



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας εδαφικών υλικών για
την κατασκευή έργου οδοποιίας»**

Εμμανουήλ Μ. Παπαδάκης

Εξεταστική Επιτροπή

- **Εμμανουήλ Στειακάκης** (Αν. Καθηγητής – Επιβλέπων)
- **Εμμανουήλ Μανούτσογλου** (Καθηγητής)
- **Γεώργιος Εξαδάκτυλος** (Καθηγητής)

Χανιά 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με το πέρας των εργασιών και την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Εμμανουήλ Στειακάκη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε όλον αυτό τον καιρό, καθώς και την καθοδήγηση με τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια ολοκλήρωσης της εργασίας.

Τους Καθηγητές κ. Μανούτσογλου και κ. Εξαδάκτυλο για την συμμετοχή τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Τον επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Διονύσιο Βαβαδάκη για την αμέριστη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας, από την διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών, την ανάλυση των αποτελεσμάτων μέχρι και την συγγραφή της.

Τους γονείς μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας εδάφους που χρησιμοποιείται για την κατασκευή επιχώματος οδοποιίας στην περιοχή Γουβών Ηρακλείου.

Τα αποτελέσματα του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR) συμβάλουν στον καθορισμό του πάχους των στρώσεων και θεωρούνται απαραίτητα για την διασφάλιση της σωστής κατασκευής και της ευστάθειας ενός οδοστρώματος.

Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία από τρεις θέσεις του έργου με σκοπό την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων και του CBR του γεωϋλικού σε καθορισμένες συνθήκες υγρασίας και πυκνότητας.

Αρχικά, τα δείγματα αναλύθηκαν κοκκομετρικά, προσδιορίστηκαν οι τιμές των ορίων Atterberg, ταυτοποιήθηκαν και ταξινομήθηκαν κατά USCS και AASHTO και εκτιμήθηκε η βέλτιστη υγρασίας συμπίκνωσης. Ακολούθησαν οι δοκιμές προσδιορισμού του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR) σε καθορισμένες συνθήκες υγρασίας και πυκνότητας του γεωϋλικού.

Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν με βάση τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 02-07-01-00 και τα γεωϋλικά χαρακτηρίστηκαν ως προς την καταλληλότητά τους για την κατασκευή επιχωμάτων οδοποιίας.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 1 -
2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	- 2 -
2.1. Κατηγορίες οδοστρώματος	- 2 -
2.1.1. Δύσκαμπτα οδοστρώματα	- 2 -
2.1.2. Εύκαμπτα οδοστρώματα	- 3 -
2.2. Τεχνικές προδιαγραφές βάσης – υπόβασης	- 6 -
2.2.1. Κοκκομετρία	- 6 -
2.2.2. Υδαρότητα – Πλαστικότητα.....	- 8 -
2.2.3. Ισοδύναμο άμμου.....	- 8 -
2.2.4. Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση	- 9 -
2.3. Επίχωμα	- 10 -
2.3.1. Τεχνικές προδιαγραφές επιχωμάτων.....	- 12 -
2.3.2. Αντιδιαβρωτική προστασία πρανών.....	- 18 -
2.4. Κατάταξη υλικών	- 20 -
2.5. Βαθμός συμπίκνωσης.....	- 24 -
2.6. Δείκτης CBR.....	- 25 -
2.6.1. Επί τόπου δοκιμή.....	- 26 -
2.6.2. Διαφορές επί τόπου και εργαστηριακής δοκιμής.....	- 28 -
2.7. Σχέση πάχους οδοστρώματος και CBR	- 29 -
3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	- 31 -
3.1. Δειγματοληψία.....	- 32 -
3.2. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου	- 34 -
3.3. Ιδιότητες των μαργαϊκών σχηματισμών της περιοχής του έργου.....	- 38 -

4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	- 42 -
4.1. Ορυκτολογική ανάλυση	- 42 -
4.2. Κοκκομετρική ανάλυση	- 45 -
4.3. Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας	- 51 -
4.3.1. Όριο υδαρότητας.....	- 51 -
4.3.2. Όριο πλαστικότητας	- 56 -
4.3.3. Δείκτης πλαστικότητας	- 59 -
4.4. Γεωτεχνική ταξινόμηση δειγμάτων	- 60 -
4.4.1. Κατάταξη κατά ASTM.....	- 60 -
4.4.2. Κατάταξη κατά AASHTO.....	- 62 -
4.5. Προσδιορισμός CBR.....	- 63 -
4.5.1. Μετρήσεις – Επεξεργασία	- 65 -
4.5.2. Σχέση της τιμής CBR με χαρακτηριστικά εδαφών.....	- 71 -
4.5.3. Αποτελέσματα	- 72 -
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 78 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 80 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την κατασκευή ενός οδοστρώματος βασικό μέλημα είναι η ασφαλής και άνετη κυκλοφορία των οχημάτων πάνω σε αυτό καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Για τον λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους έδρασης, ούτως ώστε να αποφευχθεί μελλοντική αστοχία κατά την διάρκεια λειτουργίας του έργου.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες για την σωστή κατασκευή του οδοστρώματος είναι η αντοχή του εδάφους στις τάσεις που θα ασκούνται από τα διερχόμενα οχήματα. Η αντοχή αυτή προσδιορίζεται με τον λόγο φέρουσας ικανότητας (CBR).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων και του λόγου φέρουσας ικανότητας (CBR) εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή έργου οδοποιίας του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης στην περιοχή Γουβών Ηρακλείου.

Ελήφθησαν δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με την χρήση φασματογράφου XRD (X-Ray Diffraction).

Με σκοπό την ταυτοποίηση και γεωτεχνική τους ταξινόμηση, αρχικά πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση και, προσδιορίστηκαν τα όρια υδαρότητας, πλαστικότητας και ο δείκτης πλαστικότητας.

Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε η γεωτεχνική ταξινόμηση των υλικών ακολουθώντας το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS).

Τελικό βήμα ήταν ο προσδιορισμός του CBR. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπίκνωση των δειγμάτων έγινε σε υγρασίες στο εύρος της βέλτιστης που εκτιμήθηκε με βάση τα όρια Atterberg.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των εργασιών προσδιορισμού του CBR, τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν και τα γεωϋλικά χαρακτηρίστηκαν ως προς την καταλληλότητά τους για την κατασκευή επιχωμάτων οδοποιίας.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

2.1. Κατηγορίες οδοστρώματος

Το φυσικό έδαφος στη μορφή που βρίσκεται δεν είναι ικανό να φέρει τις προερχόμενες από την κυκλοφορία καταπονήσεις και δεν προσφέρει την κατάλληλη επιφάνεια για την ομαλή κίνηση των οχημάτων. Επιπλέον, δεν αντέχει στις κλιματολογικές διακυμάνσεις, την υγρασία, την βροχή κ.λπ., όταν επάνω του κινούνται οχήματα (Κοφίτσας, 2001).

Προκειμένου να ανταπεξέλθει κατασκευάζεται οδόστρωμα.

Ως οδόστρωμα ορίζεται το σύνολο των επαλλήλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος για τη δημιουργία της οδού. Είναι μια σύνθετη κατασκευή που επιτελεί διάφορες λειτουργίες ανάμοιες μεταξύ τους, έχει δε να διανείμει τις πιέσεις από τα φορτία της κυκλοφορίας, έτσι ώστε η καταπόνηση του εδάφους θεμελίωσης να μην υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια (Νικολαΐδης, 2002).

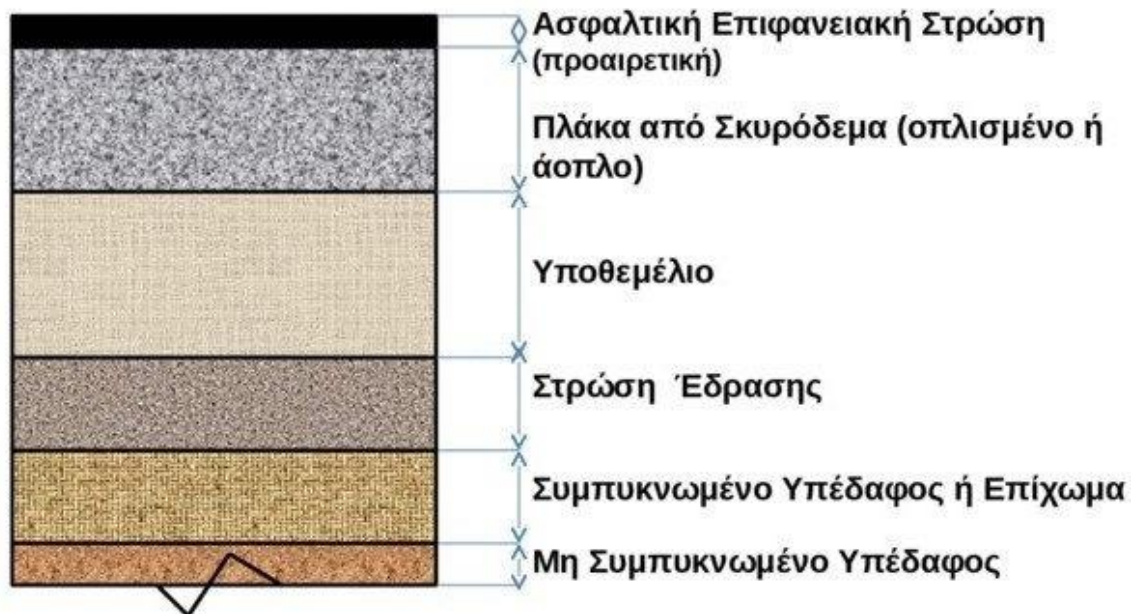
Σημαντικό ρόλο στην κατηγοριοποίηση των οδοστρωμάτων παίζει ο βαθμός ελαστικότητας τους και η ευκαμψία τους, αναφορικά με τον τρόπο κατανομής των φορτίων που ασκούνται από τα κυκλοφορούντα οχήματα. Για τον λόγο αυτό διακρίνονται σε δύσκαμπτα και εύκαμπτα.

2.1.1. Δύσκαμπτα οδοστρώματα

Ως δύσκαμπτα (ή άκαμπτα) χαρακτηρίζονται τα οδοστρώματα που παρουσιάζουν μεγάλη ακαμψία και που αποτελούνται κυρίως από πλάκες σκυροδέματος (Νικολαΐδης, 2002), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

Το φορτίο που ασκείται μεταφέρεται άμεσα στο υπέδαφος σε μεγάλη επιφάνεια.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής, την μη ολισθηρή επιφάνεια, την ομοιόμορφη διανομή των φορτίων κυκλοφορίας και την ελάχιστη δαπάνη συντήρησης (Τσώχος, 1990).



Σχήμα 2.1: Τυπική τομή άκαμπτου οδοστρώματος (Βραχίμης, 2004).

Παραδείγματα δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αποτελούν. Τα οδοστρώματα που είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και τα λιθόστρωτα οδοστρώματα.

2.1.2. Εύκαμπτα οδοστρώματα

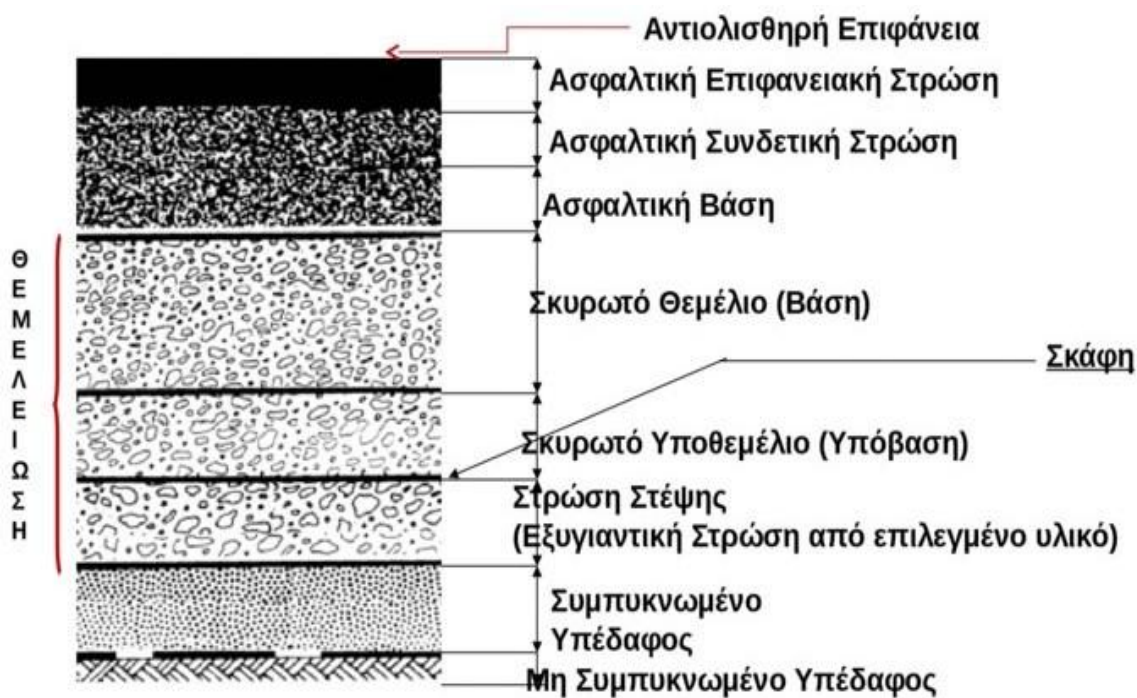
Η κύρια διαφορά των εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τα δύσκαμπτα εμφανίζεται στον τρόπο κατανομής των φορτίων και στη μετάβασή τους στο υπέδαφος. Οι δυνάμεις που ασκούνται θα καθορίσουν και το ολικό πάχος του εύκαμπτου οδοστρώματος, ώστε οι δυνάμεις αυτές να μεταβιβάζονται σε συνεχώς μεγαλύτερη επιφάνεια με σκοπό να μειωθούν μέχρι να γίνουν ανεκτές από το έδαφος έδρασης του οδοστρώματος.

Ως εύκαμπτα οδοστρώματα θεωρούνται (Νικολαΐδης, 2002):

- Τα ασφαλτικά.
- Τα κυκλοφοριόπηκτα.
- Τα δια σταθεροποιήσεως.
- Τα σκυρωτά.

Κατασκευαστικά, η δομή του εύκαμπτου οδοστρώματος χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες, με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά για την κάθε μια ξεχωριστά. Αυτές οι ομάδες στρώσεων (βλέπε Σχήμα 2.2) είναι:

- Η επιφανειακή στρώση.
- Η βάση.
- Η υπόβαση.



Σχήμα 2.2: Τυπική τομή εύκαμπτου οδοστρώματος (Βραχίμης, 2004, από Νικολαΐδη, 2002).

Σε ειδικές περιπτώσεις, όπου το υπέδαφος είναι αρκετά ασθενές, μπορεί να κατασκευαστεί και μια εξυγιαντική στρώση που αποτελεί επιπλέον στρώση μεταξύ του υπεδάφους και της υπόβασης.

Επιφανειακή στρώση

Η κατασκευή της επιφανειακής στρώσης στο οδόστρωμα χρησιμεύει στο να παρέχει μια λεία και ασφαλή επιφάνεια κυκλοφορίας, να είναι αντιολισθητική, να παρουσιάζει αντοχή σε ρηγματώσεις λόγω των φορτίων που κυκλοφορούν, να αντιστέκεται στις

μόνιμες παραμορφώσεις και να συνεισφέρει στην αντοχή των υπολοίπων στρωμάτων. Τέλος, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μη διαπερατή από το νερό, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διείσδυσή του στις υποκείμενες στρώσεις (Νικολαΐδης, 2002).

Χωρίζεται στην:

- Στρώση κύλισης, η οποία προσδίδει στο οδόστρωμα την απαιτούμενη ομαλότητα σε συνδυασμό με αντλιοσθητικά χαρακτηριστικά.
- Την συνδετική στρώση, που αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ στρώσης κυκλοφορίας και της υποκείμενης βάσης.

Βάση

Η βάση αποτελεί το τμήμα του οδοστρώματος το οποίο κατασκευάζεται μεταξύ της υπόβασης και της επιφάνειας της ασφάλτου. Χαρακτηριστικά αυτή η ζώνη αποτελεί το μέσο κατανομής των φορτίων που ασκούνται από την διερχόμενη κυκλοφορία. Επιπλέον, ελαττώνει τις πιέσεις που ασκούνται στα υποκείμενα στρώματα, τόσο ώστε να μην προκληθούν αξιοσημείωτες φθορές.

Η χρήση ασύνδετων ή σταθεροποιημένων αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο στην σωστή συμπίκνωση της ασφάλτου, καθιστώντας την επιφάνεια δύσκαμπτη και με αξιόλογη αντοχή στην κόπωση (Νικολαΐδης, 2002).

Τα υλικά της βάσης που θα χρησιμοποιηθούν ποικίλουν, από ασύνδετα αδρανή μέχρι αδρανή με συνδετικά υλικά όπως άσφαλτο ή τσιμέντο. Τα πρώτα συνήθως συναντώνται στις κατώτερες στρώσεις ενώ στα ανώτερα στρώματα κυρίως ασφαλτομίγματα. Μια ακόμα περίπτωση είναι η κατασκευή της βάσης μονάχα από ασφαλτόμιγμα.

Υπόβαση

Στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλων τάσεων από την ασφατική στρώση τοποθετείται μια επιπλέον στρωμάτωση ακριβώς κάτω από την βάση, η λεγόμενη υπόβαση.

Κύριο μέλημα της είναι η μεταβίβαση των φορτίων στο έδαφος καθώς και η εξασφάλιση της άνετης κυκλοφορίας των εργοταξιακών οχημάτων. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της υπόβασης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως στρώση αποστράγγισης των υδάτων, για παράδειγμα βροχής, που μπορεί να διαπεράσουν τις προαναφερθείσες

επιφάνειες κατά την διάρκεια κατασκευής ή μετά την κατασκευή του οδοστρώματος, με στόχο να διασφαλίσει ότι δεν θα προχωρήσουν στο υπέδαφος.

Ακόμη δρα και ως αντιπαγετική προστατευτική στρώση στην περίπτωση που το έδαφος εκτεθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα υλικά που θα επιλεγούν για την κατασκευή της υπόβασης συνήθως αποτελούνται από κοκκώδη υλικά (όπως για παράδειγμα αμμοχάλικα). Στην περίπτωση που η φέρουσα ικανότητα του εδάφους (CBR) έχει τιμή μεγαλύτερη του 7% η κατασκευή της υπόβασης δεν είναι υποχρεωτική (Παπανδρέου, 2016).

