευή, αλλά η κλίση του εδάφους άλλαξε αργότερα για να βελτιωθεί η εμφάνιση του τοπίου. Ως εκ τούτου, δεν είναι ασυνήθιστο να βρεθεί κτίριο με επιφανειακή αποστράγγιση που κατευθύνεται προς τα τείχη της θεμελίωσης.

Η μεταβολή της υγρασίας στην περίμετρο του κτιρίου φαίνεται να είναι η βασική αιτία των βλαβών του. Επομένως, με τη βελτίωση της αποστράγγισης, μια ευεργετική επίδραση είναι αναπόφευκτη. Αυτή η βελτίωση μπορεί να γίνει με την σωστή τοποθέτησής του συστήματος ψεκασμού του κήπου και του ίδιου του κήπου, 10 πόδια μακριά από το κτίριο, αλλά και των υδρορροών του καθώς και των υδραυλικών εγκαταστάσεων του κτιρίου και έλεγχος αυτών για να μην υπάρχουν τυχόν διαρροές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι αποκατάστασης που χρησιμοποιούν στραγγιστήρια θα αναλυθούν στην συνέχεια του Κεφαλαίου.

4.2.1. Είδη στραγγιστικών έργων

Τα υπόγεια νερά που είτε προέρχονται από τον υδροφόρο ορίζοντα είτε από την κατείδυση από την επιφάνεια της γης αντιμετωπίζονται με έργα αποστράγγισης. Τα έργα αυτά διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Έργα μονοδιάστατης λειτουργίας – Γραμμικά στραγγιστήρια/σωληνωτά
 - i. Στραγγιστικοί αγωγοί εγκάρσιοι και παράλληλοι της οδού
 - ii. Στραγγιστικές τάφροι εγκάρσια και παράλληλα της οδού
2. Έργα δυοδιάστατης λειτουργίας – στραγγιστικές στρώσεις
 - i. Στραγγιστικές στρώσεις για ροή κάθετη στην επιφάνεια τους
 - ii. Στραγγιστικές στρώσεις για ροή παράλληλη στην επιφάνεια τους
3. Έργα σύνθετα με στραγγιστικούς αγωγούς και στρώσεις

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασική αρχή των έργων αποστράγγισης για ότι αφορά την οδοποιία είναι η στράγγιση της δομικής κατασκευής του οδοστρώματος ώστε να μην υπάρχει δυνατότητα συγκέντρωσης νερών στην διεπιφάνεια μεταξύ της στρώσης στράγγισης οδοστρώματος και της υποκείμενης στρώσης έδρασης οδοστρώματος. Επιπλέον, η κατασκευή στραγγιστικών έργων με συνήθη αδρανή υλικά δεν αποκλείει την χρήση βιομηχανοποιημένων διαπερατών υλικών αρκεί αυτά να εφαρμόζονται εντός του εύρους των προδιαγραφών αυτών και των δυνατοτήτων τους.

4.2.1.1. Αρχές σχεδιασμού εγκαταστάσεων αποστράγγισης

Για τον σχεδιασμό των συνήθων στραγγιστικών έργων πρέπει να λαμβάνονται κάποιες υπόψη τα κάτωθι:

- 1) Το αδέσμευτο νερό από το έδαφος που μπορεί να παραβλάψει το σώμα πρέπει να συλληφθεί είτε με εγκαταστάσεις αποστράγγισης είτε με κατάλληλα γεωϋφάσματα με διαπερατή μάζα ινών ή άλλων υλικών. Οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να κατασκευαστούν με ή χωρίς αγωγούς, αποτελούνται από αδρανή υλικά φίλτρου το οποίο είναι πιο χονδρόκοκκο από το προς εξυγίανση συνορεύον σώμα του έργου. Ωστόσο, θα πρέπει να είναι τόσο λεπτόκοκκο, ώστε να μη μπορούν οι λεπτοί κόκκοι της γαιώδους περιοχής να εισχωρήσουν στο φίλτρο. Αυτοί είναι οι λόγοι που για την σωστή εγκατάσταση των στραγγιστικών έργων πρέπει να προδιαγράφεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του φίλτρου λαμβάνοντας υπόψη την κοκκομετρική διαβάθμιση του περιβάλλοντος εδάφους. Οι σχέσεις που πρέπει να πληρούνται καταγράφονται στον Πίνακα 22.

#	Λόγοι διαμέτρων οπών κόσκινου	Συνθήκη
1	D15 υλικού αποστράγγισης (φίλτρο) D85 υλικού υπεδάφους (έδαφος)	≤ 5
2	D15 υλικού αποστράγγισης (φίλτρο) D15 υλικού υπεδάφους (έδαφος)	≥ 5
3	D50 υλικού αποστράγγισης (φίλτρο) D50 υλικού υπεδάφους (παρακείμενης στρώσης)	≤ 25
4	D15 χαλίκων D85 άμμου	≤ 5
5	D15 χαλίκων D15 άμμου	≥ 5
6	D85 υλικού αποστράγγισης (χαλίκων) D οπής σωλήνα αποστράγγισης (ή άνοιγμα αρμού)	> 1
7	D60 υλικού φίλτρου D10 υλικού φίλτρου	≤ 20

Πίνακας 22: Κανόνες φίλτρου

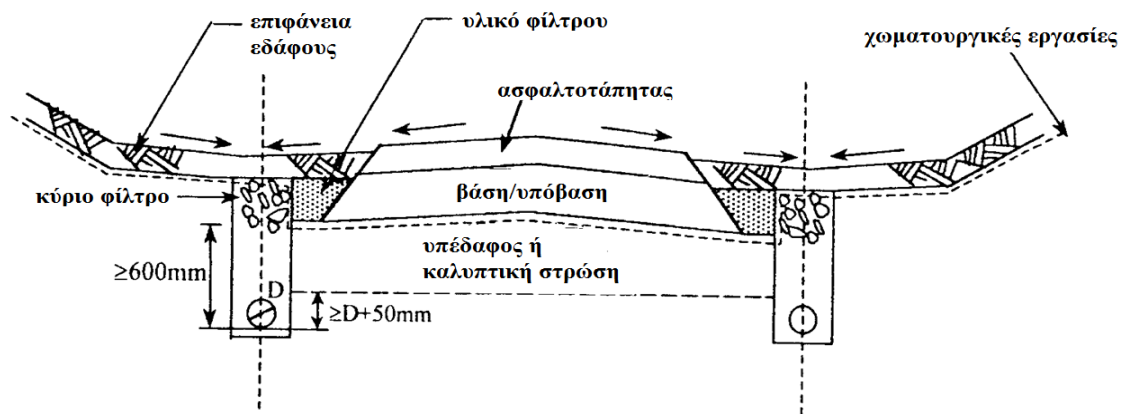
- 2) Το σώμα του φίλτρου μπορεί να κατασκευαστεί με δύο τρόπους είτε σε ένα κατασκευαστικό στάδιο δηλαδή σε μία στρώση είτε σε περισσότερα κατασκευαστικά στάδια δηλαδή στρώσεις. Τονίζεται ότι το πάχος κάθε στρώσεις θα πρέπει να είναι 15 cm (ή κατά προτίμηση 20 cm) και όχι μεγαλύτερο των 23 cm.
- 3) Τα γεωϋφάσματα έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως φίλτρα είτε για το διαχωρισμό στρώσεων είτε σαν αυτοτελή στραγγιστικά στοιχεία. Τονίζεται ότι θα

πρέπει να ακολουθούνται οι προδιαγραφές που έχουν δοθεί από τις εταιρίες που κατασκευάζουν γεωϋφάσματα.

- 4) Για την σωστή εγκατάσταση στραγγιστικών έργων θα πρέπει να ελέγχεται η λειτουργία τους. Για κάθε περίπτωση έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές μελέτες με αποτέλεσμα να μπορούν να συγκριθούν τα πραγματικά δεδομένα με τα πειραματικά. Συνέπεια των προαναφερόμενων είναι η επιλογή του κατάλληλου στραγγιστικού έργου.
- 5) Στην περίπτωση που υπάρχουν συγκεκριμένες θέσεις όπου θα περιορίζεται η διείσδυση επιφανειακού νερού στα στραγγιστικά έργα, πρέπει να καλύπτεται το έργο αυτό με συνεκτικό έδαφος πάχους τουλάχιστον 20 cm., εφόσον δεν ευρίσκεται κάτω από επιστρωμένη (με οδόστρωμα) επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να εξασφαλιστεί η κατασκευαστική ευστάθεια και αντοχή του φίλτρου καθώς επίσης και η λειτουργική τους επάρκεια στη διάρκεια της ζωής του έργου.
- 6) Εγκαταστάσεις αποστράγγισης πρέπει να σχεδιάζονται ώστε σε περίπτωση κοινών φρεατίων των συλλεκτηρίων αγωγών αποχέτευσης και των αγωγών αποστράγγισης, να μη εμποδίζεται η υδραυλική τους λειτουργία αλλά και κατά τις εργασίες να μη δημιουργούνται εμπόδια για την έντεχνη και άρτια κατασκευή.
- 7) Τα κατά μήκος γραμμικά στραγγιστήρια θα τοποθετούνται στα άκρα της οδού αμέσως μετά το οδόστρωμα μόνο όπου η διατομή είναι σε όρυγμα ή επί του εδάφους. Στην περίπτωση που η διατομή είναι σε ημιόρυγμα τότε τα κατά μήκος γραμμικά στραγγιστήρια τοποθετούνται μόνο στην πλευρά του ορύγματος. Επιπλέον, τα κατά μήκος γραμμικά στραγγιστήρια τοποθετούνται σε κεντρικές νησίδες που είναι διαμορφωμένες με φυτικές γαίες, ανεξαρτήτως εάν η στάθμη των χωματουργικών είναι σε όρυγμα, ή σε επίχωμα, ή στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους, ή σε μικτή διατομή. Επίσης, τοποθετούνται και σε κεντρικές νησίδες που είναι διαμορφωμένες με άλλο υλικό εκτός φυτικής γης (ασφαλτόμιγμα, σκυρόδεμα, πλακόστρωση, κλπ.) και υπάρχει πρόβλημα ταπείνωσης του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα. Ειδικότερα:

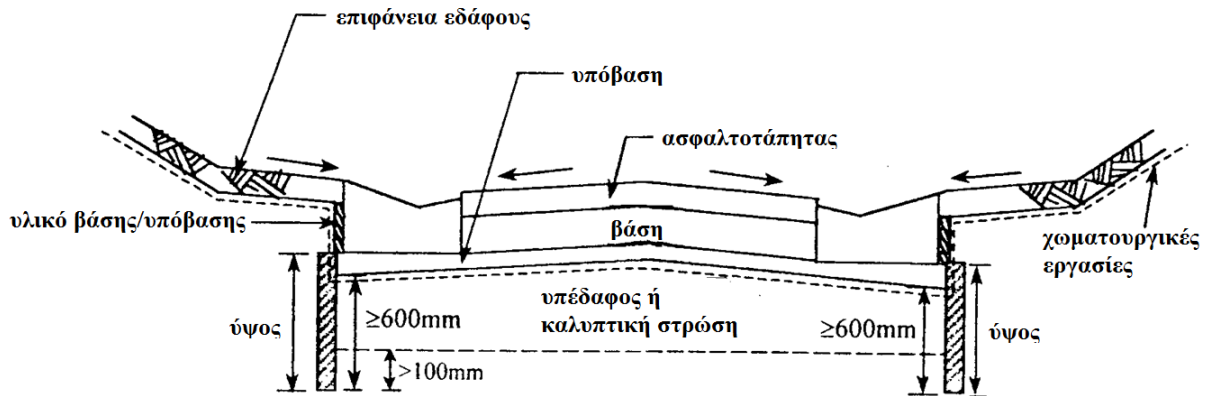
(α)

- ✚ Όταν η στάθμη των χωματουργικών είναι είτε όρυγμα είτε στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους, θα τοποθετούνται κατά μήκος γραμμικά στραγγιστήρια φίλτρου ευρείας διατομής, αφού τα επιφανειακά ύδατα από τα ερείσματα της οδού αποστραγγίζονται στο γραμμικό στραγγιστήρι. Στην περίπτωση που τα επιφανειακά ύδατα από τα ερείσματα της οδού αποστραγγίζονται σε ανοικτή επενδυμένη τάφρο θα τοποθετούνται στραγγιστήρια φίλτρου στενής διατομής ή πλαστικά στραγγιστήρια.



Σχήμα 40: Στράγγιση σε θέσεις ορύγματος με υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση κατά μήκος γραμμικών στραγγιστηρίων. Απορροή στα ερείσματα.

- ✚ Σε περίπτωση που γίνεται χρήση των κατά μήκος γραμμικών στραγγιστηρίων και για την διακοπή της ροής του ύδατος του υδροφόρου ορίζοντα από τα πρηνή του ορύγματος, ανεξαρτήτως αποστράγγισης των επιφανειακών υδάτων σε ανοικτή τάφρο ή όχι, εξετάζεται η παροχευτική ικανότητα όλων των τύπων γραμμικών στραγγιστηρίων και χρησιμοποιείται το καταλληλότερο (κατά κανόνα φίλτρου ευρείας διατομής).

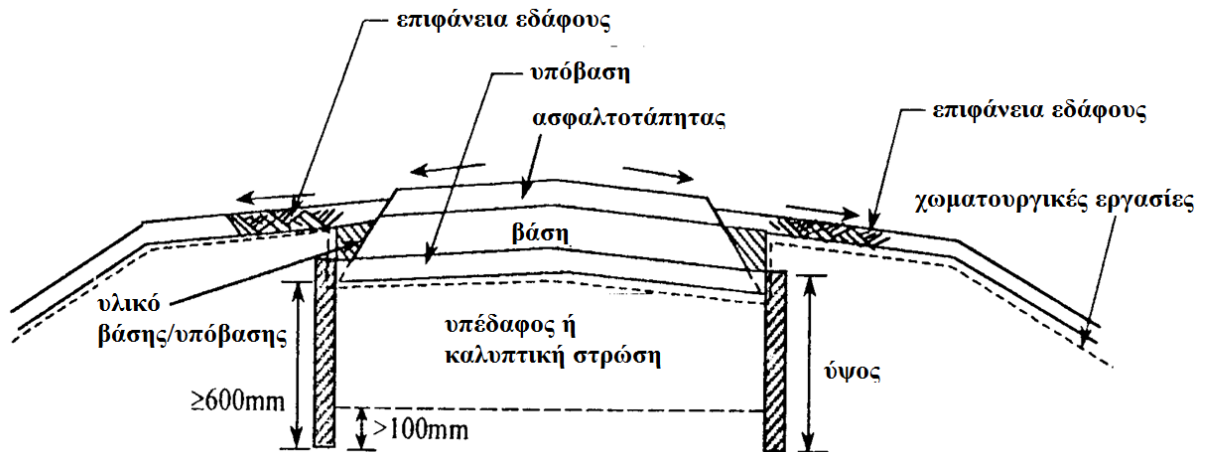


Σχήμα 41: Στράγγιση σε θέσεις ορύγματος με υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε ανοιχτές τάφρους.

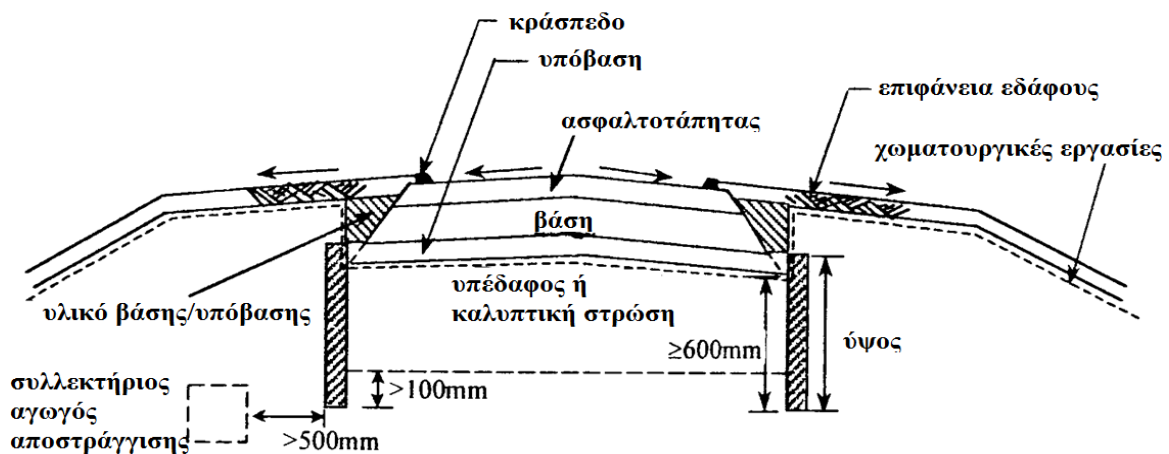
- ✚ Στην περίπτωση που δεν υπάρχει νησίδα και υπάρχει πρόβλημα ταπείνωσης του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα, εξετάζεται τα δεδομένα για την τοποθέτηση κατά μήκος γραμμικού στραγγιστηριού στον άξονα της οδού και κάτω από το οδόστρωμα για την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα.
- ✚ Στην περίπτωση που το πλάτος του ερείσματος για την τοποθέτηση κατά μήκος γραμμικών στραγγιστηρίων σε όρυγμα μπορεί να είναι μικρότερο των 2.5 m.

(β)

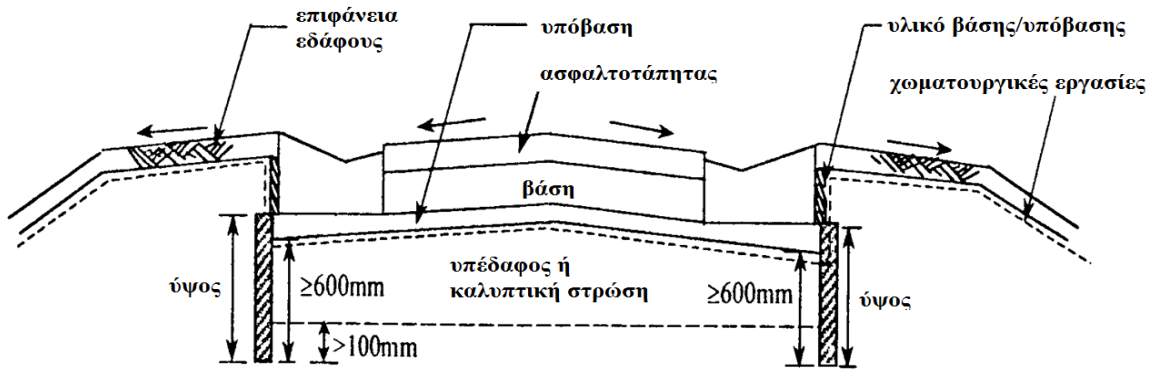
- ✚ Όταν η στάθμη των χωματουργικών είναι σε επίχωμα, δεν είναι απαραίτητα τα γραμμικά στραγγιστήρια λόγω της υποχρεωτικής ύπαρξης της στραγγιστικής στρώσης. Στην περίπτωση που υπάρχουν κακής ποιότητας υλικά επιχώματος τότε παρουσιάζεται κίνδυνος ανύψωσης της υγρασίας σε χαμηλές ελώδεις περιοχές είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν στραγγιστήρια και στα άκρα των επιχωμάτων και θα είναι τύπου «πλαστικά στραγγιστήρια» ή «στραγγιστήρια φίλτρου στενής διατομής», ανεξαρτήτως του τρόπου διεύθεσης των επιφανειακών υδάτων από τα ερείσματα της οδού.
- ✚ Σε περίπτωση που υπάρχει μονοκλινής κλίση της οδού, το γραμμικό στραγγιστήριο, πλαστικό ή φίλτρου στενής διατομής, κατασκευάζεται μόνο στο ένα άκρο της οδού, το χαμηλότερο.
- ✚ Στην περίπτωση που το πλάτος του ερείσματος για την τοποθέτηση κατά μήκος γραμμικών στραγγιστηρίων σε επίχωμα δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 2.0 έως 2.5m.



Σχήμα 42: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή στα πρανή.



Σχήμα 43: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε κρασπεδόρειθρα.



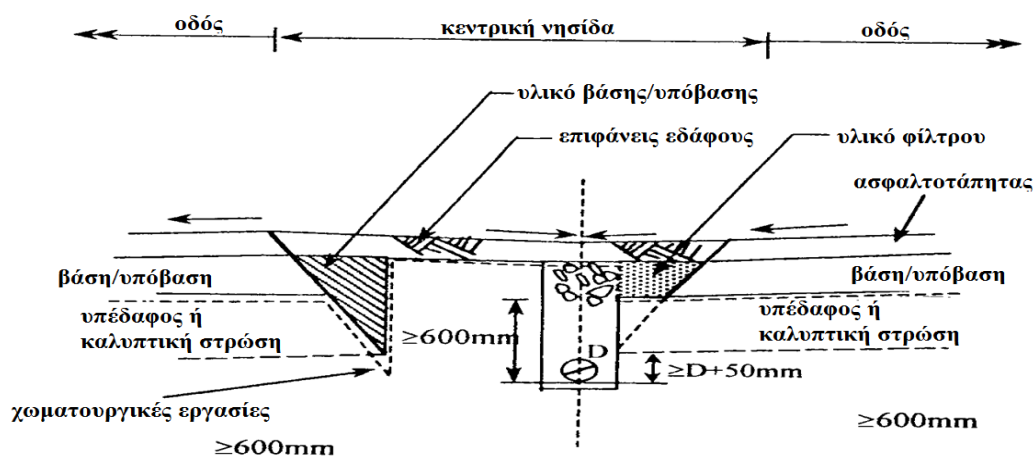
Σχήμα 44: Στράγγιση σε θέσεις επιχώματος από ακατάλληλα υλικά και υδροφόρο ορίζοντα, με τη χρήση στενών στραγγιστηρίων και πλαστικών στραγγιστηρίων. Απορροή σε ανοιχτές τάφρους.

(γ)

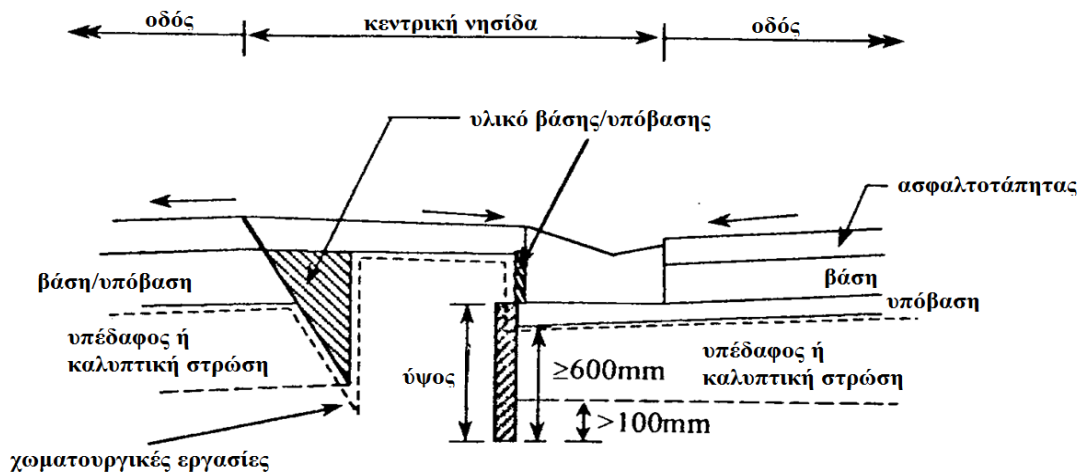
- ✚ Όταν η στάθμη των χωματουργικών είναι σε μικτή διατομή τα γραμμικά στραγγιστήρια κατασκευάζονται και στα δύο άκρα της οδού. Από τη μεριά του ορύγματος ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν στην περίπτωση 7 (α). Από τη μεριά του επιχώματος, το πλαστικό στραγγιστήρι ή το στραγγιστήρι στενής διατομής μπορεί να μην κατασκευαστεί όταν υπάρχει μονοκλινής κλίση της οδού προς τη μεριά της νησίδας ή του ορύγματος, και το πλάτος του ερείσματος είναι μικρότερο από 2,0 έως 2,5m.

(δ)

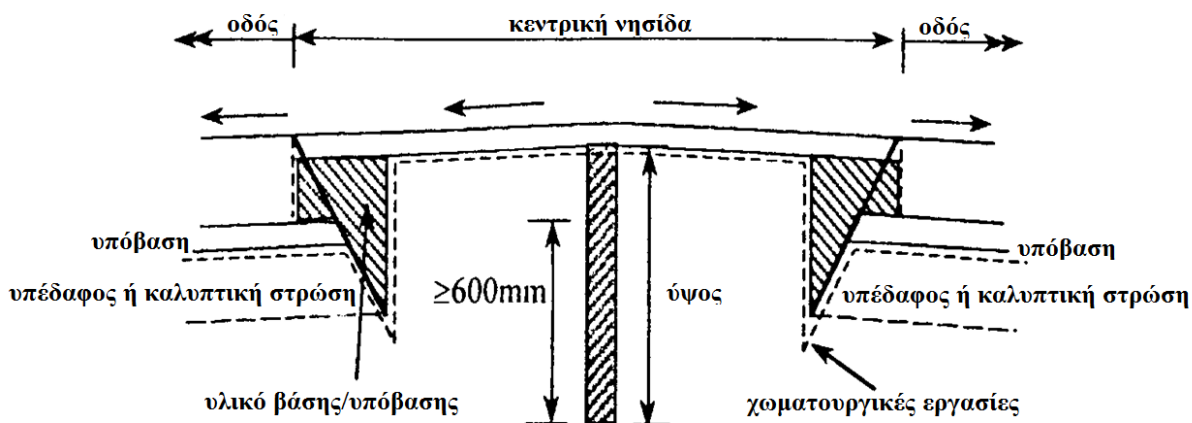
- ✚ Στις κεντρικές νησίδες, εάν το υλικό επικάλυψης είναι γαιώδες υλικό, συνήθως το γραμμικό στραγγιστήρι είναι φίλτρου ευρείας διατομής. Σε αντίθετη περίπτωση, επικάλυψης από μη γαιώδες υλικό, το στραγγιστήρι είναι φίλτρου στενής διατομής ή πλαστικό.



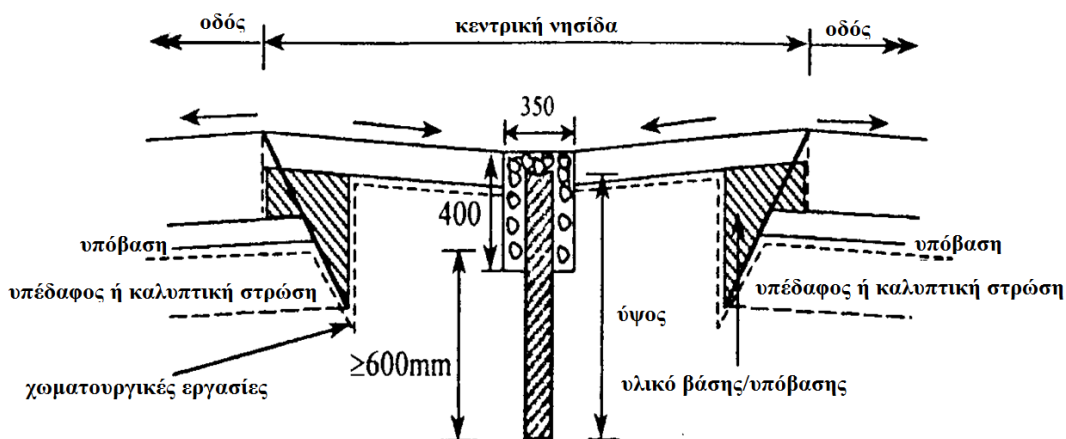
Σχήμα 4.6: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με διάτρητο αγωγό στην περιοχή κεντρικής νησίδας. Απορροή σε ανοιχτές τάφρους.



Σχήμα 45: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με στενά στραγγιστήρια και πλαστικά στραγγιστήρια. Στην περιοχή της κεντρικής νησίδας γίνεται απορροή σε επενδεδυμένες τάφρους.



Σχήμα 4.8: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με στενά στραγγιστήρια και πλαστικά στραγγιστήρια στην περιοχή της κεντρικής νησίδας με ανάποδη κλίση. Απορροή προς τα ερείσματα της οδού.



Σχήμα 46: Σχεδιασμός στραγγιστηρίου επιφανειακών και υπόγειων νερών με στενά στραγγιστήρια και πλαστικά στραγγιστήρια στην περιοχή της κεντρικής νησίδας με κανονική κλίση. Απορροή προς τα ερείσματα της οδού.

- 8) Τα κατά μήκος γραμμικά στραγγιστήρια ξεκινούν περίπου από το επίπεδο της βάσης/υπόβασης και εκτείνονται σε βάθος τουλάχιστον 600mm. Σε περίπτωση κατασκευής εξυγιαντικής στρώσης ο σωληνωτός αγωγός του στραγγιστηρίου θα πρέπει πάντοτε να βρίσκεται κάτω από το κατώτατο επίπεδο της εξυγιαντικής στρώσης και ειδικότερα η κορυφή του σωληνωτού αγωγού θα πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 50mm κάτω από τον πυθμένα της εξυγιαντικής στρώσης. Στην περίπτωση χρήσης πλαστικού στραγγιστηρίου χωρίς αγωγού, το πλαστικό στραγγιστήρι θα εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 100mm από την κατώτατη επιφάνεια της εξυγιαντικής στρώσης. Σημειώνεται ότι οι σωληνωτοί αγωγοί θα εκφορτίζονται σε κατάλληλες θέσεις στους αποδέκτες (π.χ. αγωγό ομβρίων, κλπ.).
- Κατ' εξαίρεση σε τμήματα έργων για τα οποία έχει γίνει πλήρης εδαφοτεχνική διερεύνηση στην οποία αποδεικνύεται ότι η στέψη των χωματοουργικών αποτελείται από περισσότερο διαπερατό υλικό από αυτό της βάσης/υπόβασης και εξυγιαντικής (εάν υπάρχει), δηλαδή από χονδρόκοκκο έδαφος και εφόσον δεν παρουσιάζεται υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, θα είναι δυνατόν να μην κατασκευάζονται έργα αποστράγγισης στους αυτοκινητοδρόμους.
- 9) Στην περίπτωση στραγγιστικής στρώσης ο σωληνωτός αγωγός του στραγγιστηρίου θα πρέπει να βρίσκεται πάντα κάτω από το κατώτατο επίπεδο της στραγγιστικής στρώσης και ειδικότερα η κορυφή του σωληνωτού αγωγού θα πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 200mm κάτω από τον πυθμένα της στραγγιστικής στρώσης.
- 10) Τα φρεάτια επίσκεψης και συντήρησης των γραμμικών στραγγιστηρίων δεν πρέπει να έχουν αποστάσεις μικρότερες των 50m ενώ δεν επιτρέπονται αποστάσεις μεγαλύτερες των 200m ανάλογα με την μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί για τα διάτρητα των στραγγιστικών αγωγών.
- 11) Εγκάρσια γραμμικά στραγγιστήρια τοποθετούνται υποχρεωτικά στις χαμηλές θέσεις της κατά μήκος τομής της ερυθράς της οδού όπου γίνεται εναλλαγή των ορυγμάτων σε επίχωμα ώστε να αποκλειστεί η διέλευση υπόγειων νερών στον όγκο του επιχώματος.

4.2.1.2. Αρχή λειτουργίας εγκαταστάσεων αποστράγγισης

Κατά την διόγκωση των εδαφών το νερό έχει εισχώρηση στους πόρους, αποτέλεσμα αυτού είναι η επιθυμητή απομάκρυνση των υδάτων από το κορεσμένο έδαφος. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση του κορεσμένου εδάφους, επιθυμείται καθίζηση η οποία μπορεί να προκύψει μόνο με την απομάκρυνση του νερού που βρίσκεται μέσα στους πόρους του.

Η χαμηλή διαπερατότητα των αργιλικών εδαφών θεωρείται από τους σημαντικότερους παράγοντες στην αύξηση του χρόνου της αποστράγγισης τους, αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η ολοκλήρωση της καθίζησης του εδάφους μπορεί να διαρκέσει ακόμα και δεκαετίες. Ένας τρόπος για να μειωθεί δραστικά ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της στερεοποίησης, δηλαδή της καθίζησης του διογκωμένου εδάφους, είναι η μείωση του μήκους

της διαδρομής που θα πρέπει να διανύσει το νερό για να απομακρυνθεί από τους πόρους του εδάφους.

Πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι τα περισσότερα εδάφη έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα κατά την οριζόντια διεύθυνση σε αντίθεση με την κατακόρυφη. Τονίζεται ότι η διάφορα διαπερατότητας μεταξύ τους μπορεί να είναι από 2 έως και 5 φορές μεγαλύτερη της οριζόντιας διεύθυνσης. Επιπλέον, αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει στρωσιγένεια που εμφανίζουν και της παρουσίας πολλών λεπτών ενστρώσεων ιλύος ή λεπτής άμμου.

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι η καλύτερη μέθοδος για την μείωση του χρόνου στερεοποίησης των εδαφών είναι τα έργα αποστράγγισης για την επιλογή της μεθόδου λαμβάνονται υπόψη τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, όλες οι μέθοδοι έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας τοποθετώντας τα στραγγιστήρια σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους για την μέγιστη απόδοση τους.

Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία των στραγγιστηρίων η τοποθέτηση γίνεται κάτω από το εσωτερικά του εδάφους συνδέοντας τα με το οριζόντιο στρώμα που θα πρέπει να είναι μεγάλης διαπερατότητας, στην επιφάνεια του εδάφους κάτω από το επίχωμα προφόρτισης. Έτσι το νερό των πόρων ρέει οριζόντια προς το πλησιέστερο στραγγιστήριο προς την στρώση αποστράγγισης. (Πλάτης Δ., 2007)

4.2.2. Χαρακτηριστικά Στραγγιστηρίων

Στο εδάφιο αυτό θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των στραγγιστηρίων με σκοπό την χρησιμότητα κάθε είδους. Επιπλέον, θα αναφερθούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα που μπορούν να παρουσιαστούν σε κάθε περίπτωση.

4.2.2.1. Γραμμικά στραγγιστήρια φίλτρου

Το γραμμικό στραγγιστήρι φίλτρου συλλέγει το εδαφικό νερό και το οδηγεί εκτός του σώματος του οδοστρώματος. Διακρίνεται σε δύο τύπους:

- Ευρείας διατομής: 300mm έως 600mm
- Στενής διατομής: 150mm έως 200mm

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις το γραμμικό στραγγιστήρι αποτελείται από ένα σωληνωτό αγωγό αποστράγγισης που περιβάλλεται με υλικό φίλτρου. Στην περίπτωση των σωληνωτών αγωγών αποστράγγισης υπάρχει σύνδεση κατά κανόνα με φρεάτια υδροσυλλογής ή σε τάφρο με σκοπό την απομάκρυνση των υδάτων.

Οι διαστάσεις των γραμμικών στραγγιστηρίων φίλτρου καθορίζονται από τις τεχνικές συνθήκες εργασίας και τεχνικές φίλτρου. Η διάμετρος του σωλήνα

αποστράγγισης επιλέγεται ανάλογα με την υπολογιζόμενη ποσότητα νερού. Ωστόσο, η εσωτερική διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από Φ 0,20 m.

Βασικό μειονέκτημα των σωληνωτών αγωγών αποστράγγισης είναι ο κίνδυνος να μαζευτεί «πουρί» και άλλες χημικές κρούστες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν οι σωληνωτοί αγωγοί αποστράγγισης δεν έχουν μόνιμη ροή με συνέπεια να υπάρχει εναλλαγή αέρα - νερού. Για να αποφευχθεί ανεπάρκεια του αγωγού λόγω έμφραξης από το «πουρί» πρέπει να εκλέγονται μεγαλύτερες διαμέτροι από αυτές που προκύπτουν από τον υπολογισμό. Επιπλέον, θα πρέπει να αποφεύγεται απευθείας αερισμός των φρεατίων των στραγγιστικών αγωγών ώστε τα διαλυμένα άλατα να μη καθιζάνουν.

Οι σωληνωτοί αγωγοί αποστράγγισης πρέπει, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επιφάνειες κυκλοφορίας, να υπάρχει η δυνατότητα να ελέγχονται και ενδεχομένως να αντικαθίστανται. Στην περίπτωση που οι στραγγιστικοί αγωγοί τοποθετούνται σε συνεργασία με αγωγούς αποχέτευσης ομβρίων πρέπει η κλίση του πυθμένα του γραμμικού στραγγιστηρίου να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την κλίση του αγωγού αποχέτευσης.

Στην περίπτωση που οι στραγγιστικοί αγωγοί τοποθετούνται ανεξάρτητοι από δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων πρέπει να ισχύουν τα κάτωθι:

- Για λόγους αυτοκαθαρισμού, η ελάχιστη κατά μήκος κλίση αγωγών στραγγιστηρίων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 0,5%.
- Σε δυσχερείς περιπτώσεις, εάν δεν μπορεί να εφαρμοσθεί η ελάχιστη επιτρεπτή κλίση, θα ζητείται η σύμφωνη γνώμη της Υπηρεσίας, πλην όμως σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,3%.

Το υλικό που αποτελούνται οι αγωγοί αποστράγγισης είναι συνήθως από πορώδες σκυρόδεμα και βασίζονται στην εγκεκριμένη ισχύουσα προδιαγραφή, διάτρητοι πρεσσαριστοί σωλήνες στραγγιστηρίων από σκυρόδεμα ελάχιστης κατηγορίας C16/20 (συνήθους αντοχής), ή σωλήνες από πλαστικό. Σε περίπτωση όπου υπάρχει φόβος να μαζευτεί «πουρί» είναι προτιμότερη η χρήση σωλήνων με λείες παρειές.