2.2. Τεχνικές προδιαγραφές βάσης – υπόβασης

Το 1964 συντάχθηκαν κατά τα πρότυπα των αντίστοιχων αμερικάνικων προδιαγραφών οδοποιίας οι ελληνικές προδιαγραφές ΠΤΠ 0 150 και 0 155 (ΥΔΕ, 1966).

Αναφέρονται σε αμμοχάλικα, ορυκτά ή θραυστά, με μικρή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προορίζονται κυρίως για την κατασκευή βάσεων και υποβάσεων οδοποιίας.

2.2.1. Κοκκομετρία

Κατά την κοκκομετρική διαβάθμιση ορίζονται πέντε διαβαθμίσεις (Πίνακας 2.1) με την περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκο υλικό και την μέγιστη διάμετρο κόκκων να αυξάνεται και το ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος να μειώνεται.

Το ποσοστό G_{200} , του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 ($d < 0.075$ mm) πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό του ποσοστού G_{40} του διερχόμενου από το κόσκινο No. 40 (Παπασπύρου, 2006).

Στους Πίνακες 2.2 και 2.3 δίνονται οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και άλλες ιδιότητες εδαφικών υλικών, κατά AASHTO M145 (2017) και κατά ASTM D2940 (2010), αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1: Κοκκομετρική ανάλυση σε 5 διαβαθμίσεις (ΥΔΕ, 1966).

Διάμετρος οπών κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%) κατά βάρος				
	A	B	Γ	Δ	E
76.2	100	-	-	-	-
50.8	65 – 100	100	-	-	-
38.1	-	70 – 100	100	-	-
31.7	-	-	-	100	-
25.4	45 – 75	55 – 85	70 – 100	83 – 100	100
19.1	-	50 – 80	60 – 90	65 – 95	70 – 100
9.52	30 – 60	40 – 70	45 – 75	45 – 77	50 – 80
4.76	25 – 50	30 – 60	30 – 60	33 – 63	35 – 65
2.00	20 – 40	20 – 50	20 – 50	23 – 50	25 – 50
0.42	10 – 25	10 – 30	10 – 30	13 – 30	15 – 30
0.075	3 – 10	5 – 15	5 – 15	5 – 15	5 – 15

Πίνακας 2.2: Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και άλλες ιδιότητες εδαφικών υλικών, κατά AASHTO M145 (2017).

Διάμετρος οπών κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%) κατά βάρος δείγματος					
	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ
50	100	100	-	-	-	-
25		65-100	100	-	-	-
9.50		-	70-100	100	-	-
4.75		-	-	-	100	-
2		45-75	55-85	70-100	83-100	100
0.425		-	50-80	60-90	65-95	70-100
0.075		30-60	40-70	45-75	47-77	50-80
Άλλες απαιτήσεις						
Αντοχή Los Angeles						< 50%
Όριο υδαρότητας (για το κλάσμα με d < 0.425 mm)						< 25%
Δείκτης πλαστικότητας						< 6%

Πίνακας 2.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση και άλλες ιδιότητες εδαφικών υλικών, κατά ASTM D2940 (2010).

Διάμετρος οπών κοσκίνου (mm)	Βάση	Υπόβαση
75	-	-
50	100	100
37.5	95 – 100	90 – 100
19	70 – 92	-
10	-	-
9.5	50 – 70	-
5	-	-
4.75	35 – 55	30 – 60
0.6	12 – 25	-
0.075	0 – 8	0 – 12
Άλλες ιδιότητες		
Πλαστικότητα	< 4	< 6
Ισοδύναμο άμμου	> 35	> 30

2.2.2. Υδαρότητα – Πλαστικότητα

Η τιμή του ορίου υδαρότητας (LL) θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του 25%.

Αντίστοιχα, ως δείκτης πλαστικότητας θεωρείται η μικρότερη ποσότητα νερού στην οποία το έδαφος παραμένει στην πλαστική φάση. Η τιμή του δείκτη πλαστικότητας (PI) θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του 4% (Παπασπύρου, 2006).

2.2.3. Ισοδύναμο άμμου

Αποτελεί μέθοδο για τον γρήγορο καθορισμό της σχετικής αναλογίας της λεπτότητας σκόνης αργιλώδους μορφής και της άμμου σε αδρανή υλικά που προορίζονται για υποβάσεις, βάσεις και ασφαλτομίγματα (Νικολαΐδης, 2002)

Το ισοδύναμο άμμου, το οποίο προσδιορίζεται σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο AASHTO T176 (2017), σε κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο Νο. 4 πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 40 ή 50% (Παπασπύρου, 2006).

2.2.4. Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση

Η ανθεκτικότητα του εδάφους σε αποσθρωτικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα σε διαδικασίες ψύξης – θέρμανσης, διαβροχής – ξήρανσης και ψύξης – απόψυξης μετρίεται με την χρήση θεικού μαγνησίου, την λεγόμενη «δοκιμή υγείας» (AASHTO T104, 1999).

Στη δοκιμή αυτή, ένα εργαστηριακό δείγμα αδρανούς υλικού υποβάλλεται σε κυκλική εμβάπτιση σε κορεσμένο διάλυμα θεικού μαγνησίου και στην συνέχεια σε ξήρανση σε κλίβανο. Το δείγμα υποβάλλεται στις αποσταθεροποιητικές επιπτώσεις της επαναλαμβανόμενης κρυστάλλωσης και ενυδάτωσης του θεικού μαγνησίου, μέχρι το εσωτερικό των πόρων του αδρανούς υλικού.

Η αποσάθρωση που προκύπτει από τις διασπαστικές επιδράσεις μετράται από το πόσο υλικό, λεπτότερο από 10 mm σε μέγεθος σωματιδίων, παράγεται. Οι τιμές που λαμβάνονται δεν πρέπει να παρουσιάζουν μείωση του βάρους του υλικού μεγαλύτερη του 12%.

Στρώση εξυγίανσης

Η στρώση εξυγίανσης αποτελεί το τελευταίο κομμάτι του οδοστρώματος μεταξύ του υπεδάφους και της υπόβασης. Κατασκευάζεται στην περίπτωση που το υπέδαφος είναι ασθενές ή πρόκειται για ανομοιογενές υπέδαφος. Συγκεκριμένα αφορά υπέδαφος με φέρουσα ικανότητα (CBR) μικρότερη του 5% και καθίσταται υποχρεωτική στην περίπτωση που είναι μικρότερη του 2.5% (Παπασπύρου, 2011).

Κύριο μέλημα της είναι η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους και η προετοιμασία της επιφάνειας πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το οδόστρωμα.

Τα υλικά κατασκευής της στρώσης εξυγίανσης ποικίλουν ανάλογα με τον σκοπό ύπαρξης της στρώσης. Σε γενικές γραμμές, οποιοδήποτε εδαφικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την στρώση, με κύριο κριτήριο επιλογής να έχει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από εκείνα του υπεδάφους.

Στην πράξη όμως προτιμώνται τα κοκκώδη, στραγγιζόμενα γεωϋλικά, αφενός μεν διότι η συμπίκνωσή τους είναι ευκολότερη και αφετέρου διότι σχηματίζουν πυκνές και ανθεκτικές στρώσεις. Χρησιμοποιούνται φυσικά, ή θραυστά γεωϋλικά, είτε με πλήρη κοκκομετρική διαβάθμιση, είτε μόνο το χονδρόκοκκο κλάσμα (Παπασπύρου, 2011).

Με σκοπό την ορθή κατασκευή των έργων, έχουν νομοθετηθεί από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (πρώην Υπουργείον Δημοσίων Έργων – ΥΔΕ και Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων – ΥΠΕΧΩΔΕ) «Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές» (ΠΤΠ), στις οποίες αναφέρονται οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε οποιοδήποτε δημόσιο έργο, έτσι ώστε να γίνεται ορθή και ασφαλής κατασκευή.

Στην οδοποιία, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην βάση και στην υπόβαση θα πρέπει να ανταποκρίνονται στα κριτήρια αποδοχής που αναφέρονται στις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές: ΠΤΠ Ο 150 και ΠΤΠ Ο 155 (ΥΔΕ, 1966). Οι προδιαγραφές αυτές ακολουθούν τις αντίστοιχες της American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), καθώς και της American Society for Testing and Materials (ASTM).

Το 2009, το Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (ΙΟΚ) συνέταξε υπό την εποπτεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ) τις νεώτερες ελληνικές προδιαγραφές, οι οποίες θα αντικαθιστούσαν τις τότε υπάρχουσες ΠΤΠ Χ1, ΠΤΠ 0150 και ΠΤΠ 0155.

2.3. Επίχωμα

Επίχωμα νοείται η υπερυψωμένη κατασκευή που δημιουργείται με διάστρωση και συμπίκνωση κατάλληλων εδαφικών υλικών, προϊόντων εκσκαφών ή δανείων, σε στρώσεις πάχους τέτοιου, ώστε με τα μέσα συμπίκνωσης που διατίθενται να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπίκνωση (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός επιχώματος κατηγοριοποιούνται με την μέθοδο των κατηγοριών Ε, σύμφωνα με τις «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 02-07-01-00» (βλέπε Πίνακα 2.4).

Πίνακας 2.4: Κατηγορίες E εδαφικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός επιχώματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Κατηγορία Εδαφικού Υλικού	Χαρακτηριστικά Υλικού	Όρια Atterberg	Μέγιστη πυκνότητα κατά την τροποποιημένη δοκιμή συμπίκνωσης (Proctor) Kg/cm^3	C.B.R.	Περιεκτικότητα σε οργανικά	Παρατηρήσεις
E1	Γαιώδες υλικό με μέγιστη διάσταση κόκκου $D < 200 \text{ mm}$ και περιεκτικότητα σε κόκκους $200 > D > 150 \text{ mm}$ μέχρι 25%	$LL < 40$ ή $LL < 65$ και $PI > (0.6LL - 9)$	> 1600	> 3 και διόγκωση $< 3\%$	$< 2\%$	Αποδεκτό
E2	Μέγιστος κόκκος $< 100 \text{ mm}$ Διερχόμενο από No. 200 $< 25\%$	$LL < 40$	> 1940	> 5 και διόγκωση $< 2\%$	$< 1\%$	Κατάλληλο
E3	Μέγιστος κόκκος $< 80 \text{ mm}$ Διερχόμενο από No. 200 $< 25\%$	$LL < 30$ $PI < 10$	-	> 10 και διόγκωση $= 0$	0%	Επίλεκτο Ι
E4	Μέγιστος κόκκος $< 80 \text{ mm}$ Διερχόμενο από No. 200 $< 25\%$	$LL < 30$ $PI < 10$	-	> 20 και διόγκωση $= 0$	0%	Επίλεκτο ΙΙ
E0	Εδαφικό υλικό που δεν ανήκει στις άλλες κατηγορίες					

Η κατασκευή υλοποιείται σε τμήματα κατάλληλων διαστάσεων, ώστε να μπορεί να γίνει χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες επιχωμάτων:

Γαιώδη επιχώματα

Κατασκευάζονται με διάστρωση και συμπίκνωση γαιωδών εδαφικών υλικών σε στρώσεις πάχους τέτοιου ώστε με τα διαθέσιμα μέσα συμπίκνωσης να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπίκνωση και σε τμήματα τέτοια ώστε να μπορεί να γίνει χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης (Σακελλαρίου, 2006).

Βραχώδη επιχώματα

Κατασκευάζονται με διάστρωση και συμπίκνωση πετρωδών υλικών που προέρχονται από εκσκαφές σε βράχο σε στρώσεις πάχους τέτοιου ώστε με τα συμπυκνωτικά μέσα που διατίθενται να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπίκνωση και σε τμήματα τέτοια ώστε να μπορεί να γίνει χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης (Σακελλαρίου, 2006).

Τα κατάλληλα υλικά για την κατασκευή βραχωδών επιχωμάτων περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο γρανίτες, πορφυρίτες, γρανοδιορίτες, γάββρους, διαβάσεις, οφίτες, ανδεδίτες, βασάλτες, δολομίτες, μάρμαρα κ.ά.

Αντίστοιχα, ως ακατάλληλα υλικά χαρακτηρίζονται οι σερπεντίνες, φυλλίτες, ανυδρίτες, γύψος διαλυτοί βράχοι και γενικά πετρώματα τα οποία με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση του καιρού μπορεί να υποστούν αποσυντίθεση, θραυσμό ή κονιοποίηση (Σακελλαρίου, 2006).

Τα επιχώματα (γαιώδη και βραχώδη) χωρίζονται σε τμήματα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5.

2.3.1. Τεχνικές προδιαγραφές επιχωμάτων

Η κατασκευή των επιχωμάτων περιλαμβάνει κατά σειρά τα ακόλουθα στάδια/ διεργασίες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003):

1. Προετοιμασία της επιφάνειας έδρασης.
2. Κατασκευή δοκιμαστικού τμήματος.
3. Διάστρωση υλικών.
4. Συμπύκνωση κατά στρώσεις.

Προετοιμασία της επιφάνειας έδρασης – Κατασκευή δοκιμαστικού τμήματος

Πριν από τη διάστρωση και συμπίκνωση των υλικών των επιχωμάτων γίνεται καθαρισμός, εκρίζωση και απομάκρυνση των ακατάλληλων επιφανειακών υλικών ή φυτικής γης (θάμνοι, ρίζες, ριζόχωμα, φυτική γη με υψηλό ποσοστό οργανικών κ.λπ.), σε όλο το βάθος που απαιτείται, και κατασκευάζεται μέρος του θεμελίου του επιχώματος από κατάλληλα υλικά (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Ως ακατάλληλα επιφανειακά υλικά, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται πριν από τη διάστρωση των υλικών του επιχώματος, θεωρούνται τα ακόλουθα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003):

- Εδαφικά υλικά που περιέχουν οργανικά υλικά σε ποσοστό μεγαλύτερο από 5% κ.β.
- Θιξοτροπικά εδαφικά υλικά (π.χ. ρέουσα άργιλος).
- Διαλυτά εδαφικά υλικά (π.χ. έδαφος που περιέχει ορυκτό αλάτι ή γύψο).

Πίνακας 2.5: Τμήματα επιχωμάτων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

ΟΝΟΜΑΣΙΑ		ΓΑΙΩΔΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ	ΒΡΑΧΩΔΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ
Θεμέλιο		Το τμήμα, που βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετά την εκρίζωση, τον καθαρισμό των ακατάλληλων υλικών και την κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας, ώστε να αγκυρώνεται το επίχωμα στο υποκείμενο έδαφος και επιπλέον στρώση πάχους 0,30 m πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.	Το κατώτερο μέρος του επιχώματος πάχους 0,30 m σε επαφή με το έδαφος στην αρχική του επιφάνεια (όταν δεν υπάρχουν επιφανειακά ακατάλληλα υλικά) και το τμήμα κάτω από αυτή, (μετά από τον ενδεχομένως απαιτούμενο καθαρισμό, εκρίζωση, ή/ και απομάκρυνση ακατάλληλων υλικών) και διαμόρφωση αναβαθμών για αγκύρωση.
Πυρήνας		Το τμήμα μεταξύ θεμελίου και στέψης.	Το τμήμα μεταξύ θεμελίου και μεταβατικού τμήματος.
Μεταβατικό τμήμα			Το τμήμα εκείνο όπου η διαβάθμιση του υλικού των στρώσεων που το αποτελούν, πληρούν ορισμένες απαιτήσεις (φίλτρο) για την αποφυγή διείσδυσης του υλικού της στέψης στο υποκείμενο βραχώδες τμήμα. Το πάχος του είναι 1.00 m, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά στους λοιπούς όρους δημοπράτησης.
Στέψη	Οδικό έργο	Το μέρος του επιχώματος κάτω από τη Στρώση Έδρασης του Οδοστρώματος (ΣΕΟ), που εκτείνεται σε βάθος, από την πάνω επιφάνεια της ΣΕΟ, ίσο προς 0.80 – 1.00 m σύμφωνα με την εκάστοτε μελέτη.	Το μέρος του επιχώματος πάνω από το μεταβατικό τμήμα που κατασκευάζεται από γαιώδη υλικά όπως στα γαιώδη επιχώματα και αποτελεί (ολόκληρο ή μέρος του) τη ΣΕΟ.
	Σιδηροδρομικό έργο	Το μέρος του επιχώματος κάτω από τη Στρώση Διαμόρφωσης (ΣΔ), που εκτείνεται σε βάθος (από την άνω επιφάνειά της) ίσο προς 1.00 m.	Το μέρος του επιχώματος πάνω από το μεταβατικό τμήμα, που κατασκευάζεται από γαιώδη υλικά, όπως στα γαιώδη επιχώματα και ταυτίζεται με τη ΣΔ.

- Ρυπογόνα υλικά (π.χ. βιομηχανικά απόβλητα).

Εάν είναι αναγκαία η κατασκευή επιχώματος απ' ευθείας σε ασταθή, διαταραγμένα εδάφη, ή πάνω σε μαλακές αργίλους, θα λαμβάνονται μέτρα για την σταθεροποίηση ή απομάκρυνση του υλικού αυτού, σύμφωνα με ειδική Γεωτεχνική Μελέτη.

Σε πυθμένες κοιλάδων και πλαγιές αυξημένης υγρασίας πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια για την αποστράγγιση και γενικά για τον περιορισμό και απαγωγή των επιφανειακών (ρυάκια κ.λ.π.), καθώς και των πηγαιών και υπόγειων υδάτων.

Σε εδάφη κορεσμένα και/ή ευπαθή στο νερό, το τμήμα του θεμελίου των επιχωμάτων πρέπει να κατασκευάζεται από ευχερώς αποστραγγιζόμενα υλικά (κατηγοριών E2, E3, E4 ή A1.A2 κατά AASHTO ή βραχώδη προϊόντα ορυγμάτων), σε συνδυασμό με αποστραγγιστικές στρώσεις για την αποφυγή ανόδου του νερού των τριχοειδών.

Παράλληλα θα πρέπει να εξασφαλίζεται η λειτουργία «φίλτρου» μεταξύ του θεμελίου και του υπερκείμενου πυρήνα του επιχώματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Γενικά απαγορεύεται η διάστρωση υλικών σε έδαφος το οποίο έχει μαλακώσει από τη βροχή ή την κυκλοφορία. Στις περιπτώσεις αυτές, το υλικό είτε θα αντικαθίσταται είτε θα επανασυμπυκνώνεται μετά την μείωση του ποσοστού υγρασίας για την επίτευξη βέλτιστης συμπίκνωσης.

Όταν τα επιχώματα εδράζονται σε έδαφος με υψηλή υδραυλική βαθμίδα (π.χ. $i \geq 20\%$) ή σε ήδη κατασκευασμένα επιχώματα, απαιτείται κλιμακωτή εκσκαφή της επιφάνειας έδρασης (αναβαθμοί), σύμφωνα με τη μελέτη εφαρμογής.