Η τοποθέτηση των σωλήνων αποστράγγισης θα πρέπει να είναι πάνω σε κατάλληλο προστατευτικό γεώφασμα για να εμποδίζεται η διείσδυση ιλύος από το περιβάλλον έδαφος. Επιπλέον οι σωλήνες αποστράγγισης θα πρέπει να περιβάλλονται τελείως η μερικώς από υλικό ευσταθούς φίλτρου.

Στην περίπτωση που κατασκευάζεται γραμμικό στραγγιστήρι φίλτρου στενής διατομής, εάν ο σωληνωτός αγωγός δεν προστατεύεται με κατάλληλο προστατευτικό γεώφασμα τότε το υλικό φίλτρου θα πρέπει να περικλείεται και να προστατεύεται με κατάλληλο προστατευτικό γεώφασμα παρακράτησης λεπτόκοκκων υλικών.

Στην περίπτωση των διάτρητων σωλήνων αποστράγγισης από σκυρόδεμα με σχετικώς μεγάλα στρογγυλά ή επιμήκη ανοίγματα περιβάλλονται με φίλτρο περισσοτέρων στρώσεων. Το ελάχιστο πάχος της κάθε μίας στρώσης φίλτρου δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 0,20 m. Ως δεύτερη βαθμίδα φίλτρου (σε φίλτρα δύο στρώσεων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο από γεώφασμα, σε επαφή με το συνεκτικό έδαφος. Σωλήνες αποστράγγισης από πορώδες σκυρόδεμα (που κατασκευάζονται

σύμφωνα με εγκεκριμένη ισχύουσα προδιαγραφή) περιβάλλονται με φίλτρο μιας στρώσης.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα να διεισδύει στο υπέδαφος το νερό που συλλέγεται σε ένα γραμμικό στραγγιστήριο, τότε θα πρέπει ο πυθμένας του γραμμικού στραγγιστηρίου να στεγανοποιείται με στεγανωτική ταινία από πλαστική μεμβράνη, η οποία να φθάνει σε κατάλληλο ύψος των τοιχωμάτων της τάφρου, όσο είναι αναγκαίο από τις τοπικές συνθήκες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα γραμμικά στραγγιστήρια πρέπει, στην ανώτερη περιοχή τους, να σκεπάζονται από μία στρώση πάχους 0,20 m. από συνεκτικό επιφανειακό χώμα, για να εμποδισθεί η διείσδυση του επιφανειακού νερού. Επιπλέον, στην περίπτωση που συγκεντρώνεται από το γραμμικό στραγγιστήριο επιβλαβές νερό, θα πρέπει να γίνεται έρευνα για την ικανότητα των σωλήνων αποστράγγισης από σκυρόδεμα να αντέξουν στην προσβολή του βλαβερού νερού. Γραμμικά στραγγιστήρια θα πρέπει να μπορούν να επιτηρούνται, για αυτό είναι ανάγκη η κατασκευή φρεατίων ελέγχου.

4.2.2.2. Γραμμικά πλαστικά στραγγιστήρια (fin drain)

Τα γραμμικά πλαστικά στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό με τα γραμμικά στραγγιστήρια φίλτρου στενής διατομής. Τα γραμμικά πλαστικά στραγγιστήρια αποτελούνται από δύο γεωφάσματα, κατάλληλης διαπερατότητας, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται είτε διαπερατή μάζα πλαστικών ινών είτε πλαστικών μακρύσωμων «ταπών», είτε άλλων διαπερατών υλικών με επαρκή παροχετευτική ικανότητα.

Στο κάτω μέρος του γραμμικού πλαστικού στραγγιστηρίου τοποθετείται πλαστικός αγωγός με διάμετρο η οποία κυμαίνεται από 100mm έως 150mm. Επιπλέον, ο πλαστικός αγωγός περιβάλλεται από τα γεωφάσματα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αρκετά συχνά διότι είναι μια κατασκευή γρήγορη και αρκετά αποτελεσματική. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια η κατασκευή αυτή κυκλοφορεί στο εμπόριο και ως προκατασκευασμένο υλικό, δηλαδή τα γεωφάσματα και η μάζα των πλαστικών ινών ή των πλαστικών ταπών επικολλούνται στο εργοστάσιο και το προϊόν διατίθεται ως ενιαίο ρολό.

Τα πλαστικά στραγγιστήρια πλεονεκτούν των στραγγιστηρίων φίλτρου στενής διατομής για τους εξής λόγους:

- i) Το πλάτος του σκάμματος είναι κατά πολύ μικρότερο
- ii) Δεν απαιτείται κοκκώδες υλικό για την πλήρωση του σκάμματος, χρησιμοποιείται το ίδιο εδαφικό υλικό
- iii) Μηδενίζεται το κόστος μεταφοράς για την απομάκρυνση του υλικού εκσκαφής
- iv) Δεν χρειάζεται η τοποθέτηση διάτρητου σωλήνα στον πυθμένα του σκάμματος, εφ' όσον χρησιμοποιηθεί προκατασκευασμένου τύπου στραγγιστήρι
- v) Η ταχύτητα κατασκευής είναι αισθητά μεγαλύτερη
- vi) Η απομάκρυνση του ύδατος είναι ταχύτερη
- vii) Λειτουργεί αποτελεσματικά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με τα γραμμικά στραγγιστήρια που δεν περιβάλλονται από προστατευτικό γεωφάσμα.

Το προκατασκευασμένο υλικό τοποθετείται σε κατακόρυφα και εφαπτόμενο της μίας εκ των δύο πλευρών του σκάμματος, αγκύρωση αυτού δεν χρειάζεται. Ωστόσο, για τη διατήρηση της κατακόρυφου θέσης του στραγγιστηρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσωρινά ξύλινα ή μεταλλικά υποστηρίγματα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαμήκης κλίση του στραγγιστηρίου θα είναι ίδια με τη διαμήκη κλίση του οδοστρώματος και σε καμία περίπτωση μικρότερη του 1 %. Σε δυσμενείς θέσεις, μικρότερη της ελαχίστης επιτρεπτής κλίσης μπορεί να επιτραπεί μόνο κατόπιν εγκρίσεως της Υπηρεσίας. Επιπλέον, σε κάθε αλλαγή της διαμήκους κλίσης, τοποθετούνται κατάλληλα εξαρτήματα απαγωγής του ύδατος, στα οποία προσαρμόζεται πλαστικός σωλήνας για την περαιτέρω απομάκρυνση και διευθέτηση του ύδατος. Η ένωση δύο κομματιών θα γίνεται επιμελώς και σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή του υλικού. Το βάθος του πλαστικού στραγγιστηρίου θα είναι ως καθορίζεται από στην εγκεκριμένη ισχύουσα προδιαγραφή.

Όσο αφορά την διάνοιξη του σκάμματος, για ταχύτερη κατασκευή, γίνεται με ειδικά αυτοκινούμενα μηχανήματα. Τα μηχανήματα αυτά πλην της διάνοιξης του σκάμματος έχουν τη δυνατότητα και της ταυτόχρονης τοποθέτησης του υλικού. Το υλικό πλήρωσης του σκάμματος είναι από το ίδιο εδαφικό υλικό που προήλθε από την εκσκαφή. Συμπύκνωση του υλικού πλήρωσης του σκάμματος είναι αναγκαία σε βαθμό που να μην παρουσιαστεί μελλοντική καθίζηση.

Βασικό μειονέκτημα των πλαστικών στραγγιστηρίων είναι ότι κατά την τοποθέτηση τους τα υλικά με τα οποία κατασκευάζονται δεν θα πρέπει να παραμένουν στο φως της μέρας για περισσότερο από 50 ώρες συνολικά. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία δεν επηρεάζονται από υψηλές θερμοκρασίες και το φως του ήλιου, τονίζεται ότι οι προδιαγραφές των υλικών δίνονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προκατασκευασμένου πλαστικού στραγγιστηρίου, ή των μεμονωμένων υλικών που θα συνθέσουν το πλαστικό στραγγιστήρι, μαζί με το όνομα της εταιρείας που παρήγαγε τα υλικά, θα υποβάλλονται από τον ανάδοχο προς την Υπηρεσία για έγκριση. Μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στα γεωϋφάσματα που χρησιμοποιούνται, διότι θα πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Κατάλληλη διαπερατότητα
- Κατάλληλη διάμετρο οπών (πόρων) σε συνδυασμό με τους κόκκους των γειτνιαζόντων εδαφικών υλικών (συνιστάται όχι μικρότερη των 100 μm και όχι μεγαλύτερη από 900 μm, κατά BS 6906, Part 2, ή ASTM D 4751)
- Κατάλληλη αντοχή σε εφελκυσμό κατά τη θραύση (μεγαλύτερη από 5 kN/m, κατά BS 6906, Part 1, ή αντίστοιχη κατά ASTM 4595)
- Κατάλληλη αντοχή σε διάτρηση (μεγαλύτερη του 1,2 kN κατά BS 6906:Part 1, ή ανάλογη κατά DIN 54307)
- Κατάλληλη αντίσταση σε σχίσιμο (μεγαλύτερη από 200 N κατά ASTM 4533-85).

Για το σύνθετο προκατασκευασμένο υλικό θα δίνονται πληροφορίες για τα ακόλουθα:

- Αντοχή σε σύνθλιψη
- Συμπιεστότητα
- Παροχευτική του ικανότητα
- Την αντοχή σε αποκόλληση.

Τα πλαστικά στραγγιστήρια και ιδιαίτερα τα γεωϋφάσματα που το περιβάλλουν θα πρέπει να είναι ανθεκτικά στα ακόλουθα:

- Οξέα
- Αλκαλικά
- Βακτηρίδια
- Υπεριώδη ακτινοβολία.

4.2.2.3. Τάφροι αποστράγγισης

Οι ανοιχτοί τάφροι αποστράγγισης συνήθως κατασκευάζονται για την απομάκρυνση υδάτων από μία στρώση στράγγισης πρανούς. Αυτή η λύση θεωρείται καταλληλότερη σε σχέση με τους αγωγούς αποστράγγισης ιδιαίτερα σε περιπτώσεις οδικών έργων που οι ποσότητες των υδάτων είναι μεγάλες. Επιπλέον προτιμάται όταν πρόκειται για νερό με κινδύνους οξείδωσης.

Οι τάφροι αποστράγγισης χρησιμεύουν για την συλλογή και την απομάκρυνση επιφανειακών υδάτων, έχουν κατά κανόνα ορθογωνική διατομή και τα τοιχώματά τους κατασκευάζονται από διαπερατά υλικά. Οι διαστάσεις της τάφρου προκύπτουν με βάση την απαιτούμενη υδραυλική αποχετευτική ικανότητα και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Σε κάθε περίπτωση όμως το ελάχιστο πλάτος της τάφρου πρέπει να έχει ως ακολούθως 0,60 m για βάθος μέχρι 2,50 m και 0,80 m για βάθος άνω των 2,50 m.

Στην περίπτωση επενδεδυμένων τάφρων αποστράγγισης με πολλαπλά φίλτρα, για λόγους διατάραξης του χείλους των παρειών της τάφρου, η εξωτερική βαθμίδα (στρώση) των φίλτρων πρέπει να κατασκευάζεται με ελάχιστο πάχος 0,20 m.

Τονίζεται ότι θα πρέπει να παίρνονται μέτρα εξασφάλισης του πυθμένα της τάφρου από την άνοση με πλάκες σκυροδέματος ή σκύρα και θα πρέπει να εμποδίζεται η διείσδυση κόκκων από την περιβάλλουσα τη διατομή της τάφρου στρώση φίλτρου με χρήση καταλλήλου γεωϋφάσματος.

Ωστόσο, οι τάφροι αποστράγγισης κατασκευάζονται επίσης σε περίπτωση κατασκευής σιδηροδρομικών γραμμών. Στις αυτές τις περιπτώσεις οι τάφροι αποστράγγισης καλύπτονται με πλάκες οι οποίες έχουν οπές ώστε να είναι δυνατή η βατότητα από το προσωπικό επιθεώρησης της γραμμής και επιπλέον να εξασφαλίζεται και η συλλογή του επιφανειακού νερού.

4.2.2.4. Στρώσεις αποστράγγισης

Οι στρώσεις αποστράγγισης διαχωρίζονται εξής περιπτώσεις:

- Στρώσεις στράγγισης οδοστρώματος
- Στρώση αποστράγγισης πρανούς
- Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης

- Στρώση βαθιάς αποστράγγισης

Στην συνέχεια του εδαφίου θα αναλυθούν οι προαναφερόμενες περιπτώσεις με σκοπό την ανάλυση της χρησιμότητας τους καθώς επίσης και τον τρόπο κατασκευής του.

❖ *Στρώσεις στράγγισης οδοστρώματος (Σ.Σ.Ο.)*

Οι Στρώσεις Στράγγισης Οδοστρώματος (ΣΣΟ) είναι φίλτρα, τα οποία κατασκευάζονται στο κάτω μέρος του οδοστρώματος και καλύπτουν όλο το πλάτος της οδού ακόμα και τα ερείσματα που μπορεί να υπάρχουν. Η χρησιμότητάς τους είναι στην απαγωγή του ύδατος είτε στα γραμμικά στραγγιστήρια είτε σε άλλον αποδέκτη με σκοπό:

- Την προστασία των οδοστρωμάτων από τα όμβρια ύδατα που εισρέουν διαμέσου των ρωγμών του ασφαλτοτάπητα και διαφορετικά θα εγκλωβίζοντο και με τους κύκλους πήξης - τήξης λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών θα προκαλούσαν φθορές στα οδοστρώματα. Στην περίπτωση αυτή η υπόψη στρώση ονομάζεται Στρώση Αντιπαγετικής Προστασίας (ΣΑΠ).
- Την ταπείνωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την άνω επιφάνεια της Στρώσης Έδρασης Οδοστρώματος (ΣΕΟ), ο οποίος λόγω της υδροστατικής άνωσης που θα ασκούσε στο οδόστρωμα, θα προκαλούσε τη θραύση του. Στην περίπτωση αυτή η στρώση αυτή ονομάζεται Στρώση Αποστράγγισης της ΣΕΟ. Σε περίπτωση που ο η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται περιοδικά ή μόνιμα πάνω από την ΣΕΟ, η κατασκευή της στρώσης αποστράγγισης της ΣΕΟ επιβάλλεται ανεξάρτητα από την ανάγκη ή μη κατασκευής ΣΑΠ.

Οι Στρώσεις Στράγγισης Οδοστρώματος θα πρέπει να έχουν ελάχιστη εγκάρσια κλίση 4%. Ωστόσο, η εγκάρσια κλίση των στρώσεων στράγγισης οδοστρωμάτων δύναται να διαμορφωθεί είτε μονοκλινής είτε αμφικλινής. Τονίζοντας ότι στα τμήματα μεταβολής της κλίσης από αμφικλινή σε μονοκλινή, η προκύπτουσα ακμή των τεμνόντων επιφανειών κείται λοξά ως προς τον άξονα της οδού. Κατά μήκος του άξονα της οδού, οι στρώσεις στράγγισης οδοστρώματος, εφόσον παύουν να είναι απαραίτητες, καταλήγουν υπό μορφή σφήνας υπό κατά μήκος κλίση 20% και επί μήκους 10 m περίπου.

Για το υλικό κατασκευής των Στρώσεων Στράγγισης Οδοστρώματος πρέπει να γίνεται έλεγχος για την ευστάθεια φίλτρου του υλικού της σε σχέση με την υπερκείμενη στρώση (υπόβαση ή εξυγιαντική στρώση) και την υποκείμενη στρώση του εδαφικού υλικού. Θα πρέπει να ισχύουν τα κριτήρια σταθερότητας φίλτρου της στρώσης στράγγισης οδοστρώματος, τόσο σε σχέση με την υπερκείμενη όσο και με την υποκείμενη στρώση, και σύμφωνα με αυτά να γίνεται η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισής της.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η στρώση αποστράγγισης της ΣΕΟ διαμορφώνεται ενσωματούμενη στο άνω τμήμα της ΣΕΟ και κάτω από την ΣΑΠ ή, σε περίπτωση απουσίας ΣΑΠ, κάτω από την υπόβαση. Το ελάχιστο πάχος της στρώσης αποστράγγισης της ΣΕΟ ορίζεται σε 0,50 m, το οποίο, στην περίπτωση που προκύψει ανάγκη κατασκευής ΣΑΠ, δεν επιτρέπεται να συνυπολογίζεται στο πάχος της ΣΑΠ. Το ελάχιστο πάχος της στρώσης αποστράγγισης της ΣΕΟ ορίζεται σε 0,50 m, το οποίο, στην περίπτωση που προκύψει ανάγκη κατασκευής ΣΑΠ, δεν επιτρέπεται να συνυπολογίζεται στο πάχος της ΣΑΠ.

α/α	Κοκκομετρική σύνθεση υπεδάφους σε βάθος 0,70 m κάτω από την άνω επιφάνεια του οδοστρώματος		Ελάχιστο βάθος της άνω επιφάνειας της ΣΕΟ μετρούμενο από την άνω επιφάνεια του οδοστρώματος [m]		
	Ποσοστό (κατά βάρος) κυρίου είδους κόκκων < 0,02mm επί του συνόλου του δείγματος		Επί ξηρού υπεδάφους		Επί υγρού υπεδάφους
	για U > 15	για U < 5	Επιχώματα ύψους > 2 m	Επιχώματα ύψους < 2 m και ορύγματα	
1	0% - 3%	0% - 10%	Δεν απαιτείται ΣΑΠ		
2	3% - 6%	--	0,50	0,60	0,70
3	> 6%	> 10%	0,60	0,70	0,70

Πίνακας 23: Ελάχιστες απαιτήσεις πάχους της ΣΑΠ

❖ *Στρώση αποστράγγισης πρανούς*

Η στρώση αποστράγγισης πρανούς παραλαμβάνει το νερό από την υδροφόρο εδαφική στρώση και δια του πρανούς το οδηγεί παραπέρα χωρίς να προκαλούνται φθορές, αυτός είναι και ο τρόπος που αποφεύγονται οι διαβρώσεις στο πρανές. Η κλίση του πρανούς καθορίζεται σε συνάρτηση με την αντοχή σε διάτμηση του υλικού του φίλτρου και της πίεσης της ροής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος του σώματος του φίλτρου εξαρτάται από τα εξής:

- Τοπικά δεδομένα
- Απαιτήσεις ευστάθειας του πρανούς
- Ποσότητες του νερού που θα πρέπει να απομακρύνεται με τη στρώση αποστράγγισης.

Η στρώση αποστράγγισης, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, κατασκευάζεται ως μονοβάθμιο ή πολυβάθμιο φίλτρο. Για πρανή ύψους μέχρι 6 m, το συνολικό πάχος της στρώσης αποστράγγισης πρανούς δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 0,60 m στη στέψη και 1,00 m στον πόδα του πρανούς. Για μεγαλύτερα ύψη πρανών, το απαιτούμενο πάχος της στρώσης αποστράγγισης πρανούς αποτελεί αντικείμενο ειδικής εδαφοτεχνικής μελέτης. Η διάμετρος του σωλήνα αποστράγγισης, στον οποίο καταλήγει το φίλτρο του πρανούς, πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,30 m.

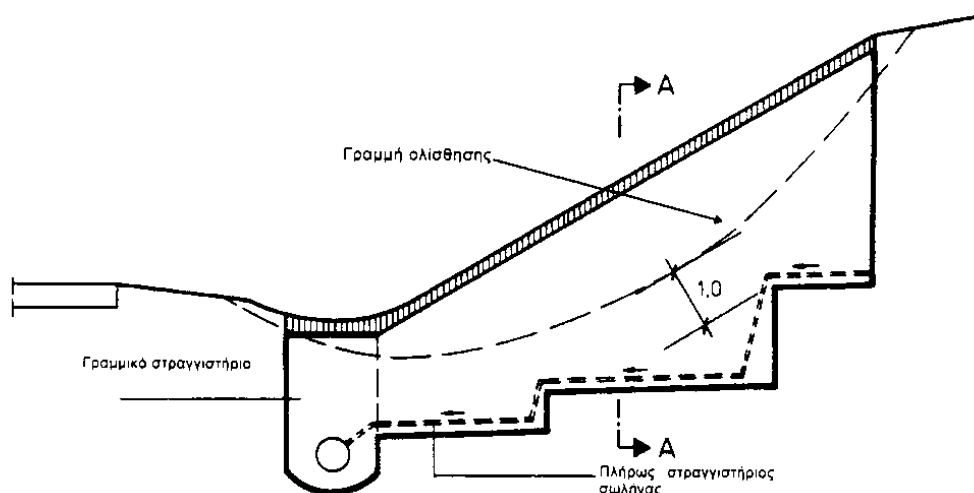
Επιπλέον, η στρώση αποστράγγισης πρανούς πρέπει να προστατεύεται από τη διείδυση επιφανειακού νερού με κάλυψη με συνεκτικό έδαφος που θα πρέπει να σταθεροποιείται με σπορά κατάλληλων φυτών ή να καλύπτεται από μια στρώση συνεκτικού υλικού πάχους τουλάχιστον 0,20 m.

❖ Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης

Το προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης είναι μία κατακόρυφη στρώση αποστράγγισης, η οποία ως επί το πλείστον κατασκευάζεται κάθετα προς την κεκλιμένη επιφάνεια του πρανού, με σκοπό να αυξήσει την ευστάθεια του πρανού με ελάττωση της πίεσης του νερού. Το προστατευτικό πέτασμα μπορεί να κατασκευάζεται από ασυμπίεστα υλικά ή συμπαγή οπότε τότε λειτουργεί επιπρόσθετα και ως αντιστήριξη.

Η εκλογή του υλικού θα πρέπει να γίνεται λαμβανομένης υπόψη της πιθανότητας να σχηματισθεί «πουρί». Όταν έχουν ήδη γίνει κατολισθήσεις, το προστατευτικό πέτασμα θα πρέπει να φθάνει σε βάθος τουλάχιστον 1,00 m κάτω από την επιφάνεια της ολίσθησης. Η απόσταση μεταξύ των προστατευτικών πετασμάτων κυμαίνεται, σύμφωνα με την εμπειρία, μεταξύ 10 και 20 m, θα πρέπει όμως να υποστηρίζεται και από σχετικούς υπολογισμούς.

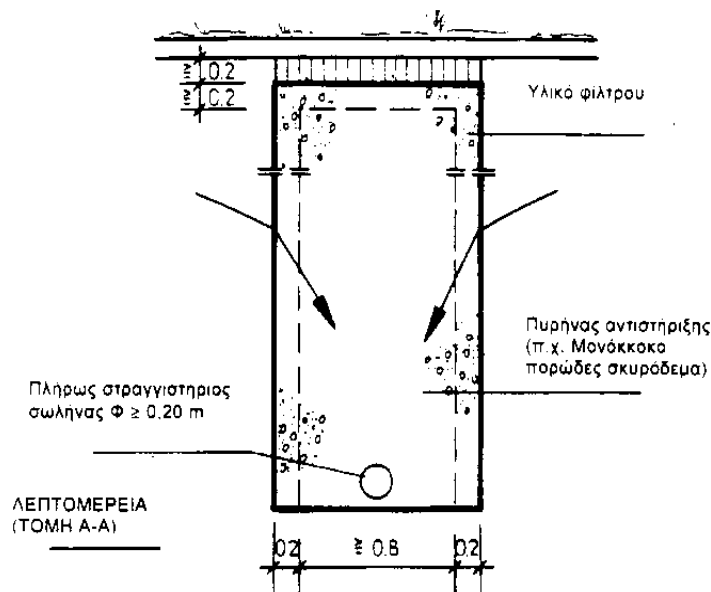
Το προστατευτικό πέτασμα κατασκευάζεται γενικά με ένα πλήρως στραγγιστήριο σωλήνα ελάχιστης διαμέτρου $\Phi 0,20$ m. που τοποθετείται στο κατώτερο μέρος αυτού. Το ελάχιστο πάχος του προστατευτικού πετάσματος ανέρχεται σε 1,20 m.



Σχήμα 47: Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης.

Όσο αφορά το συλλεγόμενο νερό οδηγείται παραπέρα, με ένα γραμμικό στραγγιστήριο προς την εκβολή. Τα προστατευτικά πετάσματα αποστράγγισης πρέπει να στεγανοποιούνται από την εισροή επιφανειακού νερού με την κάλυψη π.χ. μιας στρώσης συνεκτικού υλικού ελάχιστου πάχους 0,20 m.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για να μη διαταραχθεί η ευστάθεια κοντά σε πρανή μεγάλου ύψους δεν θα πρέπει το βάθος του πετάσματος να είναι μεγαλύτερο των 2.00 m και τέτοια έργα πρέπει να προτείνονται μετά από μελέτη ευστάθειας των πρανών.

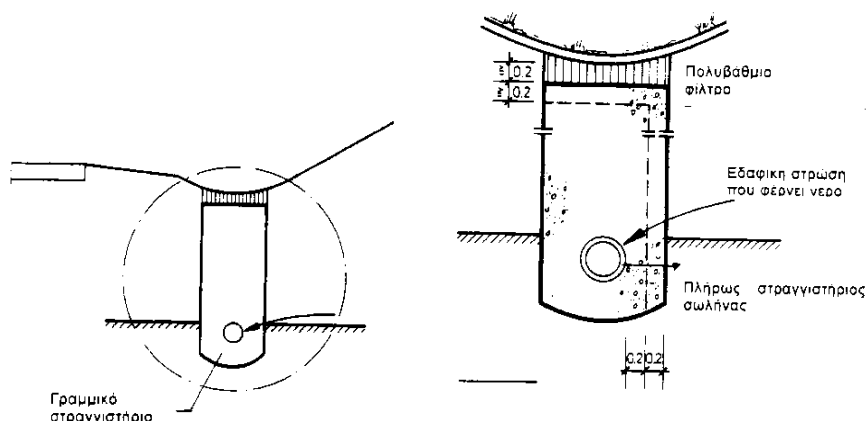


Σχήμα 48: Προστατευτικό πέτασμα αποστράγγισης.

❖ *Στρώση βαθιάς αποστράγγισης*

Η στρώση βαθιάς αποστράγγισης εξασφαλίζει το υπέδαφος του σώματος μιας οδού από την πλευρική ροή νερού υδροφόρου εδαφικής στρώσης ή αποστράγγισης. Υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί παράλληλα ή κάθετα προς το πρηνές ορύγματος και χρησιμεύει, κατά κύριο λόγο, για την αποστράγγιση βαθύτερων στρώσεων.

Οι διαστάσεις που τοποθετείται μια στρώση αποστράγγισης κανονίζεται ανάλογα με το βάθος της υδροφόρου εδαφικής στρώσης και της ποσότητας του νερού. Επιπλέον, η στρώση βαθιάς αποστράγγισης συνδυάζεται κατά κανόνα με ένα γραμμικό στραγγιστήριο, το οποίο οδηγεί το νερό που συλλέγεται παραπέρα προς εκβολή.

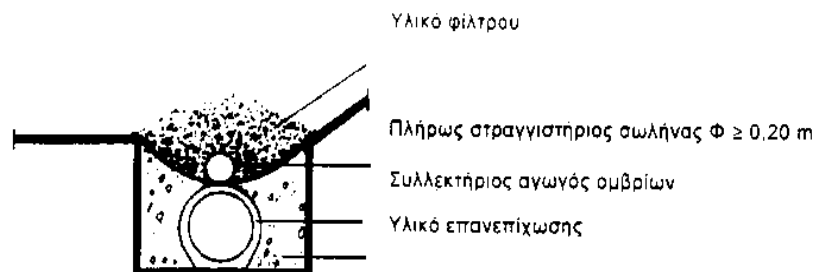


Σχήμα 49: Στρώση βαθιάς αποστράγγισης και η λεπτομέρεια αυτής.

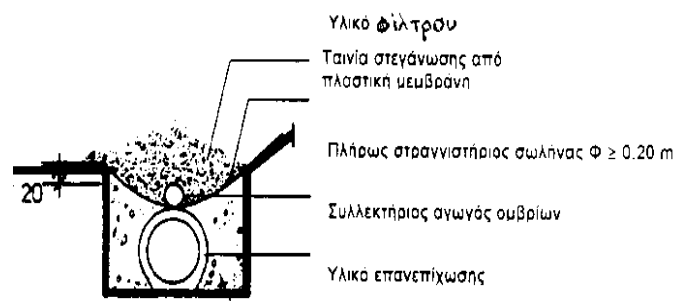
Το ελάχιστο πάχος της στρώσης βαθιάς αποστράγγισης ανέρχεται, σε περίπτωση πολυβάθμιου σώματος φίλτρου και με γραμμικό στραγγιστήριο, σε 1,00 m. Η ελάχιστη διάμετρος του σωλήνα αποστράγγισης του γραμμικού στραγγιστηρίου είναι ίση προς $\Phi 0,30$ m. Στο πάνω μέρος της η στρώση βαθιάς αποστράγγισης σκεπάζεται με μία στρώση συνεκτικού εδάφους ελάχιστου πάχους 0,20 m., για να εμποδισθεί εκτεταμένη διείσδυση επιφανειακού νερού.

4.2.2.5. Αγωγοί Huckpack

Οι αγωγοί Huckpack αποτελούνται από ένα συλλεκτήριο αγωγό ομβρίων με ένα αγωγό αποστράγγισης, ο οποίος επικαλύπτεται με υλικό φίλτρου. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση μη συνεκτικού υλικού επανεπίχωσης, για την σύλληψη του νερού αποστράγγισης θα πρέπει να κατασκευάζεται πάνω από το συλλεκτήριο αγωγό μια ταινία από πλαστική μεμβράνη στεγανοποίησης, επί της οποίας θα τοποθετείται ο αγωγός αποστράγγισης. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεμβράνη στεγανοποίησης δεν είναι αναγκαία όταν χρησιμοποιείται συνεκτικό υλικό επανεπίχωσης της τάφρου του συλλεκτήριου αγωγού. Όμως αντί για στεγανωτική πλαστική μεμβράνη είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται υπόστρωμα σκυροδέματος κατηγορίας C8/10, με κατάλληλη διαμόρφωση της άνω επιφάνειας αυτού, ώστε να συλλέγονται προς το στραγγιστήριο τα νερά αποστράγγισης.



Σχήμα 50: Αγωγός Huckpack (επανεπίχωση με συνεκτικό υλικό)



Σχήμα 51: Αγωγός Huckpack (επανεπίχωση με μη συνεκτικό υλικό)

4.2.2.6. Μερικώς διάτρητοι σωληνωτοί αγωγοί

Μερικώς διάτρητοι σωληνωτοί αγωγοί αναλαμβάνουν τη λειτουργία απαγωγής των ομβρίων και παράλληλα τη λειτουργία της συλλογής των νερών αποστράγγισης. Στις περιπτώσεις αυτές οι αγωγοί επανεπιχώνονται με συνεκτικό υλικό μέχρι τη στάθμη που αρχίζουν οι οπές στράγγισης, πάνω δε από τη στάθμη αυτή κατασκευάζεται η επικάλυψη του αγωγού με υλικό φίλτρου.



Σχήμα 52: Μερικώς διάτρητος αγωγός (Επανεπίχωση με συνεκτικό υλικό)

5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΙΟΛΟΓΙΑ

5.1. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η : ΘΛΙΨΗ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

5.1.1. Γενικά

Η περίπτωση που μελετάται αφορά το κτίριο ενός σχολείου (Εικόνα 21 και 22) και είναι τυπική περίπτωση ανύψωσης πασσάλου. Το φορτίο του πασσάλου είναι μεγάλο, η κατασκευή γενικώς καλύπτει τις προδιαγραφές, ο σχεδιασμός είναι κατάλληλος, και η κατασκευή υπερυψωμένης θεμελίωσης δίνει τη δυνατότητα να μην υποστεί ζημιές εξ' αιτίας της υπερφόρτωσης της πλακάς. Εν τούτοις προκλήθηκε ζημία στο κτίριο λόγω ανύψωσης, πριν να ληφθούν μέτρα αποκατάστασης της, η οποία ήταν τόσο σοβαρή που για λόγους ασφαλείας έγινε εκκένωση του κτιρίου.

5.1.2. Ιστορία

Το σχολείο περατώθηκε το 1962. Θεμελιώνεται με πασσάλους σε βράχο, αφού έγινε διάτρηση του. Το βραχώδες υπόστρωμα αποτελείται κατά κύριο λόγο από αργιλόλιθο και ψαμμικό σχιστόλιθο που βρίσκεται σε βάθος 4 έως 23 ποδών (1,22m έως 7,01m) κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι πάσσαλοι σχεδιάστηκαν για να φέρουν τελική πίεση 20000psf (= 957.6 kPa) και επιφανειακή τριβή που εκτιμάται στα 2000psf (= 95.76 kPa). Οι πάσσαλοι ήταν επίσης σχεδιασμένοι με ελάχιστο ίδιο βάρος στα 15000psf (=718.2 kPa). Οι πάσσαλοι έπρεπε να εισχωρήσουν στο σχιστολιθικό βράχο τουλάχιστον 4 πόδια (=1,22m) και μόνο η επιφανειακή τριβή του βράχου έπρεπε να θεωρηθεί. Το σύστημα σχεδιασμού πασσάλου θεωρήθηκε άρτιο ενόψει των περιορισμένων γνώσεων για τον σχεδιασμό πασσάλων το 1960.

Σύντομα μετά την αποπεράτωση, παρατηρήθηκε θλίψη του κτιρίου. Τον Ιούνιο του 1964, ανατέθηκε στον εργολάβο να επισκευάσει την υπάρχουσα ζημιά. Τον Νοέμβριο του 1964, οι πάσσαλοι βρέθηκαν να είναι σε καλή κατάσταση αλλά το σύστημα αποστράγγισης της επιφάνειας δεν ήταν κατάλληλα συντηρημένο και για αυτό το λόγο νερό είχε εισχωρήσει κάτω από το κτίριο προκαλώντας διόγκωση του εδάφους.

Τον Ιούλιο του 1966, διαφορές κολώνες ανυψώθηκαν στο επίπεδο του κτιρίου και σιδηροδοκοί τοποθετήθηκαν για υποστήριξη. Τον Φεβρουάριο του 1970, ως προληπτικό μέτρο ασφαλείας έπρεπε να αφαιρεθεί ένα προκατασκευασμένο πάνελ πάνω από μια πόρτα. Τον Ιούλιο και το Δεκέμβρη του 1970 επιδιορθώσεις έγιναν σε διάφορους πασσάλους. Τον Ιούνιο του 1971 έγιναν επιπλέον επισκευές σε αρκετές εσωτερικές κολώνες. Μια επιθεώρηση τον Ιούλιο του 1971 έδειξε ότι η κίνηση ακόμα συνεχιζόταν. Ο Chen το 1972 είχε

προσληφθεί για να κάνει μια πλήρη ανεξάρτητη έρευνα σχετικά με την αιτία της ρηγμάτωσης και να καθορίσει τα αναγκαία διορθωτικά μέτρα.

Το σχολείο αποτελείται από τρία επίπεδα. Το κατώτερο επίπεδο χαρακτηρίζεται ως Πτέρυγα Γ. Αυτό το επίπεδο έχει ένα χαμηλότερο όροφο και έναν όροφο ακόμη. Το μεσαίο επίπεδο, που ορίζεται ως Πτέρυγα Β Βόρεια, και το ανώτερο επίπεδο, που ορίζεται ως Πτέρυγα Β Νότια, είναι και τα δυο ένα πάτωμα ψηλότερα χωρίς κάτω όροφο. Το γυμνάσιο, η καφετέρια και η αίθουσα μουσικής είναι όλα ένα πάτωμα με ψηλή οροφή και ορίστηκε ως Πτέρυγα Δ. Το βόρειο τμήμα της Πτέρυγας Δ είναι υπόγειο όπου βρίσκονται τα αποδυτήρια. Αυτό είναι το μόνο τμήμα ολόκληρου του κτιρίου όπου για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε μπετό καθαριότητας (πλάκα επί του εδάφους). Το υπόλοιπο του κτιρίου είναι κατασκευή τύπου υπερυψωμένης θεμελίωσης.



Εικόνα 21: Σχολείο Πτέρυγα Β : Εξωτερική όψη του σχολείου υπό μελέτη.
[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

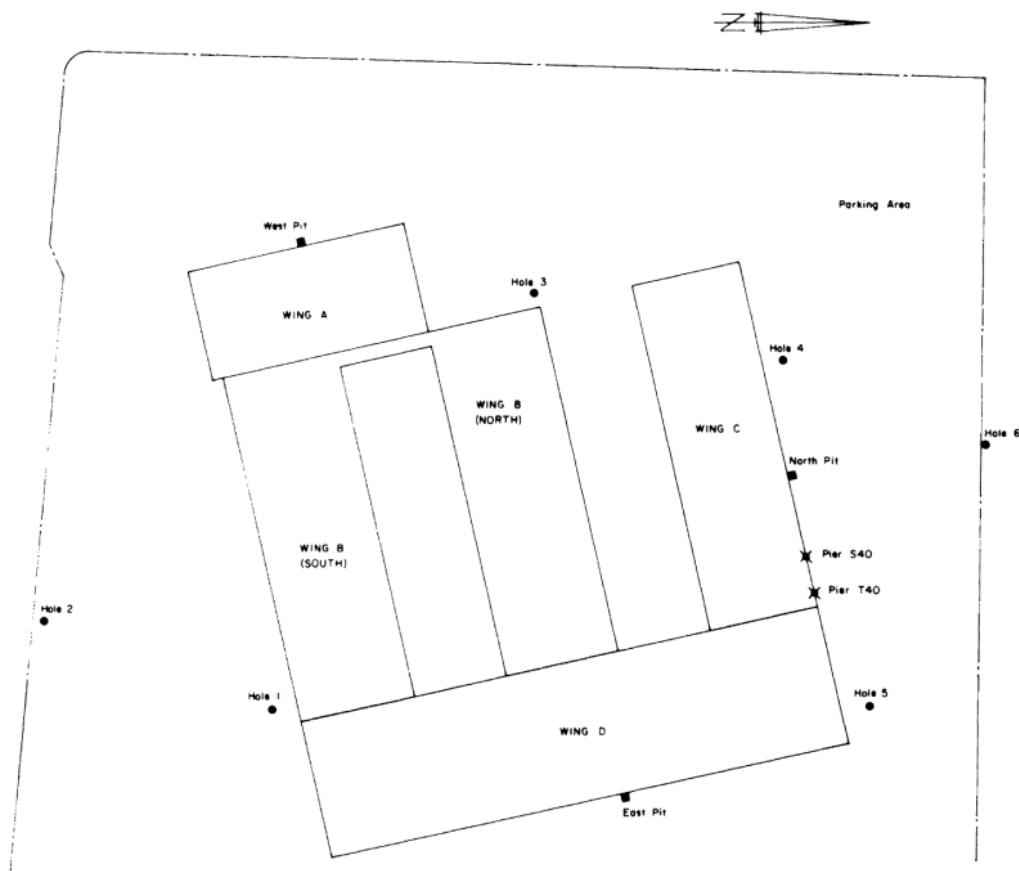


Εικόνα 22: Σχολείο Πτέρυγα Γ : Εξωτερική όψη του σχολείου υπό μελέτη.
[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Η Πτέρυγα Α βρίσκεται στην δυτική πλευρά του κτιρίου και καταλαμβάνεται από μια βιβλιοθήκη και ένα κτίριο διοίκησης. Η επισκευή στην Πτέρυγα Γ άρχισε το 1973 και ολοκληρώθηκε το 1974. Οι διάφορες πτέρυγες φαίνονται στο Σχήμα 53.