Βαθμίδες αγκύρωσης κατασκευάζονται επίσης και στις περιπτώσεις διαπλάτυνσης επιχωμάτων, καθώς και στις περιπτώσεις κατασκευής του επιχώματος σε δυο φάσεις (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003):

- Όταν είναι αναγκαία η κατασκευή βραχώδους επιχώματος απ' ευθείας σε εδάφη ασταθή, διαταραγμένα ή πάνω σε μαλακές αργίλους, λαμβάνονται μέτρα για την εξυγίανση της στρώσης έδρασης, με στερεοποίηση ή απομάκρυνση του υπάρχοντος υλικού.
- Όταν υπάρχει βράχος κοντά στη στάθμη έδρασης του επιχώματος, το υπερκείμενο του βράχου υλικό μπορεί να απομακρύνεται και η έδραση του επιχώματος να γίνεται κατ' ευθείαν πάνω στον βράχο.

Η επιφάνεια έδρασης του επιχώματος θα συμπυκνώνεται επιμελώς σε πυκνότητα ίση κατ' ελάχιστο προς το 90% της μέγιστης πυκνότητας, που επιτυγχάνεται κατά την τροποποιημένη δοκιμή συμπίκνωσης Proctor.

Η συμπίκνωση αυτή, σε περίπτωση που δεν υπάρχει ειδική Γεωτεχνική Μελέτη, θα εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 40 cm και σε πλάτος 2 m πέρα από το πόδι του επιχώματος, ή μέχρι το όριο απαλλοτριώσης, όταν υπάρχουν σχετικοί περιορισμοί πλάτους.

Τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή βραχώδους επιχώματος πρέπει να είναι πετρώδη προϊόντα που προέρχονται από εκσκαφές βραχωδών ορυγμάτων. Στην περίπτωση που τα υλικά προέρχονται από δανειοθαλάμους, η θέση εκσκαφής υποδεικνύεται από την αρμόδια Υπηρεσία και καθίσταται απαραίτητη η έγκρισή της σύμφωνα με την Ειδική Συγγραφή Υποχρεώσεων (ΕΣΥ) και τους λοιπούς ειδικούς όρους δημοπράτησης (Σακελλαρίου, 2006).

Τα πετρώματα από τα οποία προέρχονται τα υλικά κατηγοριοποιούνται σε κατάλληλα, ακατάλληλα και σε αυτά που απαιτείται περαιτέρω μελέτη.

- Στα κατάλληλα πετρώματα περιλαμβάνονται οι γρανίτες, πορφυρίτες, γρανοδιορίτες, γάββροι, ανδεσίτες, βασάλτες, δολομίτες, και τα μάρμαρα.
- Στα ακατάλληλα πετρώματα περιλαμβάνονται σερπεντίνες, φυλλίτες, ανυδρίτες, γύψος, διαλυτοί βράχοι και γενικά τα πετρώματα που αποσυντίθενται με την έκθεσή τους στις επιδράσεις του καιρού ή που θραύονται σε σημαντικό βαθμό ή κονιοποιούνται ή αποκτούν δυσμενή υφή με τη συμπίκνωση. (Σακελλαρίου 2006)

Πριν από οποιαδήποτε χρήση βραχωδών υλικών, ο Ανάδοχος είναι υποχρεωμένος να προσκομίσει στην Υπηρεσία εργαστηριακή μελέτη, στην οποία θα συμπεραίνεται ότι τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι κατάλληλα (Σακελλαρίου, 2006).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών θα πρέπει να ικανοποιεί τις δυο ακόλουθες απαιτήσεις όσο αφορά το σύνολο του σώματος του επιχώματος (Σακελλαρίου, 2006):

- Η μέγιστη διάσταση κόκκου του υλικού δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα 2/3 του πάχους της συμπυκνωμένης στρώσης.
- Η περιεκτικότητα κατά βάρος του υλικού το οποίο διέρχεται από κόσκινο με διάμετρο οπών 1 in να είναι μικρότερη από 30%, ενώ αντίστοιχα η περιεκτικότητα κατά βάρος του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 να είναι μικρότερη

από 10%, με σκοπό την εξασφάλιση ελεύθερης στράγγισης του σώματος του επιχώματος.

Όσον αφορά τον πυρήνα του επιχώματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά κοκκομετρικής διαβάθμισης 0 – 200 mm, με ποσοστό λεπτόκοκκων μικρότερο του 8%. Επιπλέον, η πυκνότητα πρέπει να ελέγχεται επί τόπου με συσκευές μέτρησης, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D2167-84 (1994).

Με βάση τα παραπάνω, το υλικό θα πρέπει να έχει κοκκομετρική καμπύλη σύμφωνη με τα ακόλουθα (ΥΠΕΧΩΔΕ 2006):

- D – Διερχόμενο 90-100%.
- D/4 – Διερχόμενο 45-60%.
- D/16 – Διερχόμενο 25-45%.
- D/64 – Διερχόμενο 15-35%.

Όπου, D είναι η μέγιστη διάσταση των κόκκων.

Μορφή τεμαχίων

Κατά την κατασκευή του επιχώματος θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση υλικών με ποσοστό τεμαχίων ακατάλληλου σχήματος, ίσου ή μεγαλύτερου από 30%. Συγκεκριμένα τα τεμάχια θεωρούνται ακατάλληλα όταν ισχύει η ακόλουθη σχέση (Σακελλαρίου, 2006):

$$\frac{L + G}{2 \cdot E} \geq 3 \quad [2.1]$$

Όπου, L η μέγιστη απόσταση μεταξύ δυο παράλληλων επιπέδων που εφάπτονται στον κόκκο,

G η ελάχιστη διάμετρος κυκλικής οπής δια της οποίας μπορεί να διέλθει ο κόκκος, και

E η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο παράλληλων επιπέδων που εφάπτονται στον κόκκο.

Οι παραπάνω τιμές μπορούν να προσδιορίζονται προσεγγιστικά και δεν είναι υποχρεωτικό να μετρώνται σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.

Διάστρωση των υλικών

Η διάστρωση γίνεται σε επάλληλες στρώσεις ομοιόμορφου πάχους παράλληλες προς την επιφάνεια θεμελίωσης και σε όλο το πλάτος του επιχώματος. Οι επάλληλες στρώσεις του υλικού επίχωσης θα διαμορφώνονται με πάχος έως 0.2 m.

Το υλικό κάθε στρώσης εκφορτώνεται στο έργο πάνω σε τμήμα ήδη διαστρωμένο, της ίδιας στρώσης και κοντά στο άκρο προώθησης (μέτωπο κατασκευής). Από τη θέση αυτή προωθείται μέχρι το μέτωπο κατασκευής και διαστρώνεται πέραν αυτού με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο τυχόν διαχωρισμός του (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Ειδικότερα, στα τελικά όρια του επιχώματος, ο διαχωρισμός των υλικών πρέπει να αποφεύγεται σχολαστικά, με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας κοιλοτήτων μεταξύ των κόκκων, οι οποίες θα επιφέρουν προβλήματα στην κατασκευή της αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ομοίως, συνάγματα μέγιστων κόκκων δεν πρέπει να συσσωρεύονται στα όρια του επιχώματος με το μητρικό πέτρωμα.

Οι εργασίες ορυγμάτων θα πρέπει να εκτελούνται μόνο σε περιόδους που δεν βρέχει, ώστε να είναι δυνατή χωρίς κινδύνους διαβροχής η παράλληλη εργασία χρησιμοποίησης των προϊόντων ορυγμάτων για την κατασκευή επιχωμάτων χωρίς προσωρινή απόθεση (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Σε χειμερινές περιόδους είναι δυνατόν να ζητηθεί (ανάλογα με τα προβλήματα ευαισθησίας των προϊόντων ορυγμάτων σε διαβροχή) να εφαρμοστεί η λεγόμενη «χειμερινή μέθοδος» (winter method) εκσκαφής, σύμφωνα με την οποία η εκσκαφή γίνεται σε έντονα κεκλιμένες στρώσεις, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα αποτελέσματα της διαβροχής στις επιφάνειες ορυγμάτων, που θα είναι εκτεθειμένες στις βροχοπτώσεις.

Όταν υπάρχει υπόνοια βροχής, θα πρέπει να προωθείται άμεσα η συμπίκνωση των διαστρωμένων υλικών επιχωμάτων, ώστε να «σφραγισθεί» η εκτεθειμένη στη βροχή στρώση, διαμορφώνοντας και κατάλληλη κλίση της στρώσης για την απορροή των νερών (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Συμπύκνωση κατά στρώσεις

Για την συμπύκνωση του επιχώματος, χρησιμοποιούνται ελκυσόμενοι δονητικοί ή αυτοκινούμενοι δονητικοί οδοστρωτήρες (towed vibratory rollers ή self propelled vibratory rollers), με στατικό γραμμικό φορτίο του τύμπανου και του φερόμενου

τμήματος του πλαισίου μεγαλύτερο από 25 kg/cm (κατηγορία V2 και άνω των Γαλλικών Προδιαγραφών Οδοποιίας) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Η συμπίκνωση θεωρείται ότι ολοκληρώνεται, όταν μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων των μηχανημάτων συμπίκνωσης, που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, δεν μετράται υποχώρηση μεγαλύτερη από 0.5 cm στο θεμέλιο, τον πυρήνα και το μεταβατικό τμήμα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατικοί οδοστρωτήρες με κυλίνδρους με ορθογώνιο πλέγμα σιδερένιων ράβδων (grid rollers) με στατικό φορτίο του κυλίνδρου μεγαλύτερο από 50 kg/cm.

Η υποχώρηση μετριέται με χαλύβδινο μάρτυρα διαστάσεων 40 × 40 cm, από λαμαρίνα πάχους τουλάχιστον 15 mm, με κατάλληλη διαμόρφωση έδρασης. Ο τύπος μάρτυρα που χρησιμοποιείται, εξασφαλίζει την κατά το δυνατόν οριζόντια διατήρησή του κατά τη διέλευση των μηχανημάτων συμπίκνωσης.

Οι μάρτυρες τοποθετούνται στις θέσεις υψομετρικού ελέγχου και μετά την ολοκλήρωση της συμπίκνωσης ελεγχόμενης στρώσης αφαιρούνται, για να επαναχρησιμοποιηθούν.

Κατά τη γεωτεχνική μελέτη πρέπει να προσδιορίζεται η ποιότητα των υλικών εκσκαφής των γαιωδών ή γαιω-ημιβραχωδών πρανών των ορυγμάτων (των βραχωδών προϊόντων εκσκαφών, θεωρουμένων ως «κατάλληλων υπό προϋποθέσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης»), για την επαναχρησιμοποίησή τους στην κατασκευή επιχωμάτων σε άλλα σημεία της χάραξης ενός δρόμου (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

2.3.2. Αντιδιαβρωτική προστασία πρανών

Η αντιδιαβρωτική προστασία των πρανών των επιχωμάτων πρέπει να μελετάται σε συνδυασμό με την μελέτη φύτευσης. Περιλαμβάνει έλεγχο της ταχύτητας απορροής νερών στο πρανές, σε σχέση με την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών, τον συντελεστή τραχύτητας και την απαίτηση σχεδιασμού χρήσης ειδικών βιοαποικοδομήσιμων υλικών (π.χ. γιούτα) ή, σε περίπτωση που αυτά δεν θεωρούνται αποτελεσματικά, άλλων γεωσυνθετικών υλικών (π.χ. γεωκυψέλες, γεωπλέγματα) με παράλληλη υδροφύτευση (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Καθορίζονται οι συνθήκες των υπογείων νερών (μέγιστη στάθμη 50-ετίας, μέγιστη ετήσια στάθμη) και προσδιορίζονται οι απαιτήσεις αποστράγγισης, ταπείνωσης στάθμης και στρώσης στράγγισης στην διεπιφάνεια θεμελίωσης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Για θεμελιώσεις επί του εδάφους, οι υπολογισμοί ευστάθειας (βραχυχρόνιας / μακροχρόνιας) πρέπει να εξετάζουν επιφάνειες θραύσης που διέρχονται μέσα από το υλικό της θεμελίωσης. Πρέπει να προσδιορίζεται το μέγεθος της μακροχρόνιας καθίζησης καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος εξέλιξης.

Για επιχώματα υψηλότερα από 10 m, πρέπει επίσης να εξετάζεται η καθίζηση του επιχώματος και κυρίως η διαφορική συνίζηση μεταξύ του επιχώματος και των γειτονικών κατασκευών. Εκεί όπου ο απαιτούμενος χρόνος καθιζήσεων πιθανόν να είναι σημαντικός σε σχέση με τον προγραμματισμό της εκτέλεσης του έργου, πρέπει να μελετώνται μέθοδοι επιτάχυνσης της καθίζησης (π.χ. προφόρτιση, αποστράγγιση της θεμελίωσης) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Εάν δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό από τον Κύριο του Έργου ή τον Μελετητή της Αποχέτευσης – Αποστράγγισης και Οδοποιίας, προτείνεται η τιμή των 75 mm ως επιτρεπόμενη παραμένουσα καθίζηση. Όπου υπάρχουν πολύ μαλακά υλικά, πρέπει να εξετάζονται και άλλες εναλλακτικές λύσεις εκτός από τις λύσεις απομάκρυνσης και αντικατάστασής τους, που γενικά αναφέρονται στην βελτίωση του υπεδάφους θεμελίωσης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Επιπλέον, υπολογίζεται το δυναμικό της ρευστοποίησης, έτσι ώστε να ποσοτικοποιείται η σοβαρότητα του κινδύνου ρευστοποίησης και να εκτιμάται η αναγκαιότητα σχεδιασμού κατάλληλων μέτρων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Όπου το αρχικό έδαφος θεμελίωσης είναι επικλινές (έχει εγκάρσια κατωφερική κλίση σε σχέση με την οδό), πρέπει να εξετάζεται η υποστήριξη του ποδός του επιχώματος (π.χ. οπλισμένο έδαφος, τοίχοι βαρύτητας, τοίχοι με συρματοκιβώτια), για να περιοριστεί το ύψος του επιχώματος και να εμποδιστεί η ολίσθηση του επιχώματος στο επικλινές φυσικό πρανάς. Τέτοιες κατασκευές πρέπει επίσης να μελετώνται για τον περιορισμό του ύψους των πρानών, ώστε να ανταποκριθούν στους Περιβαλλοντικούς Όρους.

Σε περίπτωση διαπλάτυνσης υπάρχοντος επιχώματος, μελετάται η εφαρμογή εκσκαφών με βαθμιδωτό τρόπο με την κατασκευή βαθμίδων αγκύρωσης, όπως προβλέπεται και σε

φυσικά κεκλιμένα πρανή. Στις περιπτώσεις αυτές και για εγκάρσιες κλίσεις εδάφους μεγαλύτερες του 20%, μελετώνται επίσης βαθμίδες αγκύρωσης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

2.4. Κατάταξη υλικών

Κατά τη γεωτεχνική μελέτη πρέπει να προσδιορίζεται η ποιότητα των υλικών εκσκαφής των γαιωδών ή γαιω-ημιβραχωδών πρανών των ορυγμάτων (των βραχωδών προϊόντων εκσκαφών, θεωρουμένων ως «κατάλληλων υπό προϋποθέσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης»), για την επαναχρησιμοποίηση τους στην κατασκευή επιχωμάτων σε άλλα σημεία της χάραξης ενός δρόμου (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Προς τούτο, προτείνεται να ακολουθείται αρχικά μία κατάταξη καταλληλότητας υλικών με βάση την κοκκομετρική του διαβάθμιση και τα όρια Atterberg (κατάταξη οδοποιίας κατά AASHTO M145 (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2.6: Κατάταξη καταλληλότητας εδαφικών υλικών για κατασκευή επιχωμάτων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Κατάταξη κατά AASHTO (M145)												
Γενική κατάταξη	Κοκκώδη υλικά (35% λιγότερο διερχόμενα από κόσκινο N200)							Ιλυοαργιλικά Υλικά (με ποσοστό διερχομένων σε ποσοστό μεγαλύτερο από 35% από κόσκινο N200)				
	A-1			A-2							A-7	
Κατάταξη κατά ομάδες *	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5	A-7-6
Ανάλυση κοσκίνων: ποσοστό % διερχομένων:												
No10 (2,00mm)	50 μεγ.											
No40 (0,425mm)	30 μεγ.	50 μεγ.	51 ελαχ.									
No200 (0,075mm)	15 μεγ.	25 μεγ.	10 μεγ.	35 μεγ.	35 μεγ.	35 μεγ.	35 μεγ.	36 ελαχ.	36 ελαχ.	36 ελαχ.	36 ελαχ.	
Χαρακτηριστικά κλάσματος διερχομένου από το κόσκινο N40 (0,425 mm)												
Όριο υδαρότητας				40 μεγ.	41 ελαχ.	40 μεγ.	41 ελαχ.	40 ελαχ.	41 ελαχ.	40 μεγ.	41 ελαχ.	
Δείκτης πλαστικότητας	6 μεγ.		NP	10 μεγ.	10 μεγ.	11 ελαχ.	11 ελαχ.	10 μεγ.	10 μεγ.	11 ελαχ.	11 ελαχ.	†
Δείκτης Ομάδας ‡	0		0	0		4 μεγ.		8 μεγ.	12 μεγ.	16 μεγ.	20 μεγ.	
Συνήθεις τύποι σημαντικών επιμέρους υλικών που αποτελούν το σύνολο του εδαφικού υλικού	Λιθώδη τεμάχια αμμοχάλικων και άμμου		Λεπτά υλικά	Ιλυοαργιλικά αμμοχάλικα και άμμος				Ιδιώδη εδάφη			Αργιλικά εδάφη	
Γενική κατάταξη σε υποκατηγορίες	Εξαιρετικά έως καλά							Αποδεκτά έως πτωχά				

Η ομάδα A-1 περιλαμβάνει καλά διαβαθμισμένο χαλίκι με λεπτόκοκκη άμμο με λίγο ή καθόλου πλαστικό συνδετικό υλικό.

- Η υποομάδα A-1-α περιλαμβάνει θραύσματα από πέτρα και χαλίκια, με ή χωρίς λεπτόκοκκα.
- Η υποομάδα A-1-β περιλαμβάνει κυρίως χοντρόκοκκη άμμο με ή χωρίς λεπτόκοκκα.

Όταν τοποθετούνται και συμπιέζονται σωστά, τα υλικά αυτά λειτουργούν καλά ως υποβάσεις οδοποιίας, καθώς διαθέτουν μεγάλη αντοχή όταν τοποθετούνται σωστά.