Τα περισσότερα διορθωτικά μέτρα που ελήφθησαν κατά τα τελευταία 10 χρόνια επικεντρώθηκαν στην Πτέρυγα Γ. Στο χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης κάτω από την Πτέρυγα Γ, πολλά τσιμεντένια βάθρα απομακρύνθηκαν και αντικαταστάθηκαν με χαλύβδινες δοκούς τύπου Η. Η εικόνα 23 δείχνει ότι τα τσιμεντένια βάθρα συνεθλίβησαν από την δύναμη ανύψωσης των πασσάλων με τον ίδιο τρόπο όπως συνθλίβονταν τα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος στην μηχανή δοκιμής θλίψης (πρέσα). Κατά μήκος του βόρειου τοίχου στο χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης, το νερό διαπότισε ελεύθερα τον κενό χώρο μέσω της επίχωσης. Νερό εισερχόταν κάτω από την πεδילוδοκό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην βορειοδυτική γωνία, βρέθηκαν αποδείξεις ότι το νερό εισέρευσε ελεύθερα και έσκαψε το έδαφος στο χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης σχηματίζοντας αυλάκια. Στην Πτέρυγα Β, τόσο βόρεια όσο και νότια, η επιφάνεια του εδάφους ήταν σχετικά ξηρή, αλλά υπήρξαν ενδείξεις πως το έδαφος είχε βραχεί στο παρελθόν λόγω της διείσδυσης των επιφανειακών υδάτων.

Το χαμηλότερο επίπεδο κατασκευών περιορίζεται στην Πτέρυγα Γ. Το ανατολικό τοίχος του εργαστηρίου εμφάνισε σοβαρή μετακίνηση. Τα δωμάτια τεχνών και χειροτεχνιών έδειξαν επίσης πολλές περιοχές με εκτεταμένες ζημιές. Απροσδόκητα, το τμήμα με το μπετό καθαριότητας των αποδυτηρίων δεν έδειξε σχεδόν καμία μετακίνηση των θεμελίων.



Σχήμα 53: Κάτοψη του σχολείου υπό μελέτη.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]



Εικόνα 23: Θλίψη του βάθρου που βρίσκεται πάνω από τον πάσσαλο και κάτω από την κύρια δοκό
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

Στο ανώτερο επίπεδο, πολυάριθμες ρωγμές βρέθηκαν στο εσωτερικό των τοιχωμάτων των Πτερύγων Β και Γ. Σχεδόν κάθε εσωτερικό χώρισμα σε αυτές τις περιοχές ήταν ραγισμένο. Η οροφή είχε απομακρυνθεί από την φέρουσα τοιχοποιία κατά 3 ίντσες ($=0,08 \text{ m} = 7.62 \text{ cm}$) στο βόρειο άκρο του βόρειου-νότιου διαδρόμου κάτω από την Πτέρυγα Δ και το υπόλοιπο του κτιρίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Εξωτερικές ρωγμές βρέθηκαν στις κύριες δοκούς και στην τοιχοποιία, ιδιαίτερα στο βόρειο τείχος της Πτέρυγας Γ. Τριχοειδείς ρωγμές εμφανίστηκαν στις δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος στους χώρους υπερυψωμένης θεμελίωσης, ιδιαίτερα στην Πτέρυγα Γ.

5.1.3. Έρευνα/Μελέτη

Ενδεχόμενη διόγκωση

Έξι τρύπες και δυο λάκκοι δοκιμών ανασκάφηκαν το 1972 στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 53 και λήφθηκαν αδιατάρακτα δείγματα από τις οπές δοκιμών. Δοκιμές διόγκωσης, πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα που ελήφθησαν από τις τρύπες δοκιμών που βρίσκονται στην νότια πλευρά και δυτική πλευρά του κτιρίου, δείχνουν ότι η διόγκωση είναι περίπου 1 με 2 τοις εκατό και ότι η πίεση διόγκωσης είναι περίπου 3000 με 4000 psf

(=143.64077 ~ 191.52104 kPa). Δεδομένου ότι οι οπές δοκιμών διανοίχτηκαν δίπλα στο κτίριο, είναι πιθανό ότι εξ' αιτίας της υπερβολικής υγρασίας, το έδαφος να έχει ήδη διογκωθεί στο μέγιστο όριο του. Επομένως, οι δοκιμές διόγκωσης δεν μπορούν να αποκαλύψουν την αρχική κατάσταση του εδάφους.



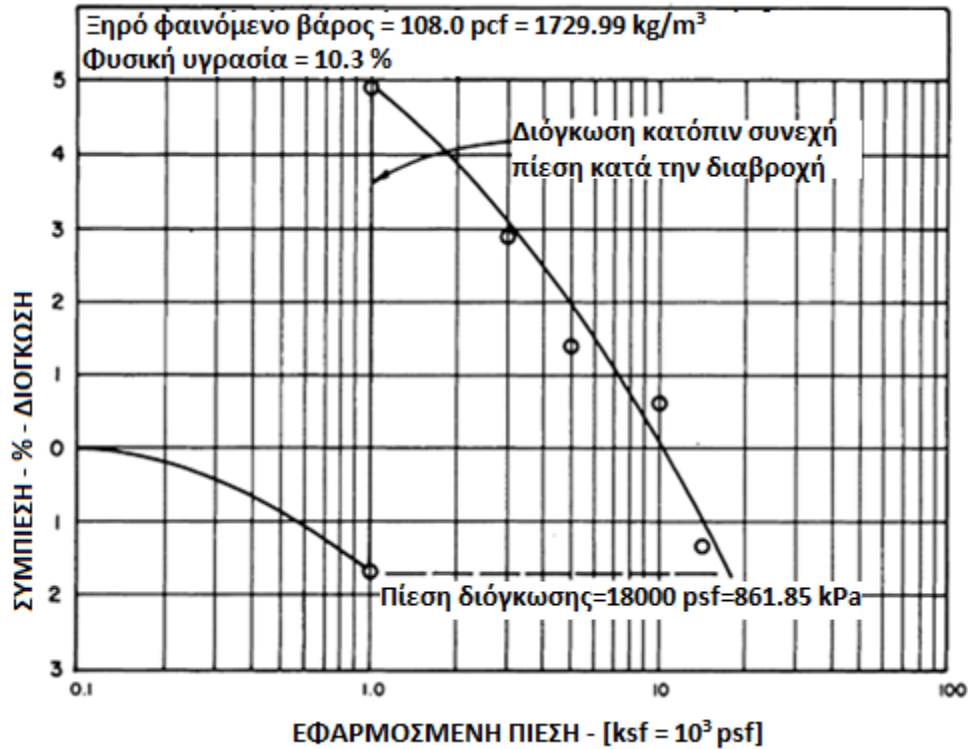
Εικόνα 24: Ρωγμές και διαχωρισμός των τούβλων από την οροφή.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

Οι έλεγχοι διόγκωσης πραγματοποιήθηκαν σε αδιατάρακτα δείγματα που πάρθηκαν από τρύπες ελέγχου που έγιναν εκτός του κτιρίου παρουσιάζουν μια διαφορετική κατάσταση. Η άνω άργιλος διογκώθηκε περίπου 6% με πίεση διόγκωσης περίπου 25,000 psf (=1197.01 kPa).

Η τυπικά ξηρή άργιλος που βρέθηκε κοντά στον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης, μετά από αναζύμωση και ακολούθως μεταγενέστερη ύγρανση, επέδειξε μεγάλη πιθανότητα διόγκωσης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 15. Τα χαρακτηριστικά της διόγκωσης παρουσιάζουν την πραγματική κατάσταση του υπεδάφους την χρονική περίοδο που γινόταν η κατασκευή του κτιρίου.

Θεωρώντας ότι η πίεση διόγκωσης της άνω αργίλου είναι 15,000 psf (=718.20 kPa), ο επόμενος υπολογισμός θα υποδείξει την κατάσταση πίεσης γύρω από τους πασσάλους:

Δεδομένα:	Διάμετρος πασσάλου	=30 in	=0.76 m
	Περιφέρεια πασσάλου	=7,8 ft	=2.38 m
	Επιφάνεια τέλους πασσάλου	=4,9 sq.ft	=0.46 m ²
	Μέρος πασσάλου στον άργιλο	=8,0 ft	=2.44 m
	Μέρος πασσάλου στο βραχώδες υπόστρωμα	=4,0 ft	=1.22 m
	Πίεση διόγκωσης άνω αργίλου	=15,000psf	=718.20 kPa



Διάγραμμα 15: Τυπική δοκιμή διόγκωσης εκτελέστηκε σε παραμορφωμένα δείγματα.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

Μέρος της πίεσης διόγκωσης υπεύθυνο για την ανύψωση $= 15,000 \times 0.15 = 2,250 \text{ psf} = 107.73 \text{ kPa}$

Τριβή εδάφους $= 2,000 \text{ psf} = 95.76 \text{ kPa}$

Συνολική δύναμη ανύψωσης =

$$\begin{aligned} & (\text{Συνολική επιφάνεια πασσάλου εκτεθειμένη στο νερό}) \times (\text{ανύψωση μονάδας}) \\ & = 7.8 \times 2,250 = 140.4 \text{ kips} = 624.53 \text{ kN} \end{aligned}$$

Συνολική παρακρατηθείσα δύναμη =

$$\begin{aligned} & (\text{Συνολική επιφάνεια πασσάλου στο βραχώδες υπόστρωμα}) \times (\text{μονάδα τριβής εδάφους}) \\ & = 7.8 \times 2,000 = 62.4 \text{ kips} = 277.57 \text{ kN} \end{aligned}$$

Καθαρή δύναμη ανύψωσης $= 140.4 - 62.4 = 78.0 \text{ kips} = 346.96 \text{ kN}$

Ανάλυση υγρασίας

Τρεις πάσσαλοι, ο S-40, ο T-20 και ο W-38 εκσκάφτηκαν σε όλο τους το βάθος και πάρθηκαν δείγματα για να δειχθεί η διαφορά στις ιδιότητες του εδάφους σε σχέση με το βάθος και την ακτινική απόσταση από τους πασσάλους. Η περιεκτικότητα σε υγρασία καθορίστηκε από τα δείγματα που πάρθηκαν από τις δοκιμές λάκκου και δοκιμές τρύπας, συγκρίθηκαν με τις τιμές που είχαν παρθεί από δείγματα του 1961. Τα δείγματα που πάρθηκαν το 1972 τόσο γειτονικά στο κτίριο όσο και αρκετά μακριά από αυτό συγκρίθηκαν για να αποφασιστεί η φύση της μετακίνησης της υγρασίας. Τα δεδομένα συνοψίζονται ως εξής:

Χρονιά	Τοποθεσία	Μέση περιεκτικότητα σε νερό %
1961	Έλεγχος τρύπας	17.1
1972	Έλεγχος τρύπας	21.1
1972	Έλεγχος λάκκου	28.1
1972	Κατά μήκος πασσάλου T-40	25.8
1972	Κατά μήκος πασσάλου S-40	28.9
1972	Μακριά από το κτίριο	15.2
	Να γίνει έλεγχος της τρύπας 6	

Πίνακας 24: Βόρειος τοίχος-άνω άργιλος

[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Αυτά τα δεδομένα δεν είναι απόλυτα, αλλά υποδηλώνουν ότι μια σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία έχει εμφανιστεί στο έδαφος δίπλα στο κτίριο και γύρω από τους πασσάλους.

Χρονιά	Τοποθεσία	Μέση περιεκτικότητα σε νερό %
1961	Έλεγχος τρύπας	21.0
1972	Έλεγχος τρύπας	20.3
1972	Κατά μήκος πασσάλου T-40	23.7
1972	Κατά μήκος πασσάλου S-40	23.4
1972	Μακριά από το κτίριο	19.3
	Να γίνει έλεγχος της τρύπας 6	

Πίνακας 25: Βόρειος τοίχος-Βραχώδες υπόστρωμα

[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε νερό του χαμηλότερου βραχώδους υποστρώματος έχει παραμείνει αρκετά ομοιόμορφη στα περασμένα 10 χρόνια, υποδεικνύοντας ότι δεν έχει υγρανθεί ουσιαστικά. Το βραχώδες υπόστρωμα που γειτονεύει άμεσα με τους πασσάλους φαίνεται να έχει αυξηθεί ελάχιστα η περιεκτικότητα σε νερό.

Τοίχος	Χρονιά	Πηγή	Μέση περιεκτικότητα σε νερό %
Δυτικός	1961	Από έλεγχο τρύπας	17.7
Δυτικός	1972	Από έλεγχο τρύπας	21.2
Ανατολικός	1961	Από έλεγχο τρύπας	18.3
Ανατολικός	1972	Από έλεγχο τρύπας	18.9

Πίνακας 26: Ανατολικός και Δυτικός τοίχος-Άνω άργιλος

[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Παρατηρήθηκε μια σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό για τον δυτικό τοίχο, αλλά η αλλαγή κατά μήκος του ανατολικού τοίχου είναι αμελητέα. Το βραχώδες υπόστρωμα φαίνεται να είναι στεγνότερο το 1972 από ότι το 1961.

Για να καθοριστεί αν η υγρασία εισχωρούσε κατά μήκος των τοίχων των πασσάλων ή αν απορροφούταν ομοιόμορφα από την επιφάνεια, τα δείγματα περιεκτικότητας σε νερό πάρθηκαν παρακείμενα στους τοίχους των πασσάλων S-40 και T-40 και επίσης 3 πόδια(=0.914m) μακριά. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πάσσαλος	Μέση περιεκτικότητα σε νερό %			
	Άνω άργιλος		Βραχώδες υπόστρωμα	
	Στον τοίχο του πασσάλου	3 πόδια μακριά	Στον τοίχο του πασσάλου	3 πόδια μακριά
S-40	28.9	20.3	23.4	18.8
T-40	25.8	21.0	23.7	21.3

Πίνακας 27: Μέση περιεκτικότητα σε νερό %
[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Τα δεδομένα συνιστούν ότι η κύρια μετατόπιση υγρασίας είναι άμεσα κατά μήκος της επιφάνειας των πασσάλων.

Ανύψωση πασσάλου

Η αυξανόμενη υγρασία γύρω από τους πασσάλους S-40 και T-40 συνιστούν ότι και οι δύο έχουν υποστεί ανύψωση. Για τον πάσσαλο T-40, είναι πιθανόν ότι επιφανειακό νερό εισχώρησε κατά μήκος του προσώπου αυτού του πασσάλου και μπορεί ακόμα να έχει φτάσει κοντά στο κάτω μέρος του πασσάλου. Συνεπώς, όλος ο πάσσαλος έχει ανασηκωθεί. Για τον πάσσαλο S-40, βρέθηκε ένα οριζόντιο ραγίσμα πλάτους 3/8 in (=0.01m) ακριβώς πάνω από το βραχώδες υπόστρωμα. Από την εκσκαφή του λάκκου γύρω από τον πάσσαλο απαλλάχθηκαν όλες οι ανυψωτικές δυνάμεις στην πλευρά του πασσάλου στην άργιλο, ο πάσσαλος θα έπρεπε σταδιακά να είχε εγκατασταθεί καθώς γινόταν η εκσκαφή του λάκκου και θεωρήθηκε ότι το ραγίσμα έπρεπε να ανοιχθεί περισσότερο από 3/8 in (=0.01m) πριν από την εκσκαφή. Τα ραγίσματα λόγω έντασης που αναπτύχθηκαν στον πάσσαλο εμφανώς υποδηλώνουν ότι τα άνω εδάφη άσκησαν ανυψωτική πίεση στο άνω μέρος του πασσάλου, και το μέρος του πασσάλου στο βραχώδες υπόστρωμα υποστηρίζει τον πάσσαλο.

Η ανυψωτική πίεση που ασκήθηκε στον πάσσαλο εξαρτάται από την πίεση διόγκωσης των περιβαλλόντων εδαφών. Η ανυψωτική δύναμη που ασκήθηκε σε κάθε πάσσαλο μπορεί να έφτασε μέχρι τα 200 kips(=889.64kN). Αυτή η δύναμη είναι ικανή να ραγίσει τον ενισχυμένο σκυρόδεμα που τοποθετήθηκε πάνω από τον πάσσαλο. Επίσης, όταν όλοι οι πάσσαλοι της Πτέρυγας Γ αποκαλύφθηκαν κατά την διάρκεια των διορθωτικών κατασκευών, βρέθηκε ότι τουλάχιστον 5 πάσσαλοι είχαν μία διακριτή διατμητική αστοχία όπως φαίνεται στις Εικόνες 25 και 26.



Εικόνα 25: Αστοχία του πασσάλου από διάτμηση αποτέλεσμα της ανύψωσης.
[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]



Εικόνα 26: Αστοχία του πασσάλου από διάτμηση αποτέλεσμα της ανύψωσης.
[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

5.1.4. Αίτιο της κίνησης

Γενικά, το αίτιο της κίνησης του κτιρίου οφείλεται στην ανύψωση των πασσάλων. Η κίνηση είναι περισσότερο σημαντική στην βόρεια πλευρά κάτω από την Πτέρυγα Γ. Στα δυτικά της Πτέρυγας Δ, όλο το σχολικό κτίριο συνδέεται με πεδילוδοκούς. Η Πτέρυγα Δ χωρίζεται από το υπόλοιπο σχολικό κτίριο με αρμούς διαστολής. Συνεπώς, στο ανατολικό τμήμα του σχολικού κτιρίου η μετακίνηση των θεμελίων διανεμήθηκε μέσω του συστήματος και δεν είναι εμφανής, ενώ στον βορειοανατολικό διάδρομο όλο το σύστημα είναι χωρισμένο. Αυτό εξηγεί γιατί εμφανίστηκε σημαντική μετακίνηση κατά μήκος του βορειοανατολικού διαδρόμου.

Επιπλέον της ανύψωσης των πασσάλων, βρέθηκαν διάφορα άλλα ελαττώματα κατασκευής. Δύο πάσσαλοι στην Πτέρυγα Γ έχουν βυθιστεί στον άνω άργιλο αντί να καρφωθούν μέσα στο βραχώδες υπόστρωμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Οι πάσσαλοι ήταν διαμέτρου 36 in (= 0.91 m) και 3 έως 4 ft (= 0.91 ~ 1.22 m) μήκους, αντί για 12 in (=0.3 m) σε διάμετρο και να έχουν καρφωθεί στο βραχώδες υπόστρωμα όπως είχε σχεδιαστεί. Εφόσον η άνω άργιλος έχει μέγιστη φέρουσα ικανότητα εδάφους περίπου 3,000 psf(= 143.64 kPa), είναι πιθανόν να έχει γίνει καθίζηση αυτών των πασσάλων.



Εικόνα 27: Ακατάλληλη τοποθέτηση πασσάλου. Το μήκος του πασσάλου πρέπει να είναι 20 ft (=6.1 m) και εδρασμένο σε βραχώδες υπόβαθρο. Πραγματικό μήκος μόλις 4 ft (=1.22 m) και εδρασμένο σε άργιλο.

[Πηγή: Fu Hua Chen,1975]

Το συνολικό μήκος του κενού χώρου κάτω από τον βόρειο τοίχο στην Πτέρυγα Γ επιθεωρήθηκε προσεκτικά. Υπήρχε ελάχιστος κενός χώρος. Βρέθηκαν απομεινάρια από χαρτόνι που χρησιμοποιήθηκε για να διαμορφωθεί ο κενός χώρος, αλλά φαίνεται ότι δεν

κατασκευάστηκε σωστά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Είτε ο κενός χώρος δεν διαμορφώθηκε στο καθορισμένο πάχος είτε η ανύψωση του εδάφους έχει κλείσει τον κενό χώρο. Σε κάθε περίπτωση, κατά μήκος του βόρειου τοίχου στην Πτέρυγα Γ, το έδαφος έχει ασκήσει ανυψωτική πίεση στην πεδιλοδοκό που μπορεί να φτάσει μέχρι τα 25,000 psf (= 1197.01 kPa).

Δεν προκλήθηκαν όλες οι φανερές ζημιές στο κτίριο από την μετακίνηση των θεμελίων. Όλα τα διαχωριστικά τοιχώματα στις αίθουσες διδασκαλίας έχουν ραγίσματα. Η μορφή των ραγισμάτων υποδεικνύει ότι οι δοκοί που υποστηρίζουν τις πλάκες εξετράπησαν. Οι ρωγμές στο διαχωριστικό τοίχο είναι τυπική θλίψη οφειλόμενη στην εκτροπή και την πλαστική ροή των μεγάλου ανοίγματος πεδιλοδοκών.



Εικόνα 28: Κενό 4 in (=0.1 m), το οποίο έχει κλείσει τελείως, κάτω από την πεδιλοδοκό.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

Είναι σημαντικό να απομονωθούν τα ελαττώματα της κατασκευής από την μετακίνηση των θεμελίων όταν εξετάζεται ένα ραγισμένο κτίριο έτσι ώστε το αίτιο να είναι καθοριστικό. Σε πολλές περιπτώσεις, τα ελαττώματα κατασκευής και τα ελαττώματα θεμελίων λαμβάνουν θέση στην ίδια κατασκευή.

5.1.5. Διορθωτικές κατασκευές

Εφόσον το αίτιο της μετακίνησης των θεμελίων και η πηγή από όπου εισχώρησε η υγρασία στο έδαφος έδρασης της κατασκευής έχουν καθοριστεί, τα διορθωτικά μέτρα πρέπει να επικεντρωθούν κυρίως στην ανακούφιση της πίεσης ανύψωσης που ασκήθηκε στους πασσάλους και στο να εμποδίσουν να εισέλθει περισσότερο νερό. Τα διορθωτικά μέτρα συνιστώνται στα ακόλουθα:

- Απομάκρυνση όλης της επίχωσης γύρω από το κτίριο και αντικατάσταση συμπυκνωμένης τουλάχιστον 90% της τυπικής πυκνότητας Proctor στην βέλτιστη υγρασία. Η επίχωση κατά μήκος του βόρειου τοίχου της Πτέρυγας Γ πρέπει να γίνει από μη διογκούμενα εδάφη αντί για το αρχικό έδαφος. Η επαρκής συμπύκνωση του επιχωμένου εδάφους είναι πολύ σημαντική για να εξασφαλιστεί ότι κανένα επιφανειακό νερό δεν θα εισχωρήσει μέσω της επίχωσης και μέσα στο έδαφος θεμελίωσης.
- Όλος ο κενός χώρος κάτω από την πεδιλοδοκό πρέπει να αναδιαμορφωθεί για να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρχουν τουλάχιστον 4 in (= 0.1 m) κενού μεταξύ του εδάφους και της πεδιλοδοκού, έτσι ώστε όλο το φορτίο να παραλαμβάνεται από τους πασσάλους. Ταυτόχρονα, πρέπει να δοθεί σημασία για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει μεγάλη παρουσία "μανιταριών" στην κορυφή των πασσάλων (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Τυπική εικόνα που δείχνει την παρουσία «μανιταριού» στην κορυφή του πασσάλου

[Πηγή: <http://www.meacorporation.com/wp-content/uploads/project-bulletin-13.pdf>]

- Στην Πτέρυγα Γ, είναι αναγκαίο να χαλαρώσουν ή να αφαιρεθούν τα εδάφη πάνω από το βραχώδες υπόστρωμα και γύρω από όλους τους πασσάλους. Μια τέτοια

επιχείρηση πρέπει να γίνει με τα χέρια μέσα στο χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης. Το βάθος της χαλάρωσης ή αφαίρεσης εδάφους πρέπει να είναι τουλάχιστον 8 ft (=2.44 m).

- Το σύστημα αποχέτευσης γύρω από το κτίριο πρέπει να βελτιωθεί και πρέπει να επικεντρωθεί στα ακόλουθα:
 - a. Βελτίωση του συστήματος αποχέτευσης στον χώρο της αυλής. Αφαίρεση του ασφάλτινου πεζοδρομίου στην αυλή και αντικατάσταση με σκυρόδεμα.
 - b. Ανακατασκευή του τσιμεντένιου πεζοδρομίου γύρω από το κτίριο παρέχοντας του επαρκή κλίση. Ακόμα παροχή ενός επαρκούς αρμού διαστολής μεταξύ του πεζοδρομίου και της πεδילוδοκού.
 - c. Να δοθεί κλίση στην επιφάνεια του εδάφους γύρω από το κτίριο μακριά από την κατασκευή για να επιτραπεί κατάλληλο σύστημα αποχέτευσης.

Τα παραπάνω διορθωτικά μέτρα θα αποτρέψουν οποιαδήποτε περαιτέρω ζημιά στην σχολική κατασκευή εξαιτίας των διογκούμενων εδαφών. Αφού γίνουν τα παραπάνω διορθωτικά μέτρα, το ίδιο βάρος της κατασκευής θα ασκηθεί πλήρως στους πασσάλους και η άνω άργιλος δεν θα τους ασκήσει ανυψωτική πίεση. Αποτρέποντας το νερό να εισέλθει στον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης, η κίνηση των πασσάλων θα σταματήσει.

Η διαδικασία για να επανέλθουν οι πάσσαλοι μπορεί να ξεκινήσει, ως εξής:

- Προσεκτική αποκατάσταση της στάθμης των πασσάλων κάτω από το σχολικό κτίριο με σημείο αναφοράς την βόρεια πλευρά του κτιρίου.
- Ένας μηχανικός κατασκευών πρέπει να αποφασίσει την κατάλληλη νέα στάθμη του σχολικού κτιρίου ανάλογα με την αρχική κατασκευή.
- Οι πάσσαλοι γύρω από το εξωτερικό του σχολικού κτιρίου έχουν ανυψωθεί. Ωστόσο στο κεντρικό τμήμα του κτιρίου οι πάσσαλοι έχουν παραμείνει στην αρχική τους θέση. Είναι λογικό να χαμηλώσουν οι εξωτερικοί πάσσαλοι και να επιτραπεί στους εσωτερικούς πασσάλους να κρατήσουν την αρχική τους θέση.

Το 1972, τα διορθωτικά μέτρα ξεκίνησαν όπως προτάθηκαν παραπάνω. Για να διευκολυνθεί η κατασκευή, όλος ο χώρος κάτω από την Πτέρυγα Γ χαμήλωσε. Αυτό όχι μόνο επέτρεψε στους εργάτες να κινούνται ελεύθερα στον χώρο εργασίας αλλά επίσης αφαίρεσε σχεδόν 4 ft (=1.22 m) εδάφους γύρω από τους πασσάλους (Εικόνα 30). Όλος ο χώρος φωταγωγήθηκε και μιάντες μεταφοράς τοποθετήθηκαν για την αφαίρεση του εδάφους. Κάθε πάσσαλος εξετάστηκε προσεκτικά για ελαττώματα αφού αφαιρέθηκε το περιβάλλον έδαφος. Χαλύβδινα δαχτυλίδια τοποθετήθηκαν γύρω από την κορυφή αυτών των πασσάλων που είχαν υποστεί διατμητική αστοχία. Όλες οι πεδילוδοκοί εξετάστηκαν ως προς την δομική αντοχή τους. Μεγάλες ατσάλινες δοκοί τοποθετήθηκαν για να ενισχυθούν οι ελαττωματικές δοκοί (Εικόνα 31). Άλλα διορθωτικά μέτρα όπως η παροχή αρκετού αέρα κάτω από τις πεδילוδοκούς, η αφαίρεση και η συμύκνωση του σκυροδέματος, η εγκατάσταση αντλιών φρεατίων για την εξάλειψη του επικαθήμενου νερού και η μεταφορά των πασσάλων που είχαν ανεπαρκές μήκος πραγματοποιήθηκαν υπό στενή παρακολούθηση.

Έτσι η επιχείρηση της ισοστάθμισης ξεκίνησε. Οι πεδילוδοκοί ανυψώθηκαν με υψηλής απόδοσης ανυψωτήρες (Εικόνα 32) και η κορυφή του πασσάλου κόπηκε και στερεώθηκε μέσω ατσάλινων πλακών. Τρεις από τους τέσσερις πασσάλους ισοσταθμίστηκαν σε μια επιχείρηση. Συνολικά 56 πάσσαλοι ισοσταθμίστηκαν στην Πτέρυγα Γ σε περίοδο 4

μηνών. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας ισοστάθμισης έγιναν προσεκτικοί έλεγχοι για να ορίσουν την κάθετη μετατόπιση. Τυπικές καταγραφές φαίνονται στο Διάγραμμα 16.



Εικόνα 30: Χαλάρωση του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο για να εξαλειφθεί η πίεση ανύψωσης.

[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

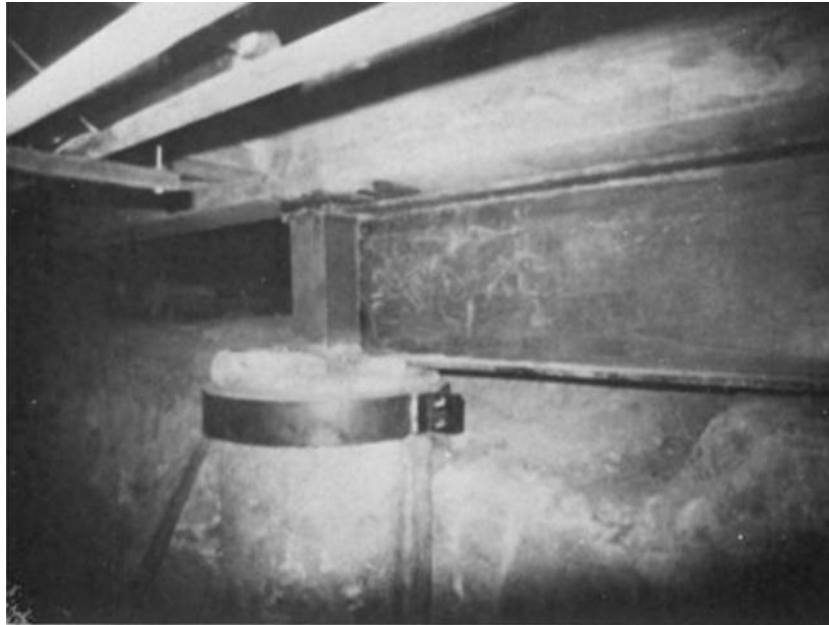
Έγιναν τέσσερα σύνολα βασικών μετρήσεων σύμφωνα με τα ακόλουθα:

1. Στάθμη πασσάλου πριν τις διορθωτικές κατασκευές,
2. Στάθμη πασσάλου αφού καθαρίστηκε ο χώρος κάτω από τις πεδιλοδοκούς και φορτίο του δομικού σκυροδέματος συγκεντρώθηκε στους πασσάλους,
3. Στάθμη πασσάλου μετά την απομάκρυνση των χωμάτων που περιέβαλλαν τους πασσάλους, ώστε τμηματικά τερματίστηκε η ανυψωτική πίεση στην επιφάνεια των πασσάλων, και
4. Στάθμη πασσάλου μετά την ισοστάθμιση των πασσάλων.

Από το Διάγραμμα 16, μπορεί να φανεί η επίδραση των διάφορων σταδίων των διορθωτικών κατασκευών στην καθίζηση των πασσάλων.

Η μελέτη της περίπτωσης αυτού του σχολείου είναι ένα τυπικό παράδειγμα αστοχίας εξαιτίας της ανύψωσης πασσάλου. Εκτός από τα ελαττώματα της κατασκευής, η παρούσα γνώση του τρόπου τοποθέτησης πασσάλων σε διογκούμενα εδάφη απαιτεί τον επαρκή οπλισμό του πασσάλου ώστε να αντισταθεί στην πίεση και την βαθιά εισχώρηση μέσα στο βραχώδες υπόστρωμα ώστε να σταθεροποιηθεί. Τέτοιες προφυλάξεις θα είχαν αποτρέψει το φαινόμενο της ανύψωσης.

Οι διορθωτικές κατασκευές για αυτό το σχολικό κτίριο περιορίστηκαν στην Πτέρυγα Γ. Μετά από περίοδο 6 μηνών, το κτίριο βρισκόταν ακόμα υπό κατασκευαστικές τροποποιήσεις. Μικρά ραγίσματα εμφανίστηκαν στον τοίχο σαν αποτέλεσμα της εφαρμογής της ισοστάθμισης.



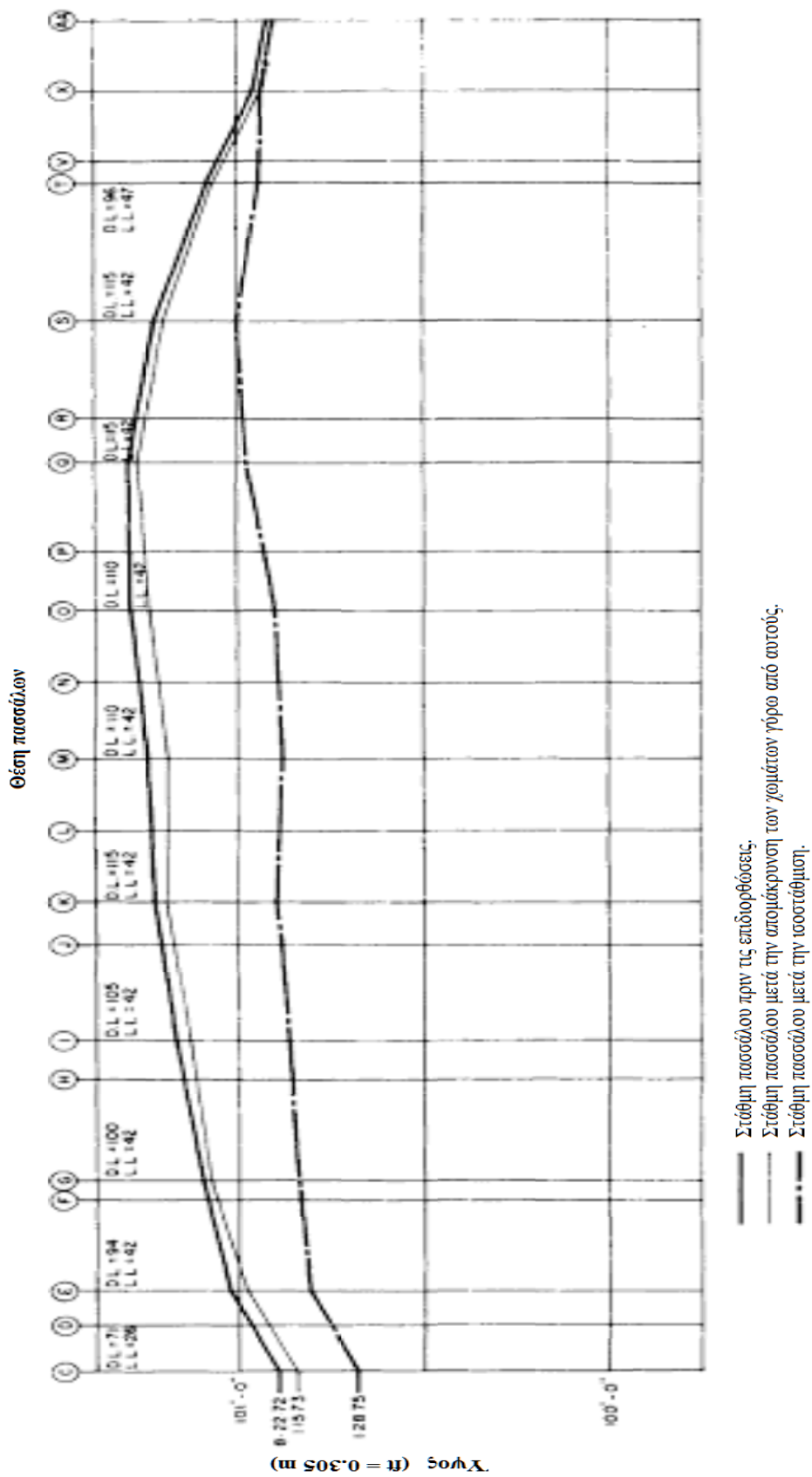
Εικόνα 31: Χαλύβδινα δαχτυλίδια τοποθετήθηκαν γύρω από τους ελαττωματικούς πασσάλους και μεγάλοι ατσάλινοι δοκοί εγκαταστάθηκαν για να δυναμώσουν την πεδιλοδοκό.