- Η ομάδα A-3 είναι ως επί το πλείστον κακή διαβαθμισμένη λεπτή άμμος με λίγα λεπτόκοκκα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κακή διαβαθμισμένη άμμος, με λιγοστά περιεχόμενα χαλίκια, που συναντάται σε παραλιακές περιοχές ή ποταμούς. Τα υλικά A-3 διαθέτουν επιθυμητά χαρακτηριστικά αντοχής, αλλά η συμπίεση τους μπορεί να είναι δύσκολη, λόγω της ομοιομορφίας τους.

Η ομάδα A-2 αποτελείται από μεταβατικά κοκκώδη υλικά, τα οποία αποτελούνται σε ποσοστό μικρότερο από 35% από λεπτόκοκκα.

- Οι υποομάδες A-2-4 και A-2-5 έχουν μη πλαστικά λεπτόκοκκα
- Οι υποομάδες A-2-6 και A-2-7 έχουν λεπτόκοκκα παρόμοια με τα εδάφη της ομάδας A-6 ή A-7, δηλαδή λεπτόκοκκα πιο πλαστικά.

Τα υλικά της ομάδας A-2, τα οποία έχουν «δείκτη ομάδας» (GI) έως 4. Μπορεί να θεωρηθούν από καλά έως μέτρια όσο αφορά την χρήση τους ως υπόβαση. Η ευαισθησία τους στον παγετό αποτελεί πρόβλημα.

Τα εδάφη της ομάδας A-4 είναι μη πλαστική έως μέτρια πλαστική ιλύς. Η περιεκτικότητα σε άμμο και χαλίκια μπορεί να κυμανθεί έως και 64%. Ο «δείκτης ομάδας» (GI) κυμαίνεται μέχρι 8, με χαμηλότερες τιμές όταν υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα σε χαλίκι και άμμο.

Τα εδάφη της ομάδας A-5 είναι παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή των κόκκων με την ομάδα A-4, αλλά έχουν υψηλότερα όρια υδαρότητας. Η ελαστική φύση αυτών των εδαφών καθώς και η έλλειψη της άμμου, προκαλεί αύξηση του GI σε τιμές έως 12. Η ευαισθησία στον παγετό επηρεάζει και εδώ τη χρήση αυτών των εδαφών ως υπόβαση.

Τα εδάφη της ομάδας A-6 είναι άργιλοι, συνήθως πλαστικές με 75% ή περισσότερο να περνάνε από το κόσκινο No. 200 ($d < 0.075\text{mm}$). Λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε άμμο (έως 64%), το GI μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλές τιμές αλλά στην περίπτωση που το έδαφος έχει χαμηλά ποσοστά άμμου μπορεί να φτάσει και μέχρι το 16.

Συνήθως υπάρχουν σημαντικές μεταβολές του όγκου μεταξύ ξηρής και υγρής κατάστασης. Τα υλικά αυτά (A-6) μπορούν να συμπιεστούν επαρκώς σε κατάλληλη περιεκτικότητα υγρασίας, αλλά σε γενικές γραμμές απαιτείται η στρώση σε μεγαλύτερο πάχος.

Τα εδάφη της ομάδας A-7 μπορεί να είναι πολύ πλαστικά και υπόκεινται σε μεγάλη μεταβολή όγκου με μεταβολή στην περιεκτικότητα σε υγρασία. Συνήθως είναι αδιαπέρατα, ενώ η αντοχή τους μπορεί να είναι από χαμηλή έως υψηλή.

Τα εδάφη A-7 χρησιμοποιούνται ως υποβάσεις στην περίπτωση που δεν υπάρχει άλλο υλικό διαθέσιμο.

Τέλος, τα εδάφη της ομάδας A-8 είναι τύρφη ή μολυσμένο χώμα με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά. Αυτά τα εδάφη είναι ανεπιθύμητα για τις υποβάσεις και απαιτείται αφαίρεση.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω κατάταξη, καταλληλότερα υλικά για την κατασκευή επιχωμάτων είναι αυτά που κατατάσσονται στις κατηγορίες A-1, A-2-4, A-2-5 και A-3 κατά AASHTO, σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM D3282-93 (2004).

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαρκείς διαθέσιμες ποσότητες των παραπάνω υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά από τις κατηγορίες A-2-6, A-2-6 και A-4.

Στην περίπτωση έλλειψης επαρκών ποσοτήτων και των ανώτερων υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά κατηγορίας A-6 ή A-7.

Τέλος, εάν δεν υπάρχουν επαρκείς ποσότητες υλικών από όλες τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν, υλικά της κατηγορίας A-5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μετά την σύνταξη ειδικής μελέτης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Υλικά τα οποία δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν ως υλικά επιχωμάτων, είναι τα ακόλουθα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006):

- Τυρφώδη ή οργανικά εδάφη, με ποσοστό σε οργανικά υλικά $> 5\%$ κ.β.
- Λεπτόκοκκα εδάφη που παρουσιάζουν τάση διόγκωσης > 100 kPa, σε συνδυασμό με παραμόρφωση ελεύθερης διόγκωσης $> 3\%$, κατά την δοκιμή CBR.
- Θιξοτροπικά εδάφη (π.χ. υπερευαίσθητη άργιλος), καθώς και εδάφη με περιεχόμενο ποσοστό διατομικής γης ή φυλλαρίων μαρμαρυγίας $> 20\%$.

- Εδάφη που περιέχουν υδατοδιαλυτικά ορυκτά, όπως ορυκτό αλάτι ή γύψο, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 2%.
- Ρυπογόνα υλικά (π.χ. βιομηχανικά υποπροϊόντα που περιέχουν ρύπους).

Επιπλέον τα γεωειδή υλικά για την στρώση έδρασης του οδοστρώματος σε επιχώματα οδικών έργων, κατατάσσονται στις 5 κατηγορίες (E0, E1, E2, E3 και E4) που δίνονται στον Πίνακα 2.4.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.7, τα υλικά των κατηγοριών E3 και E4 χρησιμοποιούνται κατά το πλείστον για την κατασκευή της στρώσης έδρασης, εφόσον δεν ορίζεται αλλιώς από τη μελέτη.

Τα υλικά κατηγορίας E0, απαγορεύεται γενικά να χρησιμοποιούνται για την στρώση έδρασης, χωρίς προηγουμένως να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία (βελτίωση).

Το πάχος του οδοστρώματος καθορίζεται από την μελέτη, ανάλογα και το είδος του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την στρώση έδρασης.

Σχετικά με την καταλληλότητα εδαφικών υλικών για την κατασκευή επιχωμάτων υπερισχύουν σε κάθε περίπτωση τα σχετικά προβλεπόμενα στις εκάστοτε ισχύουσες προδιαγραφές κατασκευής έργων.

Πίνακας 2.7: Ταξινόμηση εδαφικών υλικών για κατασκευή σώματος επιχωμάτων (δεν περιλαμβάνονται βραχώδη προϊόντα) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ	% ΥΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧ. ΑΠΟ #200	ΟΡΙΑ ATTERBERG	CBR	ΔΙΟΓΚΩΣΗ %	ΟΡΓΑΝΙΚΑ %	ΚΑΤΑΛΛ. ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ
E4	Μέγιστος κόκκος ≤ 8 cm	$\leq 25\%$	LL ≤ 30 PI ≤ 10	> 20	~ 0	~ 0	ΑΡΙΣΤΟ
E3	Μέγιστος κόκκος ≤ 8 cm	$\leq 25\%$	LL ≤ 30 PI ≤ 10	> 10	~ 0	~ 0	ΠΟΛΥ ΚΑΛΟ
E2	Μέγιστος κόκκος ≤ 10 cm	$\leq 35\%$	LL ≤ 40	> 5	$\leq 2\%$	< 1	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ
E1	Μέγιστος κόκκος ≤ 20 cm. Υλικό με κόκκους μεταξύ 20 cm και 15 cm \leq 25%		LL ≤ 40 PI ≤ 15 ή LL ≤ 65 PI $> 0,6 \cdot LL - 9$	> 3	$\leq 3\%$	< 2	ΑΠΟΔΕΚΤΟ
E0	Υλικό που δεν ανήκει στις παραπάνω κατηγορίες						ΑΠΟΔΕΚΤΟ ΥΠΟ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ

LL = Όριο Υδαρότητας (E105-86 Μέθοδος)

PI = Δείκτης Πλαστικότητας (E105-86 Μέθοδος 6)

#200 = Κόσκινο με άνοιγμα βροχίδας 0,074 mm

CBR = Καλιφορνιακός λόγος φερόνσης ικανότητας (E105-86 Μέθοδος 11)

ΔΙΟΓΚΩΣΗ = Προσδιορίζεται κατά το στάδιο της δοκιμής CBR

ΟΡΓΑΝΙΚΑ = Κατά τη μέθοδο AASHTO T194

2.5. Βαθμός συμπίκνωσης

Ορίζεται ως ο λόγος της ξηρής πυκνότητας του εδάφους που επιτυγχάνεται επί τόπου (στο εργοτάξιο) προς αυτήν που έχει υπολογιστεί στο εργαστήριο και εκφράζεται επί τις εκατό (%).

Ο βαθμός συμπίκνωσης αποτελεί το πρώτο κριτήριο αποδοχής μιας συμπτυκνωμένης στρώσεως, το οποίο προτάθηκε από τον R.R. Proctor το 1933, σε μια προσπάθεια για πειραματικό προσδιορισμό και έλεγχο των αποτελεσμάτων της συμπίκνωσης (Παπασπύρου, 2006).

Συνήθως ο επιθυμητός βαθμός συμπίκνωσης είναι 90 με 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας (Σαμπατακάκης κ.ά., 2011). Όμως, για λόγους ασφαλείας, στις σύγχρονες

κατασκευαστικές μελέτες ο βαθμός συμπύκνωσης επιλέγεται να είναι λίγο μεγαλύτερος (Πίνακας 2.8).

Πίνακας 2.8: Βαθμός συμπύκνωσης στρώσεων οδοποιίας (Παπασπύρου, 2006).

Τμήμα	Σύμφωνα με τις ΠΤΠ 0 155, 0 150 (ΥΔΕ, 1966)	Σύμφωνα με τις σύγχρονες τάσεις
Βάση	95%	95-98%
Υπόβαση	95%	95-98%
Στρώση έδρασης	95%	95%
Επίχωμα οδοποιίας	90%	90-92%
Σκάφη έδρασης	90%	90%

2.6. Δείκτης CBR

Ο Καλιφορνιακός Λόγος Φέρουσας Ικανότητας (California Bearing Ratio, CBR) αποτελεί μια εμπειρική δοκιμή διεύθυνσης η οποία δίνει μια αρχική εικόνα της μηχανικής αντοχής του φυσικού εδάφους, στο επίπεδο βάσεως και υποβάσεως.

Ο δείκτης CBR αναπτύχθηκε από τον O.J. Porter και πρωτοχρησιμοποιήθηκε από το Υπουργείο Μεταφορών την Καλιφόρνιας (California Department of Transportation) των Η.Π.Α. το 1928, στον τομέα αυτοκινητοδρόμων, με σκοπό να εκτιμηθεί η επιλογή των εδαφών ως υλικά έδρασης στα έργα οδοποιίας. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τις Αμερικάνικες δυνάμεις, ώστε να βελτιστοποιηθεί η κατασκευή των διαδρόμων απογείωσης και προσγείωσης των αεροσκαφών.

Η συγκεκριμένη μέθοδος συνιστάται κυρίως για τον προσδιορισμό της τιμής του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR) των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων και διαδρόμων αεροδρομίων όταν βρίσκονται στην φυσική τους κατάσταση, χωρίς διατάραξη και με την φυσική τους υγρασία. Αποτελεί δηλαδή, την άμεση μέτρηση αντοχής σε διεύθυνση εμβόλου, η οποία είναι συνάρτηση της συμπεστότητας και της διατμητικής αντοχής της στρώσης (Παπασπύρου, 2006).

Η διαδικασία της μεθόδου περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο ASTM D1883-99 (1999) όσο αναφορά την εκτέλεση σε εργαστήριο, καθώς και στο πρότυπο ASTM D4429-09a (2018), για μέτρηση επί τόπου του έργου.

Στον Πίνακα 2.9 δίνεται το εύρος τιμών CBR ανάλογα με την κατηγορία του εδαφικού υλικού.

Πίνακας 2.9: Εύρος τιμών CBR ανάλογα με την κατηγορία του εδαφικού υλικού (AASHTO T193, 2003).

Τύπος εδαφικού υλικού	Κατηγορία εδάφους (σύμβολο)	Εύρος τιμής CBR
Χονδρόκοκκο	Καλά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικες με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα (GW)	40 – 80
	Ομοιόμορφοι χάλικες ή αμμοχάλικο με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα (GP)	30 – 60
	Ιλυώδεις χάλικες. Μίγματα χαλικιών-άμμου-αργίλου (GM)	20 – 60
	Αργιλώδεις χάλικες. Μίγματα χαλικιών-άμμου-αργίλου (GC)	20 – 40
	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα λεπτόκοκκα (SW)	20 – 40
	Ομοιόμορφοι άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα (SP)	10 – 40
	Ιλυώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου-ιλύος (SM)	10 – 40
	Αργιλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου-αργίλου (SC)	5 – 20
Λεπτόκοκκο	Ανόργανες ιλείς πολύ λεπτές άμμοι, ιλυώδεις και αργιλώδεις άμμοι (ML)	≤ 15
	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας (CL LL < 50%)	≤ 15
	Οργανικές ιλείς πολύ λεπτές άμμοι, ιλυώδεις και αργιλώδεις άμμοι (OL)	≤ 5
	Ανόργανες συχνά μαρμαρυγιακές ιλείς υψηλής πλαστικότητας (MH)	≤ 10
	Ανόργανες άργιλοι υψηλής πλαστικότητας (CH LL > 50%)	≤ 15
	Οργανικές άργιλοι μέσης έως υψηλής πλαστικότητας (OH)	≤ 5

2.6.1. Επί τόπου δοκιμή

Σύμφωνα με τη δοκιμή πεδίου, η μέτρηση γίνεται κατευθείαν πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος με την βοήθεια μιας συσκευής CBR (δυναμομετρικός δακτύλιος και έμβολο), η οποία είναι προσαρμοσμένη επάνω σε φορτηγό που λειτουργεί ως αντίβαρο (Φωτογραφία 2.1).



Φωτογραφία 2.1: Επί τόπου δοκιμή CBR (www.subsurface.co.uk).

Η τιμή του CBR επηρεάζεται αρκετά από την διαφοροποίηση της κοκκομετρίας του υλικού, από το ποσοστό υγρασίας του και την τυχόν διόγκωση του εδάφους. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται σε διάφορα σημεία του έργου για την απόκτηση μεγαλύτερου εύρους πληροφοριών.

Παρόλα αυτά απαιτείται μεγάλη εμπειρία και σωστή αξιολόγηση του αποτελέσματος.

Επιμέρους προϋποθέσεις για την εκτέλεση της επί τόπου δοκιμής είναι (Μαρσέλλος, 1990):

- Πραγματοποίηση δειγματοληψίας του εδάφους για την κοκκομετρική ανάλυσή του και την εύρεση του δείκτη πλαστικότητας. Με το τρόπο αυτό γίνεται κατάταξη του εδάφους, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO M145 (2017) και σύγκρισή του με το υλικό στο οποίο έγινε εργαστηριακό CBR.
- Εκτέλεση επί τόπου δοκιμής προσδιορισμού επί-τόπου πυκνότητας για την εύρεση του βαθμού συμπίκνωσης του υλικού και την ανάλογη αξιολόγηση του αποτελέσματος.

- Προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας του εδάφους, για την σύγκριση της με την βέλτιστη υγρασία κατά Proctor και την υγρασία του δοκιμίου στο εργαστήριο μετά το 4ήμερο υδρεμποτισμό του υλικού.

2.6.2. Διαφορές επί τόπου και εργαστηριακής δοκιμής

Η σημαντικότερη διαφορά επί τόπου και εργαστηριακής δοκιμής είναι το γεγονός ότι η εργαστηριακή δοκιμή γίνεται σε δοκίμια ομοιόμορφα, συμπαγωμένα στη βέλτιστη υγρασία τους με δεδομένη ενέργεια συμπίκνωσης, ενώ η επί τόπου δοκιμή γίνεται σε διάφορα σημεία του εδάφους, τα οποία έχουν συμπακνωθεί από οδοστρώτηρα σε άγνωστο αριθμό διελεύσεων και άρα με διαφορετική υγρασία και βαθμό συμπίκνωσης.

Επιπλέον, στο εργαστήριο τα δοκίμια υποβάλλονται σε υδρεμποτισμό τεσσάρων (4) ημερών ώστε να προσομοιώνονται περιπτώσεις κορεσμού του εδάφους από μεγάλες ποσότητες νερού (έντονες βροχοπτώσεις, πλημμύρες) που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την περίοδο εκτέλεσης του έργου. Στην επί τόπου δοκιμή, το έδαφος, ανάλογα της εποχής που γίνεται η δοκιμή, μπορεί να είναι είτε ξηρό (όταν πρόκειται για δοκιμή κατά την θερινή περίοδο) με αποτέλεσμα πολύ μεγάλες συγκριτικά τιμές CBR, είτε υγρό (χειμερινή περίοδος) με χαμηλές τιμές CBR.

Επίσης, στο εργαστήριο γίνεται αλλοίωση του φυσικού υλικού, διότι αυτό κοσκινίζεται πριν την δοκιμή από το κόσκινο 3/4" (19 mm) και γίνεται αντικατάσταση του χονδρόκοκκου αυτού υλικού με υλικό διερχόμενο από κόσκινο 3/4" και συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 4 (4.75 mm). Αντίθετα στην επί τόπου δοκιμή συμπακνώνεται το πραγματικό υλικό χωρίς καμία αλλοίωση, με πιθανότητα αύξησης της ποσότητας χονδρόκοκκου υλικού ή κροκάλων κάτω από το έμβολο του CBR.

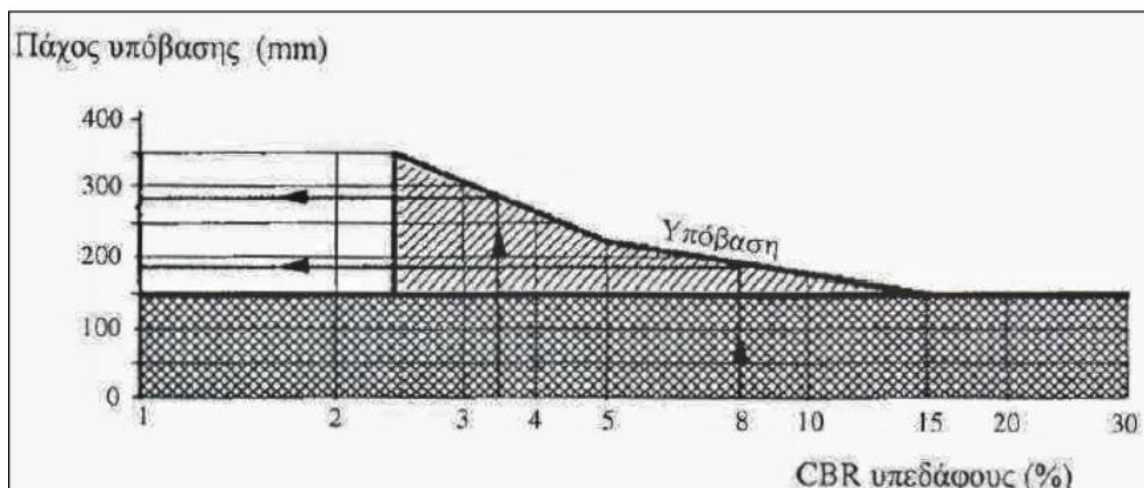
Τέλος, η εργαστηριακή δοκιμή είναι χρονοβόρα σε σύγκριση με την επί τόπου δοκιμή, η οποία πραγματοποιείται μέσα σε 0.5 – 1 ώρα, με την προϋπόθεση της ύπαρξης φορτηγού για αντίδραση (Μαρσέλλος, 1990).

2.7. Σχέση πάχους οδοστρώματος και CBR

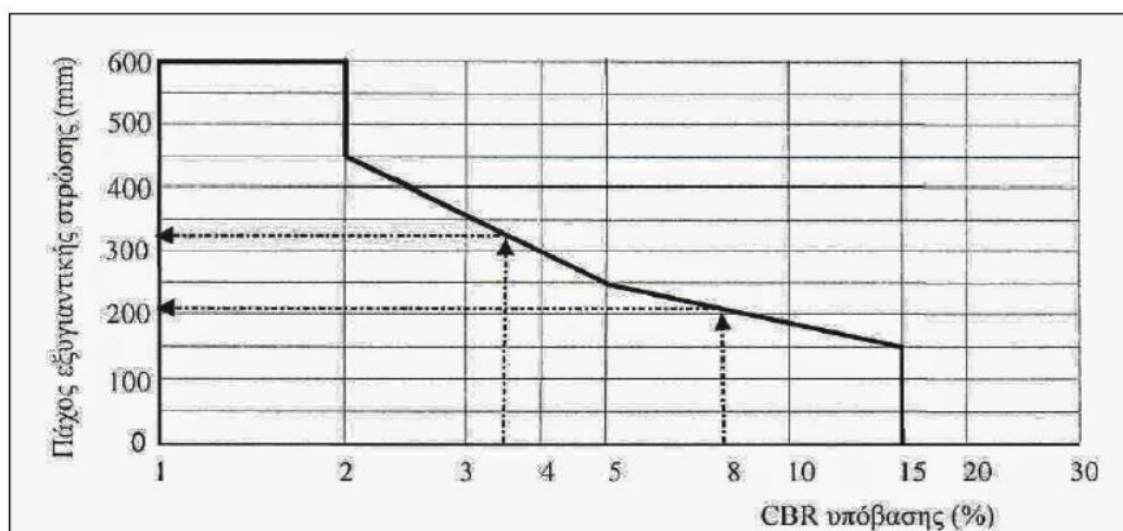
Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την αντοχή που έχει το υπέδαφος. Στην περίπτωση που το υπέδαφος είναι ασθενές τότε απαιτείται μεγαλύτερο πάχος υπερκείμενων στρώσεων, σε αντίθεση με ένα υπέδαφος υψηλής αντοχής. Η αντοχή αυτή καθορίζεται με βάση το CBR.

Συγκεκριμένα αν η εργαστηριακή τιμή του CBR είναι μεγαλύτερη από 30% μπορεί να παραληφθεί. Αν το CBR είναι μεγαλύτερο από 15%, τότε το πάχος της υπόβασης είναι 150 mm. Στην περίπτωση που το υπέδαφος είναι μεταξύ 2.5-15% τότε υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις:

- Να κατασκευαστεί υπόβαση που το πάχος της να είναι μεταβλητό και να μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του Σχήματος 2.3. Η υπόβαση χωρίζεται σε τρία στρώματα, στα οποία η τιμή του CBR μειώνεται κατά 10% ξεκινώντας από 50% στην επιφάνειά της, ενώ στην «βάση» του στρώματος φτάνει έως και το 20%.
- Να κατασκευαστεί υπόβαση σταθερού πάχους 150 mm και ταυτόχρονα να κατασκευαστεί εξυγιαντική στρώση μεταβλητού πάχους, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.

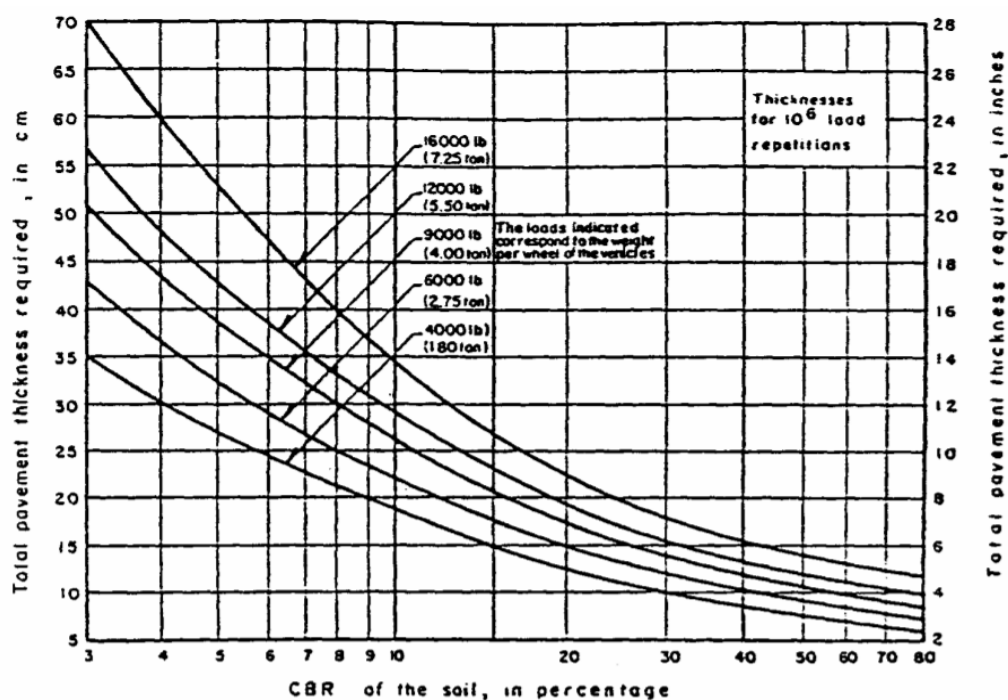


Σχήμα 2.3: Υπολογισμός πάχους υπόβασης (Νικολαΐδης, 2002).



Σχήμα 2.4: Υπολογισμός πάχους εξυγιαντικής στρώσης (Νικολαΐδης, 2002).

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του πάχους εύκαμπτου οδοστρώματος είναι με την βοήθεια του διαγράμματος στο Σχήμα 2.5. Οι καμπύλες εκτιμούν το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος συναρτήσει του CBR και το φορτίο ανά τροχό οχήματος (1.80 – 7.25 τόνους), για 10⁶ φορτίσεις (Σακελλαρίου, 2003).



Σχήμα 2.5: Καμπύλες σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σύμφωνα με τον λόγο CBR του εδάφους (Σακελλαρίου, 2003).

3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Ο «Αυτοκινητόδρομος 90» ή αλλιώς «Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης» (ΒΟΑΚ) αποτελεί την κύρια μεταφορική διαδρομή της Κρήτης και εκτείνεται από την περιοχή Κισσάμου στο νομό Χανίων μέχρι τη Σητεία στο νομό Λασιθίου (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Αναλυτικός χάρτης Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης.

Το μήκος του αποτελείται από 310 km, εκ των οποίων μονάχα 48 km (9 km περιμετρικά της πόλης των Χανίων, 7 km περιμετρικά του Ρεθύμνου και 32 km στον νομό Ηρακλείου) έχουν προδιαγραφές αυτοκινητοδρόμου (τετράιχνος αυτοκινητόδρομος με λωρίδα έκτακτης ανάγκης και διαχωριστικό στηθαίο τύπου New Jersey).

Η υλοποίηση του έργου ξεκίνησε το 1968 και έκτοτε εξελισσόταν με την προσθήκη γεφυρών (Παντάνασσας και Παλαιοκάστρου), καθώς και σιράγγων (Βραχασίου) την δεκαετία του '70, μέχρι την αναβάθμιση του οδικού άξονα σε αυτοκινητόδρομο στα προαναφερθέντα σημεία.

Τελευταίο έργο αποτελεί η αναβάθμιση του οδικού άξονα σε αυτοκινητόδρομο στο τμήμα Γούρνες – Χερσόνησος, το οποίο παραδόθηκε στην κυκλοφορία στις αρχές του 2018. Αποτελεί το πρώτο τμήμα που ολοκληρώθηκε από τα εννέα (9) που βρίσκονται υπό κατασκευή την τελευταία πενταετία.

3.1. Δειγματοληψία

Έγιναν τρεις (3) δειγματοληψίες με σκοπό την ανάλυση των φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού και στη συνέχεια τον προσδιορισμό του Καλιφορνιακού Λόγου Φέρουσας Ικανότητας (CBR).

Τα δείγματα που εξετάστηκαν λήφθηκαν από το 2ο χιλιόμετρο του τμήματος Γούρνες – Χερσόνησος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 και στις Φωτογραφίες 3.1, 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3.1: Θέσεις δειγματοληψίας.



Φωτογραφία 3.1: Θέση δειγματοληψίας 1ου δείγματος (2 km + 150 m).



Φωτογραφία 3.2: Θέση δειγματοληψίας 2ου δείγματος (2 km + 550 m).



Φωτογραφία 3.3: Θέση δειγματοληψίας 3ου δείγματος (2 km + 950 m).

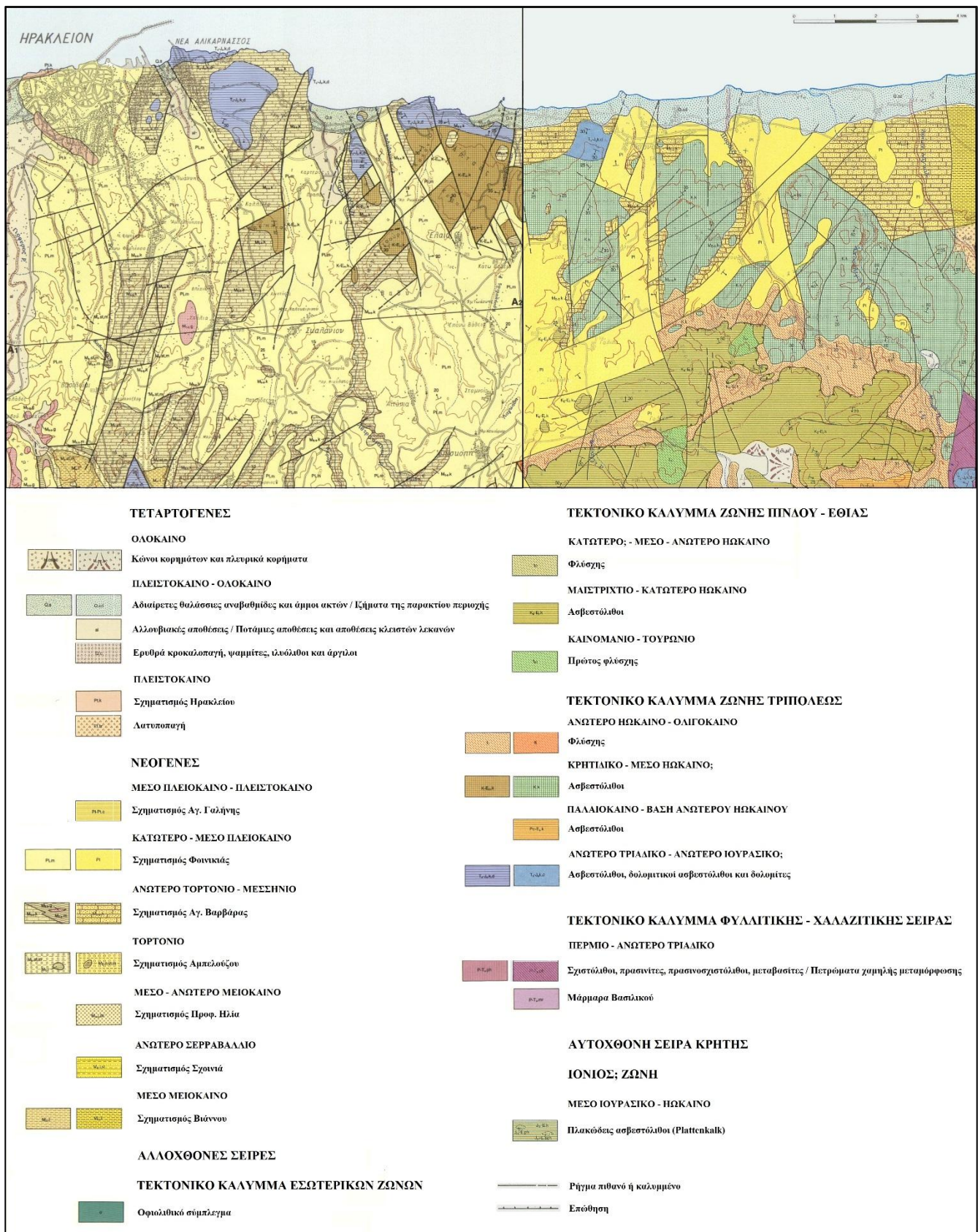
3.2. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου

Η ευρύτερη περιοχή αποτελείται κυρίως από νεότερες μεταλπικές αποθέσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από οριζόντιες και κατακόρυφες μεταβάσεις, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ποικίλες λιθολογικές φάσεις μέσα στον ίδιο σχηματισμό.

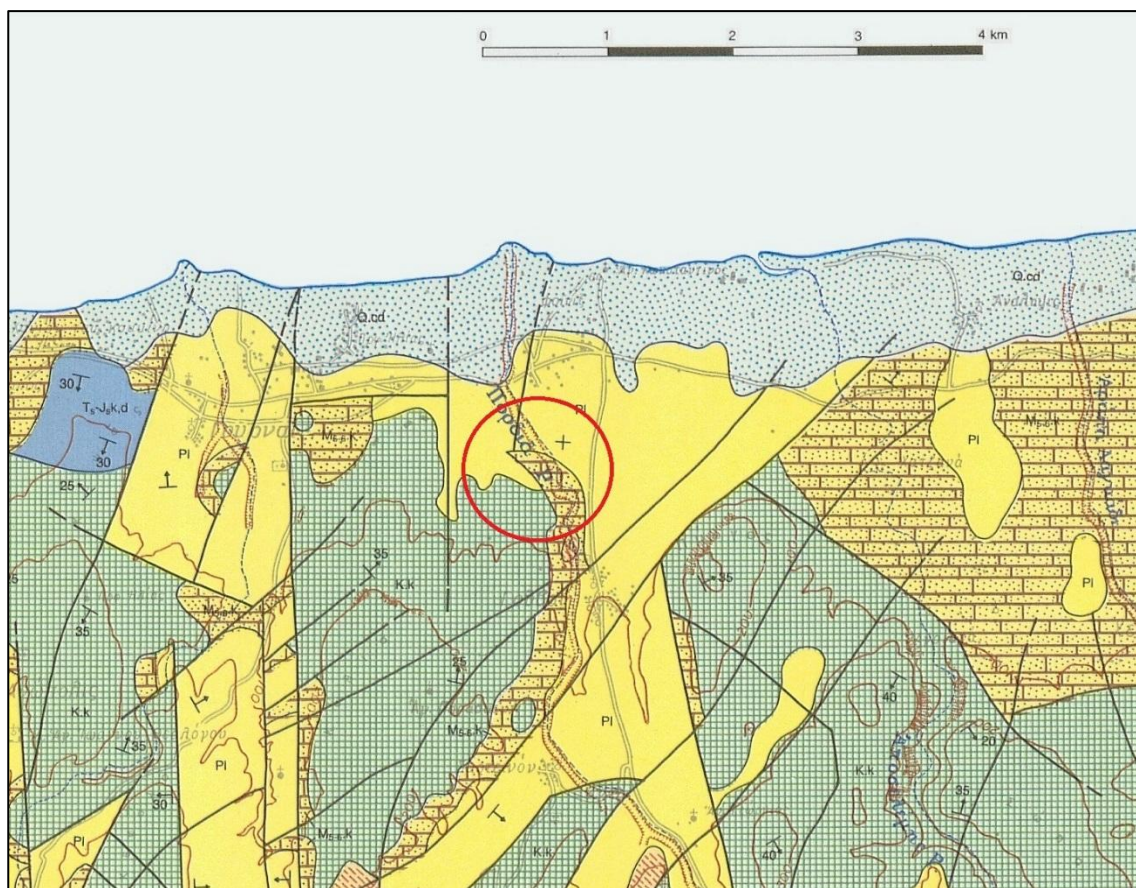
Οι πρόσφατοι σχηματισμοί του Νεογενούς εμφανίζονται σε σχετικά μεγάλη έκταση και με σημαντικό πάχος, ενώ συχνά καλύπτονται από Τεταρτογενείς αποθέσεις, των οποίων το πάχος είναι πολύ μικρό. Αναλυτικά, οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή, από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, είναι οι ακόλουθοι (Παπανικολάου κ.ά., 2008):

- Αλλουβιακές αποθέσεις (ηλικία: Ολόκαινο).
- Σχηματισμός Φοινικιάς (ηλικία: Άνω – Μέσο Πλειόκαινο).
- Σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας (ηλικία: Κάτω Μειόκαινο).
- Ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης (ηλικία: Ανώτερο Κρητιδικό).