[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]



Εικόνα 32: Ανύψωση της πεδιλοδοκού κατά την επιχείρηση της ισοστάθμισης (των πασσάλων).

[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]



Διάγραμμα 16: Θέση πασσάλων μετά από διάφορα στάδια διορθωτικών κατασκευών.
 [Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

5.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2η: ΘΛΙΨΗ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

5.2.1. Γενικά

Αυτή είναι μια τυπική περίπτωση ακατάλληλου σχεδιασμού και κατασκευής συστήματος θεμελίωσης με διάτρητους πασσάλους. Το κτίριο είναι ένα κατοικημένο σπίτι στο Δυτικό Denver του Colorado.

5.2.2. Υπάρχουσα Κατάσταση

Σχεδιασμός

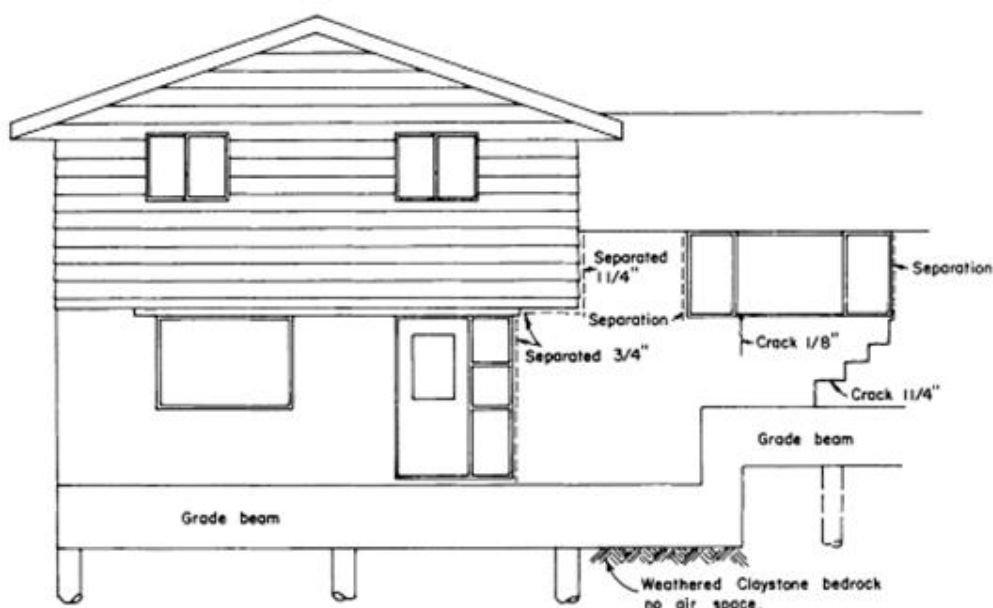
Η κατοικία είναι μια κατασκευή με χωριστά επίπεδα που κοιτάζει την ανατολή, με το τελικό πάτωμα στο νότο, χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης κάτω από τον χώρο διαβίωσης και χώρο στάθμευσης στο βορρά. Είναι μια κατασκευή από ξύλινο πλαίσιο και τοίχους πλήρωσης από τούβλα με δικτυωτό σύστημα οροφής και υποστηριζόμενο από πασσάλους (Εικόνα 33).

Πριν από την κατασκευή πραγματοποιήθηκε έλεγχος στο υπέδαφος. Οι πάσσαλοι σχεδιάστηκαν για να αντέξουν μέγιστη τελική πίεση 15,000 psf (=718.20 kPa), επιφανειακή τριβή 1,500 psf (=71.82 kPa) και ίδιο βάρος κατασκευής τουλάχιστον 15,000 psf (=718.20 kPa). Προτάθηκε επίσης οι πάσσαλοι να εισχωρήσουν τουλάχιστον 4 ft (=1.22 m) στο πέτρωμα. (Καθώς το βραχώδες υπόστρωμα πρακτικά εμφανίστηκε στην εκσκαφή, το μήκος των πασσάλων δεν ξεπέρασε τα 4 ft (=1.22 m)).

Θλίψη

Η κατοικία χτίστηκε το 1961. Οι ρωγμές εμφανίστηκαν στο σπίτι 6 μήνες μετά την κατοίκηση. Το μέγεθος της μετακίνησης άρχισε να αυξάνεται σταθερά. Ένα υπόγειο σύστημα αποχέτευσης που οδηγούσε σε ένα αντλητικό φρεάτιο εγκαταστάθηκε αργότερα στον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης του σπιτιού. Η πιο σοβαρή μετακίνηση δημιουργήθηκε μεταξύ του χώρου υπερυψωμένης θεμελίωσης και του χώρου του καθιστικού. Ο διαχωρισμός του χώρου υπερυψωμένης θεμελίωσης από το διώροφο τμήμα του σπιτιού φαίνεται στην Εικόνα 33. Το πλάτος του διαχωρισμού μετρήθηκε από 1 έως 1.5 in (0.03 έως 0.04 m). Το παράθυρο της εικόνας πάνω από τον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης επίσης διαχωρίστηκε από τον τοίχο σχεδόν 1 in (=0.03 m).

Ρωγμές ακόμα εμφανίστηκαν στο πίσω μέρος του σπιτιού μεταξύ του μονώροφου και του διώροφου τμήματος. Οι εξωτερικές πόρτες μπλοκαρίστηκαν και η πλάκα του αιθρίου ήταν σχεδόν 1 in (=0.03 m) χαμηλότερα από την αρχική της θέση.



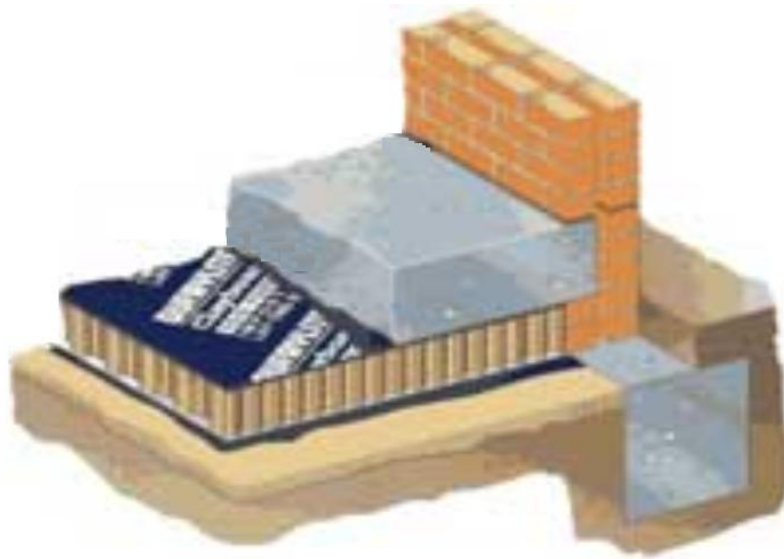
Εικόνα 33: Θέση των εξωτερικών ρωγμών.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]

Στο εσωτερικό του σπιτιού, βρέθηκαν διάφορες ρωγμές κοντά στην σκάλα που οδηγεί στο υπόγειο. Ρωγμές επίσης βρέθηκαν πάνω από τις περισσότερες πόρτες και παράθυρα, υποδεικνύοντας σημαντική μετακίνηση. Οι περισσότερες από τα πόρτες στο σπίτι είχαν μπλοκαριστεί. Η δοκός τύπου I που υποστηρίζει τον πάνω όροφο φαίνεται να έχει μετακινηθεί. Μία από τις κολώνες στον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης είχε χαλαρώσει, υποδεικνύοντας την ανύψωση της στήριξης κάτω από την δοκό τύπου I. Οι πλάκες είχαν ανυψωθεί. Γενικά, η έκταση των ρωγμών σε αυτό το σπίτι ήταν πολύ σημαντική, και από το μοτίβο τους και την φύση της διάγκωσης του εδάφους θεμελίωσης, έχει συμβεί σημαντική ανυψωτική μετακίνηση του εδάφους κάτω από τα θεμέλια.

5.2.3. Αίτιο μετακίνησης

Το αίτιο της μετακίνησης των θεμελίων αυτού του σπιτιού συνοψίζεται ως εξής:

- Στον χώρο υπερυψωμένης θεμελίωσης πάρθηκαν αδιατάρακτα δείγματα με το χέρι κάτω από τις πεδιλοδοκούς. Οι έλεγχοι υπέδειξαν ότι η αργιλόλιθος είχε υψηλή πιθανότητα διάγκωσης. Τα αποτελέσματα των τυπικών ελέγχων φαίνονται στο Διάγραμμα 17. Το Διάγραμμα 17 υποδεικνύει ότι η πίεση διάγκωσης είναι περίπου 16,000 psf (=766.08 kPa).
- Δεν βρέθηκε κενός χώρος κάτω από την πεδιλοδοκό κοντά στην κύρια είσοδο του χώρου υπερυψωμένης θεμελίωσης. Το συνολικό μήκος του τμήματος της πεδιλοδοκού χωρίς χαρτόνι με κενά αέρος (Εικόνα 34) είναι σχεδόν 8 ft (=2.44 m).



Εικόνα 34: Τα χαρτονένια κουτιά με κενά αέρος χρησιμοποιούνται συνήθως για να σχηματίσουν κενό χώρο ανάμεσα στο κάτω μέρος των πεδιλοδοκών και των πλακών εδρασμένων σε διογκούμενα εδάφη. Υπάρχουν δύο τύποι ανάλογα με την διαμόρφωση των κελιών στο εσωτερικό των κουτιών: α)τα διαγώνια και β)τα κάθετα. Εδώ φαίνονται τα χαρτονένια κουτιά με τα κάθετα κελιά.

[Πηγή:

http://www.siginsulation.co.uk/show_prod.asp?ProdID=1537&CatID=43&SubCatID=196]

Η κατώτερη αργιλόλιθος δέχτηκε άμεση πίεση ανύψωσης στην πεδιλοδοκό σε αυτό το τμήμα του σπιτιού. Με μήκους 8 ft (=2.44 m) πεδιλοδοκούς, 9 in (=0.23 m) πλάτους, χωρίς κενό χώρο, η συνολική πίεση ανύψωσης που ασκήθηκε στην πεδιλοδοκό μπορεί να έφτασε μέχρι τις 96,000 lbs (=427.03 kN). Αυτή η πίεση είναι ικανή να προκαλέσει την σημαντική μετακίνηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου πατώματος του σπιτιού. Εφόσον οι πάσσαλοι είναι μόνο 4 ft (=1.22 m) μήκους, τα εδάφη δέχτηκαν όχι μόνο πίεση ανύψωσης γύρω από την περίμετρο του πασσάλου αλλά επίσης και ευθέως στο κάτω μέρος των πασσάλων.

Η μέγιστη δυνατή ανύψωση σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται ακολούθως:

Δεδομένα :	Διάμετρος πασσάλου	= 12 in	=0.30 m
	Περιφέρεια πασσάλου	= 3,14 ft	=0.96 m
	Επιφάνεια τέλους πασσάλου	= 0,785 ft ²	=0.07 m ²
	Μέρος πασσάλου στο βραχώδες υπόστρωμα	=4.0 ft	=1.22 m
	Πίεση διόγκωσης στο βραχώδες υπόστρωμα	= 16,000 psf	=766.08 kPa
	Τμήμα της πίεσης διόγκωσης υπεύθυνο για την ανύψωση	=16,000 x 0.15 = 2,400 psf	=114.91 kPa

Άρα η συνολική δύναμη ανύψωσης από το τέλος του πασσάλου:

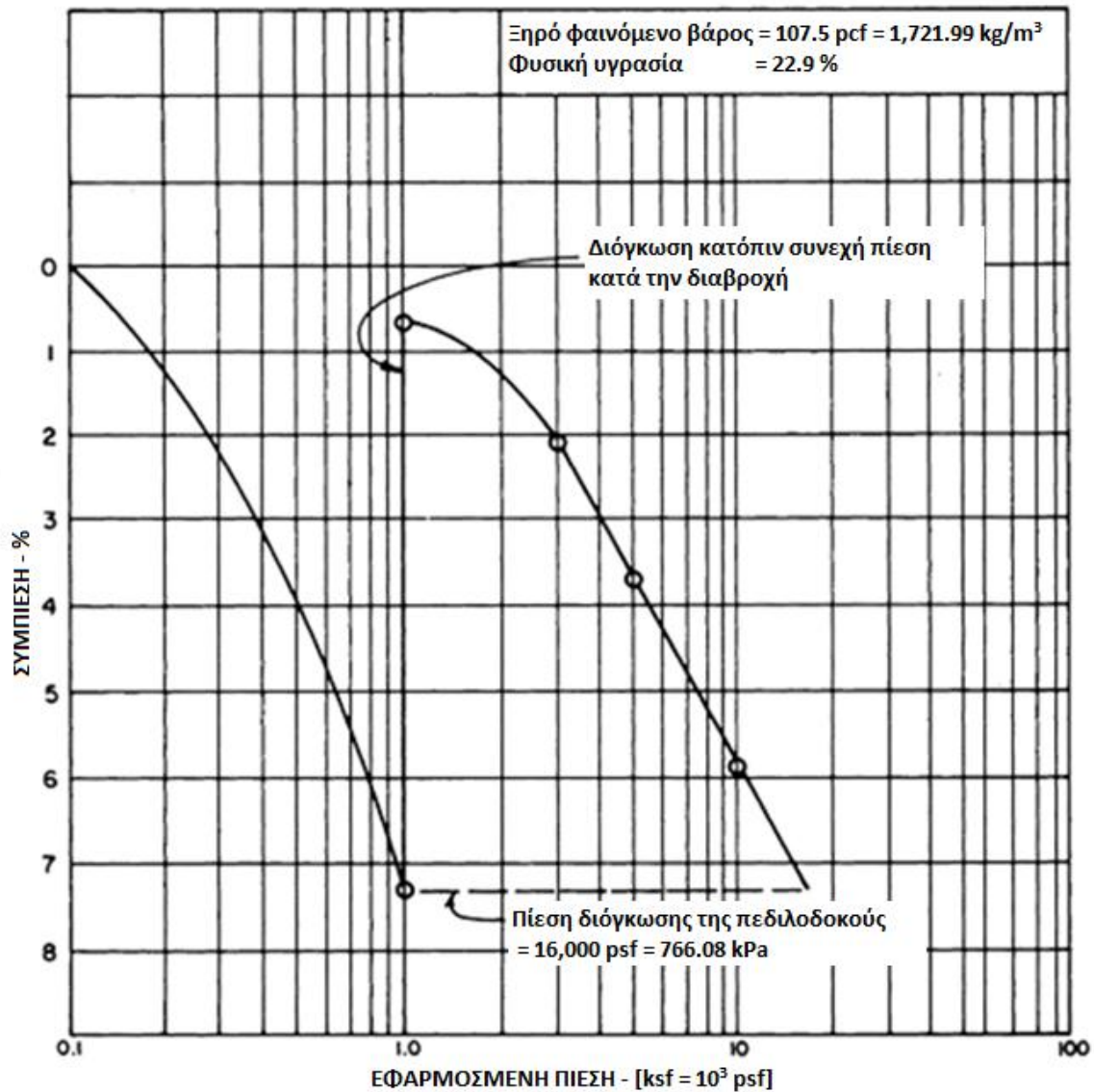
$$=16,000 \times 0.785 = 12.5 \text{ kips} = 55.60 \text{ kN}$$



Εικόνα 35: Διαχωρισμός του σαλονιού από το διώροφο τμήμα.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]



Εικόνα 36: Διαχωρισμός του σπιτιού εξαιτίας διαφορετικής διαστολής.
[Πηγή: Fu Hua Chen, 1975]



Διάγραμμα 17: Χαρακτηριστικό δείγμα του διαβρωμένου αργιλόλιθου αποκτημένο από το κάτω μέρος της πεδιλοδοκού.
[Πήγη: Fu Hua Chen, 1975]

Από τον τοίχο πάσσάλου	= 2,400 x 3 x 3.14 = 22.6 kips = 100.53 kN
Συνολικά	= 35.1 kips = 156.13 kN
Τελική παρακρατηθείσα δύναμη	= 15,000 x 0.785 = 11.8 kips = 52.49 kN

Είναι προφανές ότι το ίδιο βάρος της κατασκευής που ασκήθηκε στον πάσσαλο δεν είναι ικανό για να αποτρέψει την ανύψωση. Οι εσωτερικοί πάσσαλοι έχουν ακόμα λιγότερο ίδιο βάρος κατασκευής από τους εξωτερικούς. Συνεπώς, οι πάσσαλοι κάτω από την δοκό τύπου I έχουν ανυψωθεί, προκαλώντας την κίνηση στην δοκό τύπου I διαταράσσοντας έτσι όλη την ανωδομή.

- Τα διαχωριστικά τοιχώματα στο διώροφο τμήμα του σπιτιού είναι εδρασμένα σε πλάκα και όταν οι πλάκες ανυψωθούν, οι τοίχοι μεταδίδουν απευθείας ανυψωτική πίεση στην δοκό τύπου I η οποία διαταράσσει την ανωδομή.
- Το αίτιο της ύγρυνσης των εδαφών κάτω από τα θεμέλια είναι ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας και το μέτριο σύστημα αποχέτευσης γύρω από το σπίτι. Η αρχική έρευνα στα θεμέλια υπέδειξε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι κοντά στο πάτωμα του υπογείου. Αρχικά θα έπρεπε να δοθεί σημασία στην επίδραση της ύγρυνσης στην σταθερότητα της κατασκευής.

Το αίτιο της μετακίνησης αυτού του σπιτιού οφείλεται στο διόγκωση των εδαφών κάτω από την πεδילוδοκό και στην ανύψωση των πασσάλων. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του σπιτιού δεν μπορούν να περιλάβουν την σημαντική ανύψωση των εδαφών.

5.2.4. Επιδιορθωτικά Μέτρα

Προτάθηκαν τα παρακάτω επιδιορθωτικά μέτρα:

- Εκσκαφή γύρω από το τμήμα του υπογείου του σπιτιού για να εμφανιστεί η πεδילוδοκός. Απομάκρυνση των «μανιταριών» πάνω από τους πασσάλους και ανακατασκευή του κενού χώρου με τον ίδιο τρόπο όπως στο τμήμα του χώρου υπερυψωμένης θεμελίωσης του σπιτιού.
- Απελευθέρωση των πασσάλων από την πεδילוδοκό.
- Πρέπει να γίνει ακριβής ισοπέδωση χρησιμοποιώντας την κεντρική πεδילוδοκό ως σημείο αναφοράς για να επανέλθει ολόκληρο το σπίτι στο αρχικό επίπεδο. Είναι πιθανό να χρειαστεί να καθιερωθεί το ποσό της προσαρμογής που απαιτείται για κάθε ξεχωριστό πάσσαλο για να επιστρέψει το σπίτι σε θέση επιπέδου. Αναμένεται ότι αφού γίνει αυτό οι υπάρχουσες ρωγμές θα κλείσουν μερικώς.
- Οι πάσσαλοι μετά την προσαρμογή πρέπει να στερεωθούν με μεταλλικές πλάκες.
- Η επίχωση στο τμήμα του υπογείου πρέπει να παρέχεται με βαθιά πηγάδια σχεδόν 3 ft (=0.91 m) σε διάμετρο γύρω από τους 5 εκτεθειμένους πασσάλους ώστε στο μέλλον, η προσαρμογή των πασσάλων να είναι δυνατή χωρίς την μετακίνηση όλης της επίχωσης.
- Το άνω μέρος των πηγαδιών πρέπει να καλυφθεί με κατάλληλα υλικά ώστε η επιφάνεια του νερού δεν θα στάζει μέσα στα πηγάδια.
- Αναπροσαρμογή της δοκού τύπου I για να επαναφέρει το επίπεδο της ανωδομής.
- Αφαίρεση όλων των κατασκευών που είναι εδρασμένες με πλάκες όπως στην σκάλα, εσωτερικά ντουλάπια, βιβλιοθήκες, φούρνος και παροχή κοινής ολίσθησης ώστε περαιτέρω μετακίνηση πλάκας να μην επηρεάσει την ανωδομή.
- Έλεγχος της πεδילוδοκού κάτω από την πόρτα εξόδου στο πίσω μέρος του σπιτιού για να επιβεβαιωθεί ότι η πεδילוδοκός είναι ενωμένη σαν μια μονάδα. Αν κριθεί

απαραίτητο, πρέπει να κατασκευαστούν νέες πεδילוδοκοί που θα εκτείνονται πάνω από την πόρτα εξόδου.