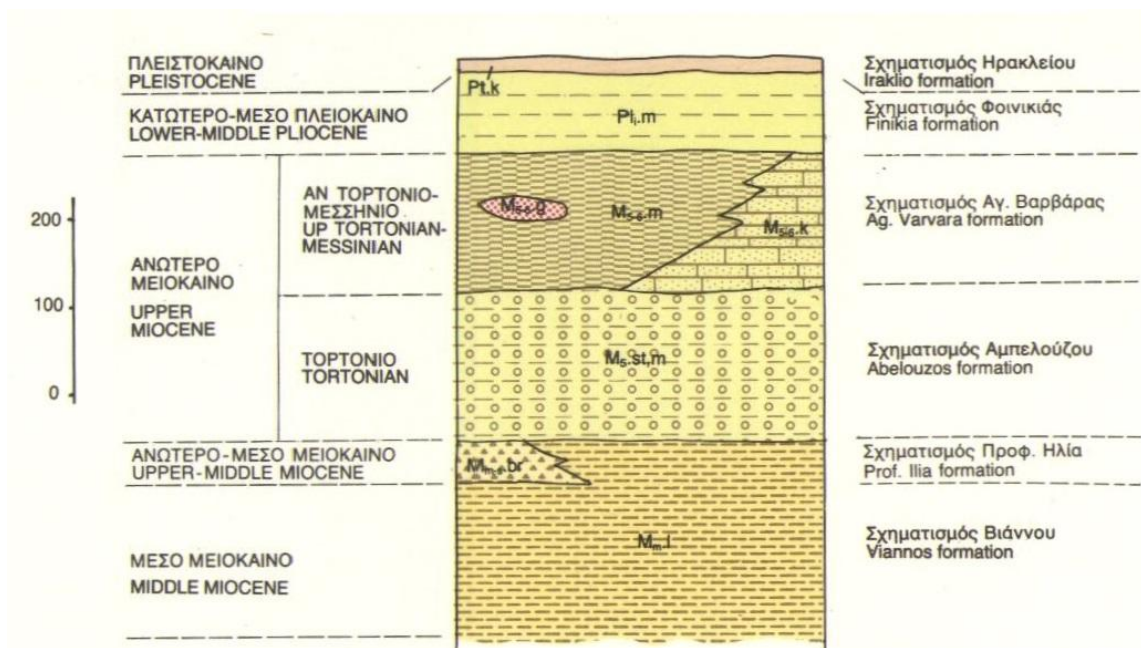
Οι σχηματισμοί αυτοί διακρίνονται στους γεωλογικούς χάρτες στα Σχήματα 3.3 και 3.4, και στην στρωματογραφική στήλη στο Σχήμα 3.5, και περιγράφονται στα παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (αποσπάσματα από τους χάρτες ΙΓΜΕ, 1996 – Φύλλο Ηράκλειο και ΙΓΜΕ, 1989 – Φύλλο Μοχός).



Σχήμα 3.3: Γεωλογικός χάρτης περιοχής ενδιαφέροντος (IGME, 1989 – Φύλλο Μοχός).



Σχήμα 3.4: Στρωματογραφική στήλη Νεογενών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (IGME, 1996).

Αλλουβιακές αποθέσεις

Αποτελούνται κυρίως από ασύνδετα υλικά, χαλίκια, άμμους και ιλύ. Προέρχονται από υλικά αποσάθρωσης και διάβρωσης παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών.

Σχηματισμός Φοινικιάς

Αποτελείται κυρίως από ομοιογενείς μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και αργίλους που παρουσιάζουν συχνά λεπτές καφέ ενστρώσεις. Επίσης, συναντώνται άσπρες έως υποκίτρινες μάργες, ενίοτε φυλλώδεις που περιέχουν απολιθώματα φυτών, ψαριών και σπόγγων.

Το κατώτερο τμήμα του γεωλογικού σχηματισμού Φοινικιάς αποτελείται από ένα όχι καλά σχηματισμένο μαργαϊκό λατυποπαγές, αποτελούμενο από λευκές ομοιογενείς μάργες και ασβεστόλιθους.

Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν την περιοχή της δειγματοληψίας, καθώς και το δυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.

Σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας

Αποτελείται κυρίως από βιοκλαστικούς, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Επίσης, παρατηρούνται εναλλαγές από καλοστρωμένες ομοιογενείς μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, όπως και γύψοι που παρεμβάλλονται στην κορυφή ή εντός των καλοστρωμένων μαργών.

Ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης

Αποτελούν την βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από δολομίτες, παχυστρωματώδεις έως άστρωτους, τεφρόμαυρους, ενώ τα ανώτερα στρώματα από ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, μεσοστρωματώδεις, τεφρόλευκους έως τεφρόμαυρους.

Τα δείγματα που λήφθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούν μαργαϊκά – αργιλομαργαϊκά πετρώματα του σχηματισμού Φοινικιάς, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή επιχώματος. Για το λόγο αυτό στην επόμενη ενότητα γίνεται ειδική αναφορά στους μαργαϊκούς σχηματισμούς που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος.

3.3. Ιδιότητες των μαργαϊκών σχηματισμών της περιοχής του έργου

Οι μάργες του ελληνικού χώρου παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Χαρακτηρίζονται ως ιζηματογενείς σχηματισμοί και η γένεσή τους λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον με έντονη παρουσία νερού (είτε θαλάσσιου, είτε γλυκού).

Το χρώμα τους ποικίλει, κυρίως σε τεφρό, αλλά μπορεί να υπάρξει και σε πιο έντονα χρώματα όπως κίτρινο, κυανό ή πράσινο.

Τα συνηθέστερα υλικά που συναντιούνται στους μαργαϊκούς σχηματισμούς είναι το ανθρακικό ασβέστιο, ο χαλαζίας, ο δολομίτης, οι μαρμαρυγίες και αργιλικά ορυκτά όπως ο ιλλίτης, ο μοντμοριλλονίτης, ο καολίνης και ο χλωρίτης.

Στον Πίνακα 3.1 δίνεται ταξινόμηση των μαργαϊκών σχηματισμών με βάση την περιεκτικότητά τους σε ανθρακικό ασβέστιο και άργιλο.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση μαργαϊκών σχηματισμών με βάση τα ποσοστά αργίλου και ανθρακικού ασβεστίου (Τσιαμπάος, 1988, πηγές: Barth et al., 1939 και Pettijohn, 1975).

Ονομασία	Ποσοστό αργίλου (%)	Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (%)
Ασβεστόλιθος	0 – 5	100 – 95
Μαργαϊκός ασβεστόλιθος	5 – 15	95 – 85
Ασβεστόμαργα	15 – 25	85 – 75
Ασβεστολιθική μάργα	25 – 35	75 – 65
Μάργα	35 – 65	65 – 35
Αργιλική μάργα	65 – 75	35 – 25
Αργιλόμαργα	75 – 85	25 – 15
Μαργαϊκή άργιλος	85 – 95	15 – 5
Άργιλος	95 – 100	5 – 0

Όπως είναι λογικό, οι περιεκτικότητες σε ορυκτά των μαργαϊκών σχηματισμών διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή (βλέπε Πίνακα 3.2).

Πίνακας 3.2: Ορυκτολογία των ελληνικών μαργών (Κωστόπουλος, 1988).

Περιοχή	Ασβεστίτης (%)	Χαλαζίας (%)	Άστριοι (%)	Αργιλικά (%)		Ασβεστίτης / Αργιλικά (μέσος όρος)
Κόρινθος	75 – 83	8 – 10	3 – 5	6 – 7	Χλωρίτης-Μοντμ/της	12.15
Πειραιάς	54 – 77	5 – 10	6 – 9	3 – 23	Χλωρίτης-Ιλλίτης	5.04
Ήπειρος	15 – 25	20 – 30	7 – 10	35 – 40	Ιλλίτης-Χλωρίτης	0.57
Κομοτηνή	5 – 10	50 – 65	10 – 25	20 – 35	Καολίνης-Μοσχοβίτης	0.27

Τα διαφορετικά περιεχόμενα ορυκτά στους σχηματισμούς αποδίδουν και διαφορετικές τιμές στις βασικές γεωτεχνικές ιδιότητές τους. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται συχνές έρευνες μεγάλης κλίμακας, με σκοπό μια γενική εικόνα των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των μαργών ανά περιοχή.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3, εξετάζονται οι ακόλουθες ιδιότητες:

- Ειδικό βάρος στερεών (G_s).
- Ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_d).
- Υγρασία κορεσμού (w_{sat}).
- Όρια Atterberg:
 - Όριο υδαρότητας (LL).
 - Όριο πλαστικότητας (PL).

Πίνακας 3.3: Εύρος τιμών χαρακτηριστικών γεωτεχνικών ιδιοτήτων (Κωστόπουλος, 1988).

Περιοχή	G_s	γ_d (kN/m ³)	w_{sat} (%)	PL (%)	PI (%)	CF (%)	q_u (MN/m ²)	E_{50} (MN/m ²)
Κόρινθος	25-30	14-22	10-35	22-50	2-31	26-100	0.03-8	0.1-2000
Πειραιάς	26-31	14-23.7	2-35	22-79	5-55	84-100	0.04-20	0.1-3000

Ήπειρος	26-33	14.20.8	10-35	24-68	10-48	49-100	0.05-2	1-200
Κομοτηνή	24-35	14-21.3	14-36	33-91	14-60	34-100	0.03-1	0.1-140

- Δείκτης πλαστικότητας (PI).
- Ποσοστό λεπτοκόκκων (CF).
- Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (q_u).
- Μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_{50} , στο 50% του q_u).

Ειδικότερα για τους μαργαϊκούς σχηματισμούς της περιοχής ενδιαφέροντος (νομός Ηρακλείου) διαπιστώνονται τα παρακάτω:

Από αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν (Τσιαμπάος, 1988) τα αργιλικά ορυκτά που συνήθως περιέχονται είναι:

- Μοντοριλλονίτης (έως 25%),
- Ιλλίτης (10 - 15%), και
- Χλωρίτης (λιγότερο από 13%).

Τα μη-αργιλικά ορυκτά που μπορεί να παρατηρηθούν είναι:

- Ασβεστίτης (16 – 82%), και
- Χαλαζίας (15 – 25%),

καθώς και δείγματα πλαγιοκλάστων και μαρμαρυγιών.

Κοκκομετρική ανάλυση και όρια Atterberg

Οι μάργες της περιοχής του Ηρακλείου περιλαμβάνουν άμμο (2 – 34%), ιλύ (45 – 62%) και άργιλο (10 – 45%).

Το κύριο συγκολλητικό υλικό των συγκεκριμένων μαργών φαίνεται να είναι ασβεστολιθικά υλικά με μέγεθος κόκκων μικρότερο των 4 μm . Η συγκόλληση αποτελεί μέρος της διαγενετικής διαδικασίας, η οποία λαμβάνει τόπο κατά την ιζηματογένεση των μαργών (Tsiambaos, 1991)

Οι τιμές του ορίου υδαρότητας (LL) κυμαίνονται μεταξύ 24 και 59, ενώ οι αντίστοιχες για το όριο πλαστικότητας (PL) από 3.5 έως 36.

Η περιεκτικότητα σε ασβεστίτη στις μάργες Ηρακλείου σχετίζεται με τα όρια Atterberg, καθώς αύξηση στα όρια αυτά συνοδεύεται από μείωση του ποσοστού του ασβεστίτη. Αντίθετα, η αναλογία της πλαστικότητας με το περιεχόμενο των αργιλικών κλασμάτων εξαρτάται από την αναλογία των αργιλικών ορυκτών (Tsiambaos, 1992).

Γωνία εσωτερικής τριβής

Οι τιμές της γωνίας ϕ , για τις μάργες του Ηρακλείου, διαφοροποιούνται ανάλογα με την πίεση που ασκείται. Χαρακτηριστικός είναι ο χωρισμός τους σε τιμές για πίεση μικρότερη και μεγαλύτερη των 250 kPa, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής των μαργών Ηρακλείου (Tsiambaos, 1991).

Γωνία εσωτερικής τριβής (°)	Για πιέσεις < 250 kPa	Για πιέσεις > 250 kPa
Ελάχιστη τιμή	27	26
Μέγιστη τιμή	33	32
Μέσος όρος	30	29

4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν σε τρία δείγματα, στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, ενώ για την ορυκτολογική σύσταση πραγματοποιήθηκαν δοκιμές XRD στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

4.1. Ορυκτολογική ανάλυση

Στα τρία δείγματα πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων-X (X-ray Diffraction, XRD).

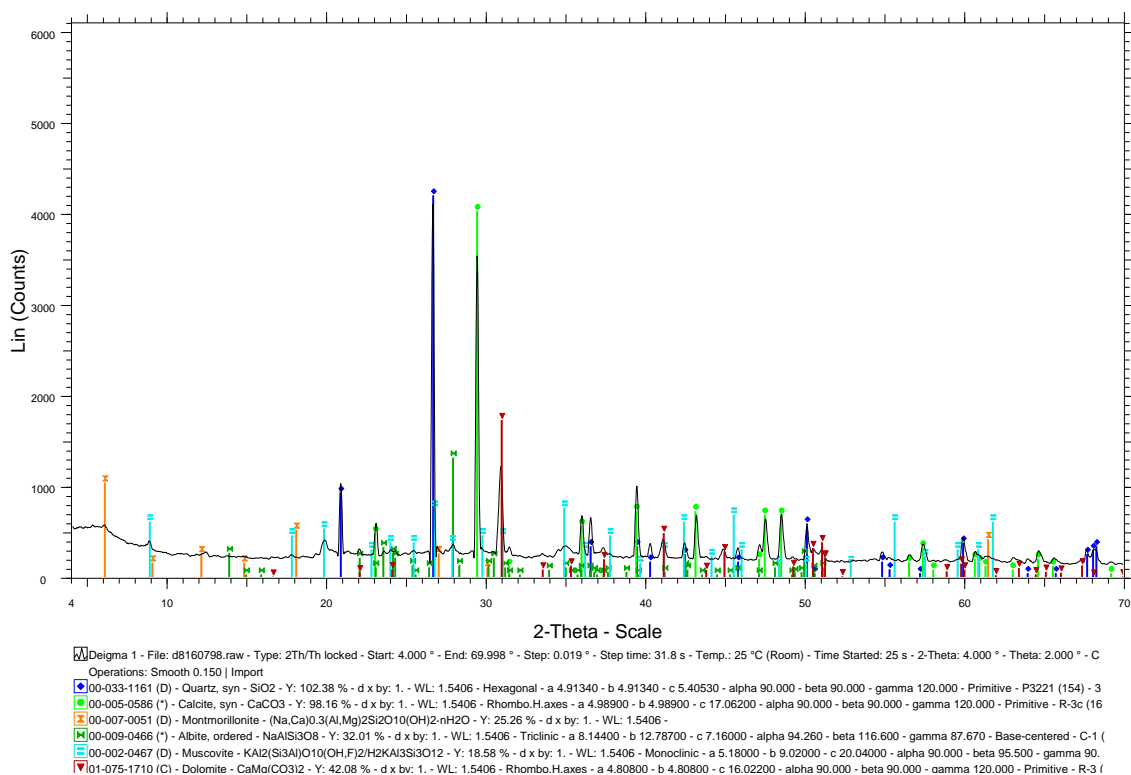
Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό της δομής και της σύστασης ενός δείγματος, το οποίο περιέχει περισσότερες από μία ορυκτολογικές φάσεις. Πραγματοεύεται την ανάκλαση των ακτίνων X κατά την πρόσκρουσή των με τα κρυσταλλικά επίπεδα του δείγματος και καταγράφει τις γωνίες περίθλασης και τον αριθμό ακτίνων X που ανιχνεύτηκαν.

Μέσα από μια βάση δεδομένων φασμάτων, ταυτοποιείται ποιοτικά και ποσοτικά η δομή του υλικού.

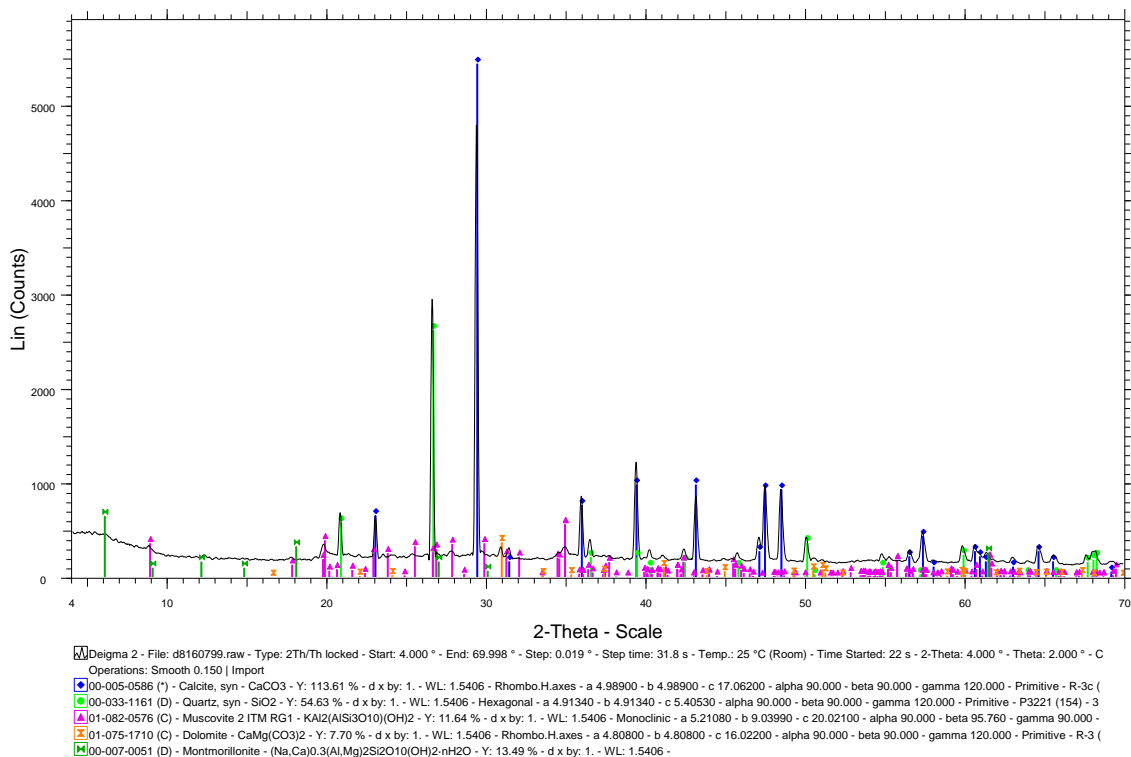
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης XRD δίνονται στα Σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3.

Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα ποσοστά (%) των ορυκτολογικών φάσεων που ανιχνεύθηκαν σε κάθε ένα από τα τρία δείγματα που εξετάστηκαν.

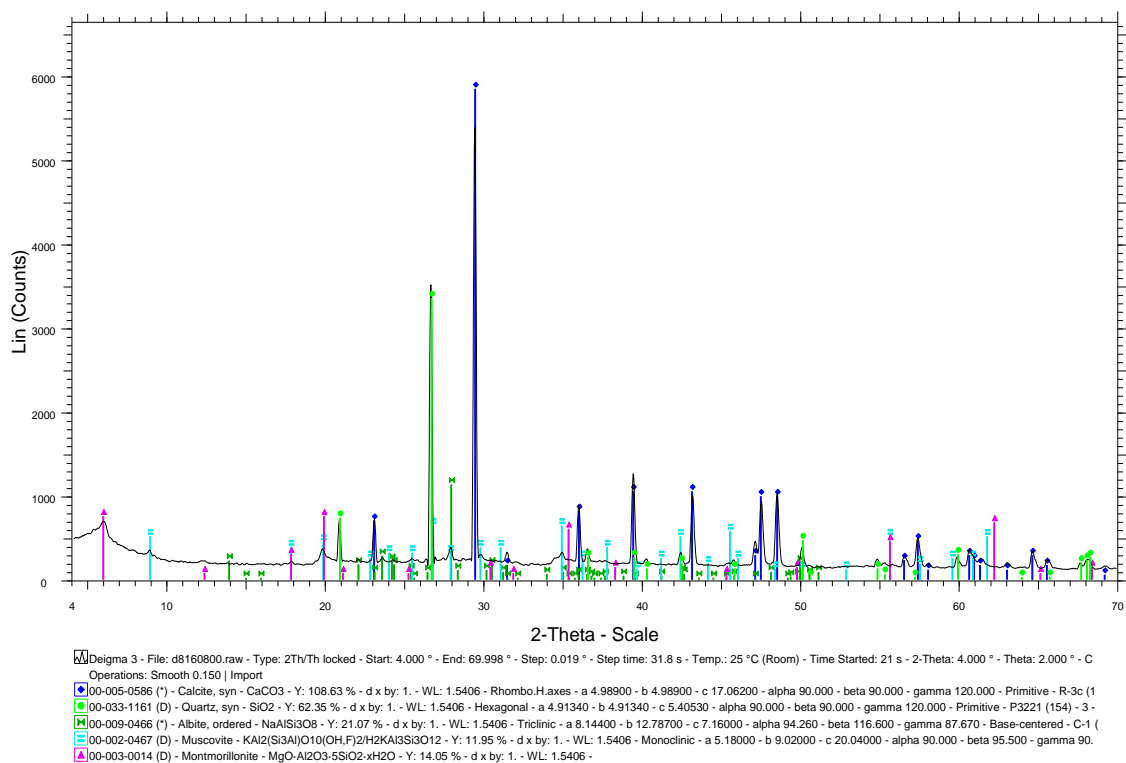
Το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών (Αλβίτης, Μοντμοριλλονίτης και Μοσχοβίτης) κυμαίνεται από 10% (2ο δείγμα) έως 23% (3ο δείγμα), ενώ των μη αργιλικών (Ασβεστίτης, Δολομίτης και Χαλαζίας) από 77% (3ο δείγμα) έως 90% (2ο δείγμα).



Σχήμα 4.1: Ανάλυση XRD στο 1ο δείγμα (2 km + 150 m).



Σχήμα 4.2: Ανάλυση XRD στο 2ο δείγμα (2 km + 550 m).



Σχήμα 4.3: Ανάλυση XRD στο 3ο δείγμα (2 km + 950 m).

Πίνακας 4.1: Ποσοστά (%) ορυκτολογικών φάσεων που ανιχνεύθηκαν σε κάθε ένα από τα τρία δείγματα που εξετάσθηκαν.

Ορυκτολογικές φάσεις	Ποσοστό (%) στο δείγμα 1	Ποσοστό (%) στο δείγμα 2	Ποσοστό (%) στο δείγμα 3
Αλβίτης	4	0	3
Μοντμοριλλονίτης	8	2	14
Μοσχοβίτης	8	8	6
Ασβεστίτης	29	53	49
Δολομίτης	14	6	0
Χαλαζίας	37	31	28

Έτσι, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1 τα δείγματα ταξινομούνται ως:

1ο δείγμα (2 km + 150 m): «Ασβεστόμαργα» (λόγος ασβεστίτη / αργιλικών = 1.45).

2ο δείγμα (2 km + 550 m): «Μαργαϊκός ασβεστόλιθος» (λόγος ασβεστίτη / αργιλικών = 5.30).

3ο δείγμα (2 km + 950 m): «Ασβεστόμαργα» (λόγος ασβεστίτη / αργιλικών = 2.13).

Παρατηρείται ότι, συγκριτικά με την ορυκτολογική ανάλυση των μαργών της περιοχής του Ηρακλείου που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, ενότητα 3.4.3, τα δείγματα τα οποία αναλύθηκαν περιέχουν τα βασικά ορυκτά που συναντώνται στις μάργες Ηρακλείου (Μοντμοριλλονίτης, Ασβεστίτης και Χαλαζίας), με την επιπλέον ύπαρξη Δολομίτη, Μοσχοβίτη και Αλβίτη.

4.2. Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί εργαστηριακή μέθοδο ταυτοποίησης και γεωτεχνικής ταξινόμησής του. Η γνώση των ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού συμβάλλει στην αξιολόγηση του υλικού όσο αφορά την καταλληλότητα του σε έργα οδοποιίας.

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιείται μηχανικά, με την χρήση κοσκίνων, για τα χονδρόκοκκα κλάσματα (διάμετρος κόκκων μεγαλύτερη από 0.075 mm) και με αραιόμετρο ή υδρόμετρο (μέθοδος αραιομέτρησης) για τα λεπτόκοκκα κλάσματα (Στειακάκης, 2010).

Όσον αφορά την μηχανική μέθοδο (κοσκίνηση), ακολουθήθηκαν οι οδηγίες των αμερικάνικων προτύπων ASTM D422-63 (1998). Χρησιμοποιήθηκε σειρά κοσκίνων που πληρούν τα πρότυπα που αναφέρθηκαν

Τα κόσκινα ζυγίζονται και τοποθετούνται σε σειρά, ανάλογα με το μέγεθος των οπών τους, από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο σε Νο. 3/4 (διάμετρος οπών: 19 mm), Νο. 3/8 (9.5 mm), Νο. 1/4 (6.3 mm), Νο. 4 (4.75 mm), Νο. 6 (3.35 mm), Νο. 10 (2.00 mm), Νο. 16 (1.18 mm), Νο. 40 (0.425 mm), Νο. 60 (0.25 mm), Νο. 140 (0.106 mm), και Νο. 200 (0.075 mm). Κάτω από το τελευταίο κόσκινο τοποθετείται συλλέκτης (Στειακάκης, 2010).

Στη συνέχεια, λαμβάνεται αντιπροσωπευτική μάζα περίπου 500 g από κάθε δείγμα και η οποία οδηγείται στο υψηλότερο κόσκινο (Νο. 3/4) και αρχίζει δόνηση των κοσκίνων σε μηχανικό δονητή (βλέπε Φωτογραφία 4.1).



Φωτογραφία 4.1: Διάταξη κοσκίνησης.

Μετά από 5 λεπτά δόνησης, τα κόσκινα εξάγονται από το μηχάνημα και ζυγίζονται ξανά μαζί με το υλικό που έχει συγκρατηθεί σε κάθε ένα από αυτά. Προστίθενται όλες οι μάζες με σκοπό τον υπολογισμό της τυχόν απώλειας εδαφικού υλικού.

Για τα τρία δείγματα που αναλύθηκαν προέκυψαν οι Πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4.

Εάν το αθροιστικό ποσοστό του διερχόμενου υλικού από το τελευταίο κόσκινο (No. 200) είναι μεγαλύτερο από 5% της αρχικής μάζας, η κοκκομετρική ανάλυση συνεχίζεται με την μέθοδο της αραιομέτρησης (Στειακάκης, 2010).

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική ανάλυση στο 1ο δείγμα (αρχ. μάζα ξηρού δείγματος: 1084.32 g).

Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος οπών (mm)	Μάζα καθαρού κοσκίνου (g)	Μάζα κοσκίνου με συγκρ. κόκκους (g)	Μάζα συγκρ. κόκκων (g)	Ποσοστό (%) συγκρ. κόκκων	Ποσοστό (%) διερχ. κόκκων
3/4	19	492.90	506.04	13.14	1.21	98.79
3/8	9.5	488.23	560.23	72.00	6.64	92.15
1/4	6.3	478.82	539.55	60.73	5.60	86.55

4	4.75	468.33	519.58	51.25	4.73	81.82
6	3.35	485.79	558.86	73.07	6.74	75.08
10	2	428.42	554.30	125.88	11.61	63.47
16	1.18	406.01	540.44	134.43	12.40	51.08
40	0.425	350.57	597.66	247.09	22.79	28.29
60	0.25	324.27	434.64	110.37	10.18	18.11
140	0.106	310.58	449.30	138.72	12.79	5.32
200	0.075	304.15	326.09	21.94	2.02	3.29
Συλλέκτης		282.98	311.82	28.84	2.66	-

Πίνακας 4.3: Κοκκομετρική ανάλυση στο 2ο δείγμα (αρχ. μάζα ξηρού δείγματος: 814.24 g).

Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος οπών (mm)	Μάζα καθαρού κοσκίνου (g)	Μάζα κοσκίνου με συγκρ. κόκκους (g)	Μάζα συγκρ. κόκκων (g)	Ποσοστό (%) συγκρ. κόκκων	Ποσοστό (%) διερχ. κόκκων
3/4	19	492.90	535.93	43.03	5.28	94.72
3/8	9.5	488.23	588.80	100.57	12.35	82.36
1/4	6.3	478.82	523.85	45.03	5.53	76.83
4	4.75	468.33	500.22	31.89	3.92	72.92
6	3.35	485.79	535.65	49.86	6.12	66.79
10	2	428.42	512.16	83.74	10.28	56.51
16	1.18	406.01	492.10	86.09	10.57	45.94
40	0.425	350.57	492.98	142.41	17.49	28.45
60	0.25	324.27	381.61	57.34	7.04	21.40
140	0.106	310.58	398.37	87.79	10.78	10.62
200	0.075	304.15	349.67	45.52	5.59	5.03
Συλλέκτης		282.98	328.76	45.78	5.62	-

Πίνακας 4.4: Κοκκομετρική ανάλυση στο 3ο δείγμα (αρχ. μάζα ξηρού δείγματος: 949.40 g).

Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος οπών (mm)	Μάζα καθαρού κοσκίνου (g)	Μάζα κοσκίνου με συγκρ. κόκκους (g)	Μάζα συγκρ. κόκκων (g)	Ποσοστό (%) συγκρ. κόκκων	Ποσοστό (%) διερχ. κόκκων
3/4	19	492.90	520.42	27.52	2.90	97.10

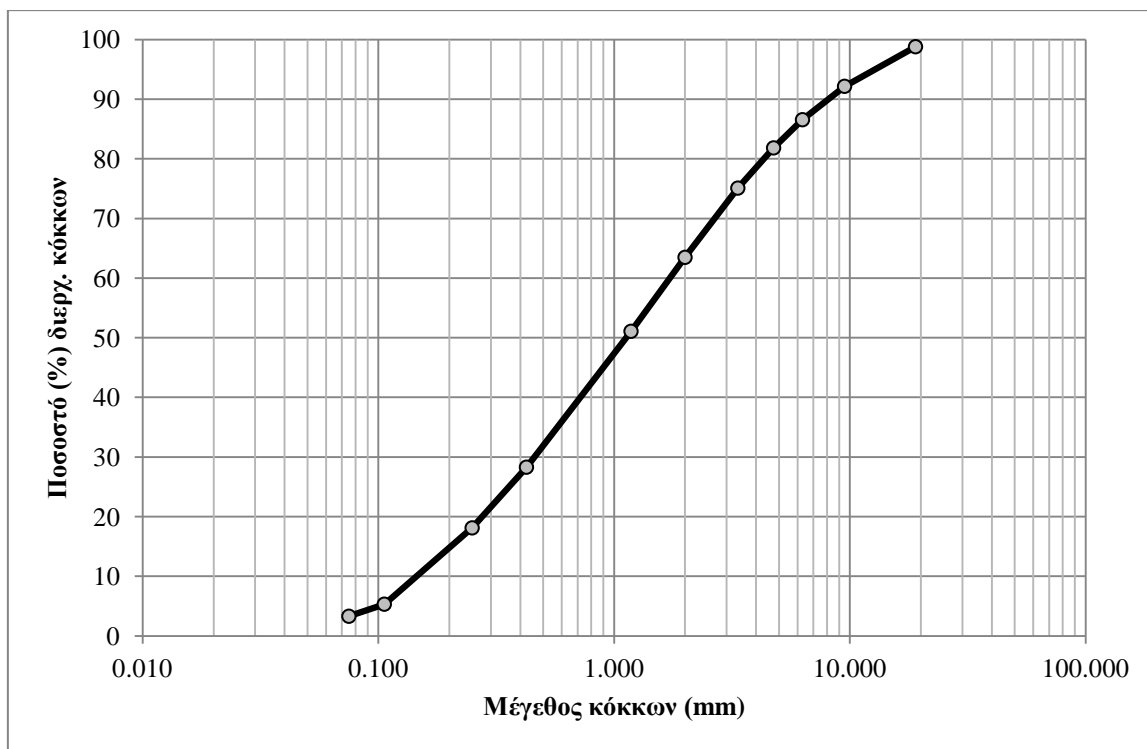
3/8	9.5	488.23	585.42	97.19	10.24	86.86
1/4	6.3	478.82	529.78	50.96	5.37	81.50
4	4.75	468.33	512.54	44.21	4.66	76.84
6	3.35	485.79	554.18	68.39	7.20	69.64
10	2	428.42	524.13	95.71	10.08	59.56
16	1.18	406.01	508.16	102.15	10.76	48.80
40	0.425	350.57	641.84	291.27	30.68	18.12
60	0.25	324.27	429.91	105.64	11.13	6.99
140	0.106	310.58	370.68	60.10	6.33	0.66
200	0.075	304.15	308.69	4.54	0.48	0.18
Συλλέκτης		282.98	311.82	28.84	2.66	-

Στα δείγματα που αναλύθηκαν, το λεπτομερές κοκκομετρικό κλάσμα που διήλθε από το κόσκινο Νο. 200 ήταν μικρότερο ή οριακά ίσο με 5% (2ο δείγμα – Πίνακας 4.3). Συνεπώς, η ανάλυση δεν προχώρησε σε περαιτέρω διαχωρισμό των λεπτόκοκκων (ιλύς και άργιλος) με αραιομέτρηση.

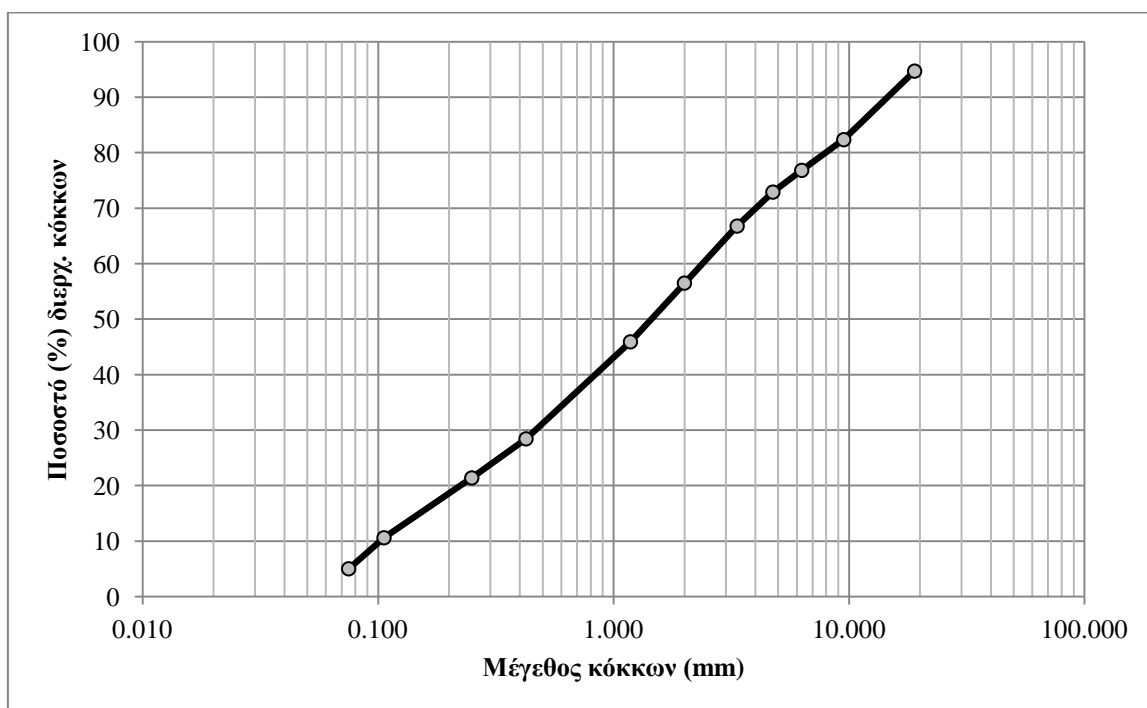
Τελικά, με βάση τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.2, 4.3, 4.4, σχεδιάστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες και των τριών ληφθέντων δειγμάτων, οι οποίες περιλαμβάνουν τα ποσοστά των (αθροιστικώς) διερχομένων ποσοστών σε συνάρτηση με την διάμετρο των κόκκων, όπως φαίνονται τα Σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6.

Από τις κοκκομετρικές αυτές καμπύλες επιχειρήθηκε χαρακτηρισμός του εδάφους, τόσο με βάση τα πρότυπα ASTM D422-63 (1998) (Πίνακας 4.5), όσο και με τα πρότυπα AASHTO M145 (2017) (Πίνακας 4.6).