- Απομάκρυνση της πίσω πλάκας αιθρίου για όλο το μήκος ώστε η πλάκα να ελευθερωθεί από την πεδילוδοκό.
- Απελευθέρωση της πλάκας του πατώματος του υπογείου γύρω από την περίμετρο των πεδילוδοκών.
- Επέκταση του εξωτερικού συστήματος αποχέτευσης από την πίσω μεριά του κτιρίου έως την νότια πλευρά του χώρου στάθμευσης ώστε να αναχαιτιστούν όλες οι πιθανές πηγές νερού από το να εισέλθουν στο σπίτι.
- Επανασυμπύκνωση της επίχωσης σε λεπτά, βρεγμένα στρώματα με μηχανική συσκευή συμπύκνωσης.
- Υποβάθμιση της επίχωσης γύρω από το σπίτι ώστε το επιφανειακό νερό να στραγγίζεται μακριά από το σπίτι.
- Απομάκρυνση όλων των θάμνων και των λουλουδιών γύρω από το σπίτι και επέκταση των υδρορροών.

Αυτή η συγκεκριμένη περίπτωση οδηγήθηκε στο δικαστήριο και ο εργολάβος διατάχθηκε να πληρώσει το κόστος των επιδιορθωτικών κατασκευών (11,000 \$ = 10,417.66 €) το οποίο αναλογεί σε περίπου 50% του κόστους του σπιτιού. Τα επιδιορθωτικά μέτρα εκτελέστηκαν πλήρως. Αφού το σπίτι είχε επανέλθει, κάποιες από τις πιο σοβαρές ρωγμές άρχισαν να κλείνουν όπως φαίνεται στην Εικόνα 37. Πήρε περισσότερο από 6 μήνες μέχρι το κτίριο να σταθεροποιηθεί. Μερικά 6 χρόνια μετά την επιδιορθωτική κατασκευή, δεν βρέθηκε σοβαρή μετακίνηση θεμελίων στο σπίτι (Εικόνα 38). Έτσι η αναπροσαρμογή των πασσάλων δεν ήταν απαραίτητη.



Εικόνα 37: Μετακίνηση του σπιτιού πριν και μετά τις διορθωτικές κατασκευές.
[Πήγη: Fu Hua Chen, 1975]



Εικόνα 38: Κατάσταση στο μπροστινό μέρος του σπιτιού το 1974.
[Πήγη: Fu Hua Chen, 1975]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε σκοπό την ανάλυση του εδάφους με στόχο την περιγραφή της διεργασίας της διόγκωσης των εδαφών και τις μεθόδους αντιμετώπισης του φαινομένου. Όπως αναλύθηκε τα διογκούμενα εδάφη είναι τα εδάφη τα οποία περιέχουν αργιλικά ορυκτά που επιδέχονται μεγάλες ογκομετρικές αλλαγές με την διακύμανση της υγρασίας. Η παρουσία των διογκούμενων εδαφών προκαλεί πολλά προβλήματα ιδιαίτερα σε κτίρια, κατασκευές, δρόμους και υπηρεσίες. Ωστόσο, το πρόβλημα μεγαλώνει όσο αυξάνεται η οικοδομική δραστηριότητα στο δομημένο περιβάλλον με συνέπεια οι περιοχές με το φαινόμενο της διογκώσεως να παρουσιάζονται συχνότερα.

Αποτέλεσμα όλων των προαναφερόμενων είναι η αύξηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος για εδάφη είτε που έχουν υποστεί διόγκωση είτε είναι «ευαίσθητα» να υποστούν διόγκωση. Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ποικίλουν και έχουν στόχο να βρεθεί η καταλληλότερη λύση για κάθε περίπτωση. Τονίζεται ότι το φαινόμενο της διόγκωσης δεν έχει μελετηθεί πλήρως και πολλές από τις πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί δεν έχουν δώσει σαφή αποτελέσματα.

Ωστόσο σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε από την παρούσα πτυχιακή εργασία καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα: αρχικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται έχουν σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους που έχει ή πρόκειται να υποστεί διόγκωση. Η επιλογή της μεθόδου που θα ακολουθηθεί σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά διότι θα πρέπει να είναι ανάλογη των χαρακτηριστικών του υπεδάφους ώστε να εξασφαλίζει την ικανοποιητική συμπεριφορά τόσο έναντι των μηχανικών καταπονήσεων όσο και την διατήρηση του έργου μακροπρόθεσμα.

Επιπλέον, απαιτείται προσεκτική επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψη τα μακροχρόνια χαρακτηριστικά των μέσων που θα χρησιμοποιηθούν όσο και των ιδιοτήτων του εδάφους. Οι δοκιμές θεωρούνται απαραίτητες για την συμβατότητα μεταξύ των στραγγιστριών και του εδάφους και προτείνονται οι επιτόπου δοκιμές αφού έχουν την δυνατότητα να δώσουν σαφή αποτελέσματα για την τεχνικά επιτυχή εφαρμογή.

Ακόμα απαραίτητη θεωρείται η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος πριν από την κατασκευή του έργου προκειμένου να ληφθούν εγκαίρως ενόργανες μετρήσεις της συμπεριφοράς του εδάφους και της συμβολής των στραγγιστηρίων, έτσι ώστε να γίνει οικονομοτεχνικά σωστά η επιλογή του γεωφάσματος των στραγγιστηρίων και να προγραμματισθούν αποτελεσματικά οι διάφορες φάσεις κατασκευής του έργου, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας έργα.

Τέλος με την παρούσα πτυχιακή εργασία δίνεται η δυνατότητα στους συναδέλφους του Τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. να αντιληφθούν τα προβλήματα που δημιουργούν τέτοια φαινόμενα με στόχο να ερευνήσουν και να μελετήσουν την αντιμετώπιση τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

❖ *Ελληνική Βιβλιογραφία*

1. Βγενοπούλου Ε., 2004, *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Ι*, Εκδόσεις ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
2. Καββαδάς Μ., 2006, *Στοιχεία εδαφομηχανικής*, Έκδοση 13 Εθνικό Μετσόβιο, Πολυτεχνείο, Αθήνα.
3. Καραγιάννης Κ., 2014, *Αποτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή λιμένος Ηρακλείου*, Εκδόσεις Πολυτεχνείο, Κρήτη.
4. Μαραγκός Ν., 2009, *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*, ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, Σέρρες
5. Παπαδόπουλος Β, Λουπασάκης Κ., 2013, *Σημειώσεις Εδαφομηχανική και Στοιχεία Θεμελιώσεων*, Εθνικό Μετσόβιο, Πολυτεχνείο, Αθήνα.
6. Χρηστάρας, Β (2002). Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές Εδαφομηχανικής. ΤΕΕ.
7. Σιούτα Λ., Πλαστήρα Β., 2010, *Μελέτη της επίδρασης της μεταβολής των υδατικών πιέσεων των εδαφικών σχηματισμών στα τεχνικά έργα*, Εκδόσεις ΤΕΙ Πειραιά, Αθήνα.
8. Τόλιος Ι., Παρασκευόπουλος Γ., 2013, *Είδη, αιτία και τρόποι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων*, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης.
9. Κλεόπας Χ., 2003, *Τα αιτία των καθιζήσεων και ρωγμών σε οικοδομές και τεχνικά έργα της υπαίθρου*, Έκδοση Περιοδικό Αγρότης, Αθήνα.
10. Κύρου Κ., 2014, *Διογκούμενα εδάφη Μια συνεχής απειλή για το δομημένο περιβάλλον της Κύπρου*, Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων, Κύπρο, Λευκωσία.
11. Παπακυριακόπουλος Π. & Κουδουμάκης Π., 2001, *Διογκούμενα Εδάφη Περιοχής Θράκης*, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα.
12. Κουδουμάκης Π. 2002, *Τεχνική Συμπεριφορά Διογκουμένων Εδαφών Περιοχής Θράκης*, 2^η Έκθεση Προόδου Διδακτορικής Διατριβής, Δ.Π.Θ., Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής.
13. Παπαχαρίσης Ν., Μάνου-Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι., 1999, *Γεωτεχνική Μηχανική*, Εκδοτικός οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε.

❖ *Ξένη Βιβλιογραφία*

1. Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, *Engineering properties of expansive clays*, Transactions A.S.C.E., Vol. 121, pp. 641 - 663.

2. Jennings J. E. and Knight K., 1957, *The prediction of total heave from the double oedometer test*, Proc. Symp. Expansive Clays , South Africa Inst. of Civil Engineers, Johannesburg, Vol. 7, no. 9, pp. 13 - 19.
3. Lambe T. W. and Whitman R. V., 1959, *The role of effective stress in the behavior of expansive soils*, Quarterly, Colorado School of mines, vol. 54, no. 4, pp. 33 - 60.
4. Xeidakis G., Koudoumakis P, Tsirambides, A., 2004, *Road Construction on Swelling Soils: The Case of Strymi Soils, Rhodope, Thrace, Northern Greece*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 63, Num.2, p.p. 93 - 101.
5. Fredlund D. G., 1995, *The prediction of heave in expansive soils*, Presented at Q Canada - Kenya Symposium on Unsaturated Soils.
6. Brackley I. J. A., 1975, *A model of unsaturated clay structure and its application to swell behavior*, Proc. 6th African Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, pp. 65 - 70.
7. El Sayed, S. T. and Rabbaa, S.A., 1986, *Factors affecting behavior of expansive soils in the laboratory and field - a review*, Geotechnical Engineering, Vol. 17, no. 1, pp. 89 - 107.
8. Erol A. O., Dhowian A. and Youssef A. 1987, *Assessment of oedometer methods for heave predictions*, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils (New Delhi, India), pp. 99 - 103.
9. Jennings J. E., Firth R. A., Ralph T. K. and Nagar, N., 1973, *An improved method for predicting heave using the oedometer test*, Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils (Haifa, Israel), Vol. 2, pp. 149 - 154.
10. Justo J. L., Delgado A. and Ruiz J., 1984, *The influence of stress path in the collapse swelling of soils in the laboratory*, Proc. 5th Int Conf. Expansive Soils (Adelaide, Australia), pp. 67 - 71.
11. Shuai H., 1996, *Simulation of swelling pressure measurements on expansive soils*, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon Canada, pp. 15
12. Gizienski S. F. and Lee L. J., 1965, *Comparison of laboratory swell tests to small scale field tests*, Proc. 1st Int. Conf. Expansive Clay Soils, Texas A & M Press, pp 108 - 109. Holtz, W, G. and Gibbs, H. J., 1956, *Engineering properties of expansive clays*, Transactions A.S.C.E., Vol. 121, pp. 641 - 663.
13. Jennings J. E. and Knight K., 1957, *The prediction of total heave from the double oedometer test*, Proc. Symp. Expansive Clays (South Africa Inst. of Civil Engineers, Johannesburg), Vol. 7, no. 9, pp. 13 - 19.
14. Nobel C. A., 1966, *Swelling measurements and prediction of heave for lacustrine clay*, Can. Geotech. J., Vol. 3, no. 1, pp. 32 - 41.
15. Lu Y., 1969, *Swell properties of desiccated Regina Clay*, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon Canada, pp. 135.
16. Ali E. F. M. and Elturabi M. A. D., 1984, *Comparison of two methods for the measurements of swelling pressure*, Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils (Adelaide, Australia).

17. Osman M. A. and El Sharief A. M., 1987, *Field and laboratory observations of expansive soil heave*, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils (New Delhi, India), pp.105 - 110.
18. Khaddaj S., Lancelot L., and Shahrour I., 1992, *Experimental study of the swelling behavior of heavily overconsolidated Flandres clays*, Proc. 7th Int. Conf. Expansive Soils (DallasTexas), pp. 239 - 244.
19. Abduljauwad S. N. and Al - Sulaimani G. J., 1993, *Determination of swell potential of Al - Qatif Clay*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 4, December 1993, pp. 469 - 484.
20. Chen F. H., 1975, *Foundations on Expansive Soils*, Elsevier, Amsterdam.
21. Casagrande A., 1948, *Classification and identification of soils*, Transactions of A.S.C.E., Vol. 113, pp. 901 - 992.
22. American Society for Testing and Materials, 1995, *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, A.S.T.M. Designation D 2487-93, Annual Book of A.S.T.M. standards, West Conshohocken, Vol. 4.08.
23. British Standards Institution, 1981, *British Code of Practice for Site Investigations. B.S.I.*, London, B.S. 5930.
24. Bureau of Indian Standards, 1970, *Indian Standard Classification and Identification of Soils for General Engineering Purposes. B.I.S.*, New Delhi, (Reaffirmed 1987), I.S. 1498.
25. American Society for Testing and Materials, 1995, *Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)*, A.S.T.M. Designation D 2488-93, Annual Book of A.S.T.M. standards, West Conshohocken, Vol. 4.08.
26. Suzulki A. and Kitazono Y., 1998, Engineering classification of volcanic cohesive soils, In *Report on Volcanic Ash Soils in Japan: Properties and Practical Use*, pp. 39 - 43.
27. Nagaraj T. S., Onitsuka K., Tateishi Y. and Hong, Z., 1998, Is diatom earth a collapsible material?, *Proceedings of the International Symposium on Problematic Soils*, Sendai, Japan, Vol. 1, pp. 257 - 260.
28. Altmeyer W. T., 1956, Discussion on engineering properties of expansive soils, *Transactions of A.S.C.E.*, Vol. 121, pp. 666 - 669.
29. Head K. H., 1992, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 1: Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press, London.
30. Seed H. B., Woodward R. J. and Lundgren R., 1962, Prediction of swelling potential for compacted clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, A.S.C.E., Vol. 88, No. S.M. 3, pp. 53 - 87.
31. United States Bureau of Reclamation, 1973, *Earth Manual*, U.S.B.R., Federal center, Denver.
32. Van Der Merve D. H., 1984, The prediction of heave from plasticity index and the percentage clay fraction of the soils, *The Civil Engineer, South African Institution of Civil Engineers*, Vol. 6, pp. 103 - 107.
33. Sridharan A. and Prakash K., 1998, Mechanism controlling the shrinkage limit of soils, *Geotechnical Testing Journal*, A.S.T.M., Vol. 21, No. 3, pp. 240 - 250.

34. Bureau of Indian Standards, 1977, *Indian Standards Method of Test for Soils*, B.I.S., New Delhi, I.S. 2720: Part 40.
35. Sridharan A., Rao, S. M. and Murthy N. S., 1985, Free swell index of soils: A need for redefinition, *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 15, pp. 94 - 99.
36. Sridharan A., Rao S. M. and Murthy N. S., 1986, A rapid method to identify clay type in soils by the free-swell technique, *Geotechnical Testing Journal*, A.S.T.M., Vol. 9, No. 4, pp. 193 - 203.
37. Sridharan A. and Rao S. M., 1988, A scientific basis for the use of index tests in identification of expansive soils, *Geotechnical Testing Journal*, A.S.T.M., Vol. 11, No. 3, pp. 208 - 212.
38. Sridharan A., Rao S. M. and Murthy N. S., 1986, Liquid limit of montmorillonite soils, *Geotechnical Testing Journal*, A.S.T.M., Vol. 9, No. 3, pp. 156 - 159.
39. Winterkorn H. F. and Fang H. Y., 1986, Soil technology and engineering properties of soils, In *Foundation Engineering Hand Book*, Galgotia Book Source, New Delhi.
40. Sridharan A., Rao S. M. and Murthy N. S., 1988, Liquid limit of kaolinitic soils, *Geotechnique*, Vol. 38, No. 2, pp. 191 - 198.
41. Sridharan A., Rao S. M. and Joshi S., 1990, Classification of expansive soils by sediment volume method, *Geotechnical Testing Journal*, A.S.T.M., Vol. 13, No. 4, pp. 375 - 380.
42. Mohan D. and Rao B. G., 1965, *Moisture Variation and Performance of Foundations in Black Cotton Soils in India*, Moisture Equilibria and Moisture Change in Soils Beneath Covered Areas, Australia, Butterworth.
43. Allen H., 1946, *Report of Committee on Warping of Concrete Pavements*, Highway Research Board Proceedings, Vol. 25.
44. Merten Fred K., Brakey Bud A. and Asphalt Institute, May 1968, *Asphalt Membranes and Expansive Soils*, Information Service No. 145 (I.S. - 145).
45. Dawson R. F., 1959, *Modern Practices Used in the Design of Foundations for Structures on Expansive Soils*, Quarterly, Colorado School of Mines, Vol. 54, No. 4.
46. Holtz W. G. and Gibbs H. J., October 1959, *Expansive Clay - Properties and Problems*, Quarterly of Colorado School of Mines, Vol. 54, No. 4.
47. Gromko G. J., June 1974, *Review of Expansive Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering Division.

❖ Διαδίκτυο

1. <https://el.wikipedia.org/wiki>
2. <http://www.corfupress.com>
3. <http://www.visaltis.net>
4. <http://urbanspeleology.blogspot.gr>
5. http://www.geology.ar.gov/geohazards/expsoils_geninfo.htm

6. http://www.azgs.az.gov/hazards_problemsoils.shtml
7. <http://www.pavementinteractive.org/article/pumping>
8. <http://tsimedokonia.gr>
9. <http://dasarxeio.com>
10. <http://www.uibk.ac.at/dk-cim/projects/hofstetter>
11. <http://ChinChatComics.com>
12. <http://www.pavetest.gr>
13. <http://arhitektonas.blogspot.gr>
14. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg758y/PDF/2.pdf>
15. <http://www.hellaskps.gr>
16. <http://www.egnatia.eu/page>
17. <http://www.meacorporation.com/wp-content/uploads/project-bulletin-13.pdf>
18. http://www.siginsulation.co.uk/show_prod.asp?ProdID=1537&CatID=43&SubCatID=196