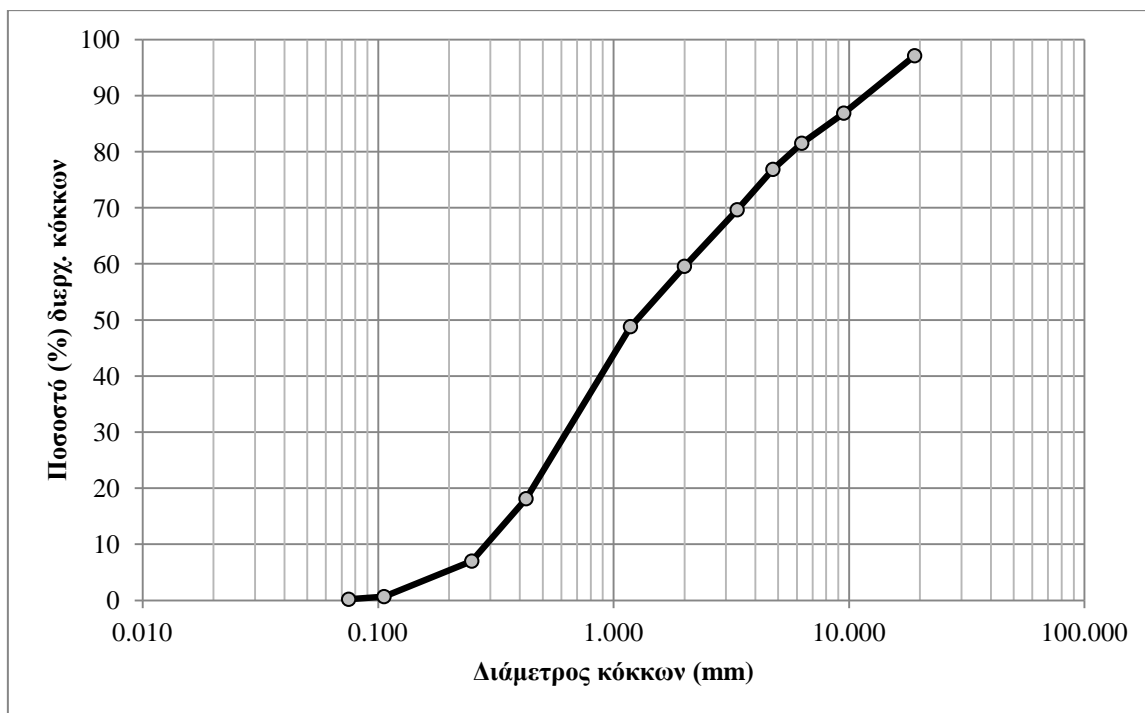
Παρατηρείται ότι το κύριο κοκκομετρικό κλάσμα στα τρία δείγματα που αναλύθηκαν είναι η άμμος, ενώ σημαντικό ποσοστό κατέχουν και τα χαλίκια. Τα ποσοστά των λεπτόκοκκων (άργιλος και ιλύς) είναι μειωμένα έως και αμελητέα.



Σχήμα 4.4: Κοκκομετρική καμπύλη 1ου δείγματος.



Σχήμα 4.5: Κοκκομετρική καμπύλη 2ου δείγματος.



Σχήμα 4.6: Κοκκομετρική καμπύλη 3ου δείγματος.

Πίνακας 4.5: Κοκκομετρικά κλάσματα κατά ASTM D422-63 (1998).

Κοκκομετρικό κλάσμα		Ποσοστό (%)		
		Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
Άργιλος και ιλύς		3.29	5.03	0.18
Άμμος	Λεπτή	25.00	23.41	17.94
	Μεσαία	35.19	28.06	41.44
	Χονδρή	18.35	16.41	17.28
Χαλίκια		18.18	27.08	23.16

Πίνακας 4.6: Κοκκομετρικά κλάσματα κατά AASHTO M145 (2017).

Κοκκομετρικό κλάσμα		Ποσοστό (%)		
		Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
Άργιλος και ιλύς		3.29	5.03	0.18
Άμμος	Λεπτή	25.00	23.41	17.94
	Χονδρή	35.19	28.06	41.44
Χαλίκια		36.53	43.49	40.44

Οι συντελεστές ομοιομορφίας (Cu) και καμπυλότητας (Cc), εκτιμήθηκαν ως εξής (Πίνακας 4.7):

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [4.1]$$

$$Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}} \quad [4.2]$$

Όπου, d_{60} η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 60% του δείγματος και d_{10} η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 10% του δείγματος.

Πίνακας 4.7: Συντελεστές ομοιομορφίας (Cu) και καμπυλότητας (Cc) στα τρία δείγματα που αναλύθηκαν.

Δείγμα	Συντελεστής ομοιομορφίας (Cu)	Συντελεστής καμπυλότητας (Cc)
1	12	0.9
2	22	0.8
3	7	0.7

4.3. Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας

Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας, μαζί με τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης (ενότητα 4.2), είναι απαραίτητα για την γεωτεχνική ταξινόμηση (ενότητα 4.4) του υλικού της δειγματοληψίας.

4.3.1. Όριο υδαρότητας

Σαν όριο υδαρότητας καλείται η περιεκτικότητα σε νερό στην οποία το έδαφος αρχίζει να παρουσιάζει διατμητική αντοχή. Το όριο αυτό διαχωρίζει την υδαρή από την πλαστική κατάσταση του υλικού (Στειακάκης, 2010).

Προσδιορίζεται με την χρήση συσκευής Casagrande (βλέπε Φωτογραφία 4.2) μετρώντας τον αριθμό των πτώσεων του κυπέλου που απαιτούνται ώστε να εκδηλωθεί ροή του εδάφους και να ενωθεί η αυλάκωση στην βάση του κυπέλλου της συσκευής.



Φωτογραφία 4.2: Συσκευή Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Ως όριο υδαρότητας θεωρείται η υγρασία που πρέπει να έχει το υλικό ώστε να απαιτηθούν 25 πτώσεις του κυπέλου για την ένωση της αυλάκωσης (ASTM D2487-17, 2017).

Αναλυτικά, η διαδικασία προσδιορισμού του ορίου υδαρότητας πραγματοποιήθηκε ως εξής:

Εδαφικό υλικό μάζας περίπου 100 g που διέρχεται από το κόσκινο No. 40 (διάμετρος οπών 0.425 mm), τοποθετείται σε πορσελάνινη κάψα και αναμειγνύεται με μικρή ποσότητα νερού ώστε να ληφθεί μια ομοιόμορφη μάζα με την χρήση της σπάτουλας. Στη συνέχεια η μάζα τοποθετείται στο κύπελλο της συσκευής Casagrande, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια ομαλή επιφάνεια.

Μετακινώντας το εργαλείο χάραξης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου διαχωρίζεται το δείγμα σε δύο ίσα μέρη. Πριν την εκτέλεση της διαδικασίας αφαιρείται τυχόν δείγμα που προεξέχει.

Στη συνέχεια, περιστρέφεται ο χειροκίνητος μοχλός της συσκευής με ρυθμό 2 στροφών / δευτερόλεπτο, ώστε το κύπελο να πέφτει από ύψος 1 cm. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου οι δύο πλευρές του δείγματος να ενωθούν στην βάση της διαχωριστικής γραμμής σε 12.7 mm κατά μήκος.

Ο αριθμός των κτύπων (πτώσεων) του κυπέλου θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 40 και σε περίπτωση που υπερβαίνει το ανώτατο όριο, προστίθεται νερό.

Εάν ο αριθμός των περιστροφών βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια, λαμβάνεται μικρή ποσότητα δείγματος και τοποθετείται στο ξηραντήριο (110°C) για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να μετρηθεί η περιεχόμενη υγρασία του.

Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 3 φορές, αφού πρώτα διαφοροποιηθεί η περιεκτικότητα σε νερό του εδαφικού υλικού είτε προσθέτοντας υλικό, για μείωση του περιεχόμενου νερού στο δείγμα, είτε προσθέτοντας νερό, για αύξησή της.

Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής, δηλαδή ο αριθμός των κτύπων και η περιεχόμενη υγρασία, προβάλλονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει το όριο υδαρότητας ως το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί σε 25 κτύπους.

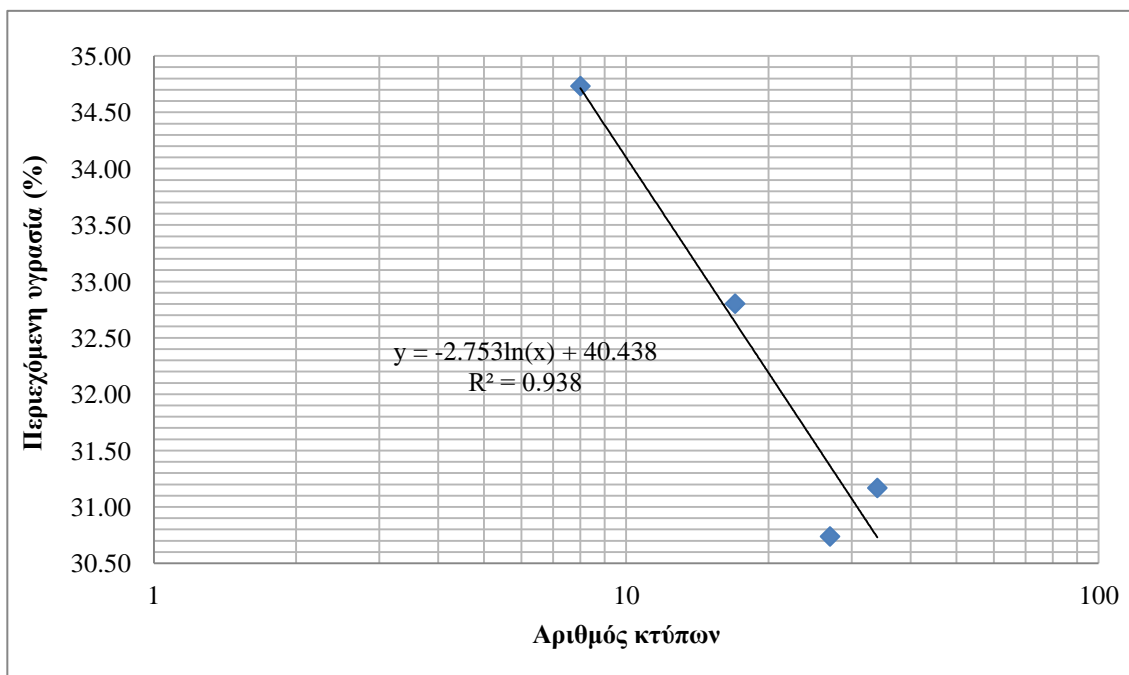
Με βάση τα παραπάνω, για τα τρία δείγματα που αναλύθηκαν, κατασκευάστηκαν οι Πίνακες 4.7, 4.8 και 4.9 και τα Σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9.

Σημειώνεται ότι στο 2ο δείγμα (Πίνακας 4.8), τα αποτελέσματα της 3ης δοκιμής (σημειώνεται με *) αποκλιναν σημαντικά από αυτά των υπολοίπων και για το λόγο αυτό αφαιρέθηκαν από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.8.

Πίνακας 4.7: Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας στο 1ο δείγμα.

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Αριθμός κτύπων	34	27	17	8
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	43.10	42.90	42.87	40.39
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	53.20	52.81	52.06	48.73
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	50.80	50.48	49.79	46.58

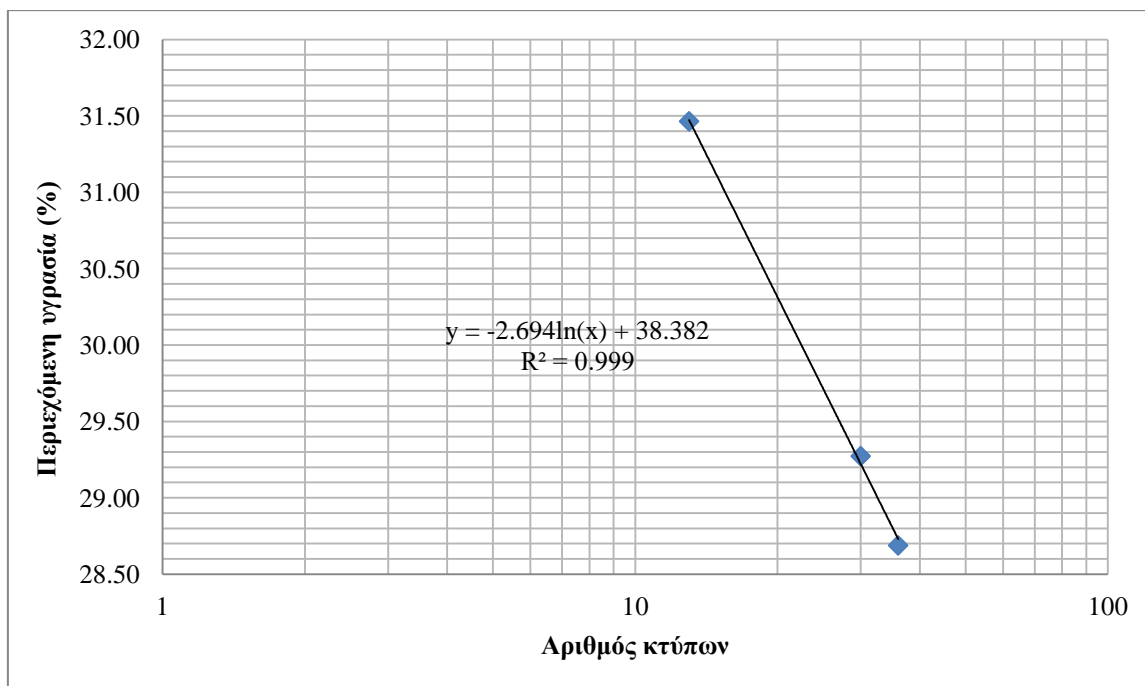
Μάζα υγρού δείγματος ($\Delta=B-A$) (g)	10.10	9.91	9.19	8.34
Μάζα ξηρού δείγματος ($E=\Gamma-A$) (g)	7.70	7.58	6.92	6.19
Μάζα νερού ($\Sigma T=\Delta-E$) (g)	2.40	2.33	2.27	2.15
Περιεχόμενη υγρασία ($Z=100 \cdot \Sigma T/E$) (%)	30.17	30.74	32.80	33.73



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα για το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας στο 1ο δείγμα.

Πίνακας 4.8: Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας στο 2ο δείγμα.

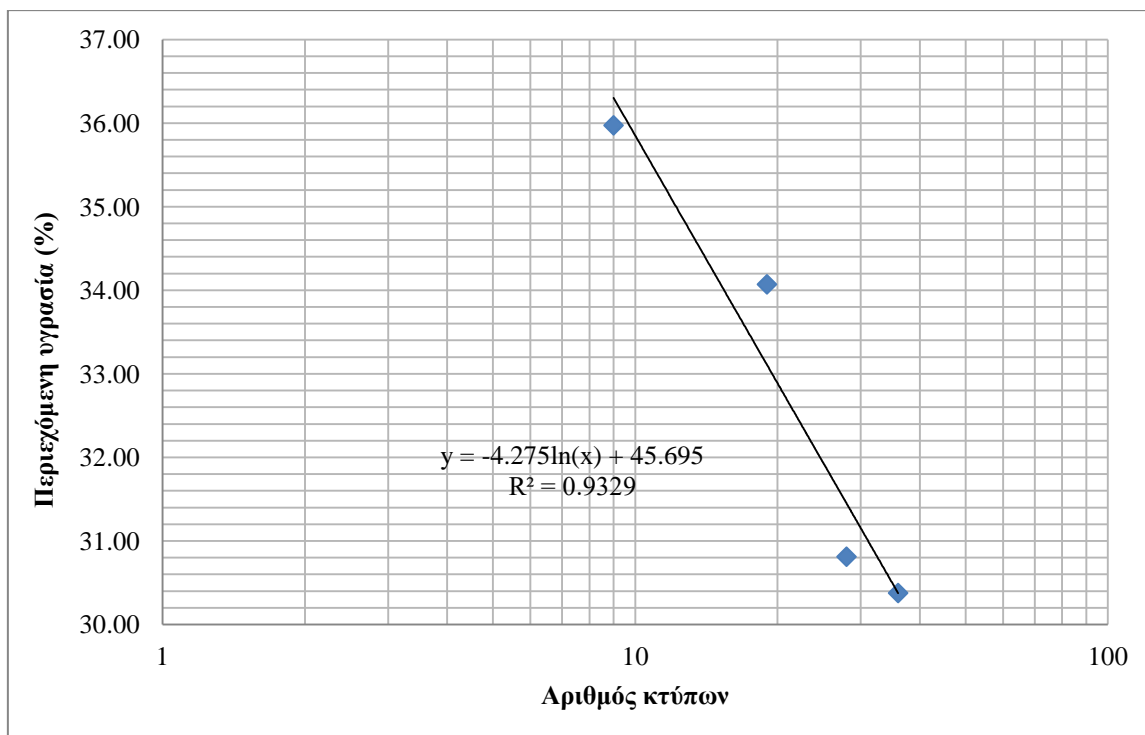
Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Αριθμός κτύπων	36	30	16	13
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	43.37	42.87	43.33	40.38
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	54.45	51.05	51.61	48.82
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	51.98	49.19	49.56	46.80
Μάζα υγρού δείγματος ($\Delta=B-A$) (g)	11.08	8.17	8.28	8.44
Μάζα ξηρού δείγματος ($E=\Gamma-A$) (g)	8.61	6.32	6.23	6.42
Μάζα νερού ($\Sigma T=\Delta-E$) (g)	2.47	1.85	2.05	2.02
Περιεχόμενη υγρασία ($Z=100 \cdot \Sigma T/E$) (%)	28.69	29.27	32.91	31.46



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα για το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας στο 2ο δείγμα.

Πίνακας 4.9: Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας στο 3ο δείγμα.

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Αριθμός κτύπων	36	28	19	9
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	40.26	52.21	46.46	47.90
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	49.96	59.47	53.74	57.69
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	47.70	57.76	51.89	55.10
Μάζα υγρού δείγματος (Δ=Β-Α) (g)	9.70	7.26	7.28	9.79
Μάζα ξηρού δείγματος (Ε=Γ-Α) (g)	7.44	5.55	5.43	7.20
Μάζα νερού (ΣΤ=Δ-Ε) (g)	2.26	1.71	1.85	2.59
Περιεχόμενη υγρασία (Ζ=100·ΣΤ/Ε) (%)	30.38	30.81	34.07	35.97



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα για το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας στο 3ο δείγμα.

Από τις εξισώσεις των ευθειών στα Σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9, και για αριθμό κτύπων $x = 25$, προκύπτει ότι τα όρια υδαρότητας (LL) στα τρία δείγματα είναι ίσα με 31.5, 29.7 και 31.9%, αντίστοιχα.

4.3.2. Όριο πλαστικότητας

Ως όριο πλαστικότητα ορίζεται η χαμηλότερη περιεχόμενη υγρασία στην οποία το έδαφος θα ξεκινήσει να θραύεται. Αποτελεί, δηλαδή, την τιμή της υγρασίας που διαχωρίζει την πλαστική από την ημιστερεή φάση (Στειακάκης, 2010).

Ο προσδιορισμός του ορίου γίνεται μετρώντας την περιεχόμενη υγρασία σε εδαφικό δείγμα το οποίο θρυμματίζεται όταν πλάθεται σε λεπτές ράβδους με διάμετρο μικρότερη ή ίση των 3 mm (ASTM D2487-17, 2017).

Όπως και στον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, το υλικό που χρησιμοποιείται πρέπει να διέρχεται από το κόσκινο No. 40 (διάμετρος οπών 0.425 mm) και να μην είναι τελείως ξηρό.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας έχει ως εξής (Στειακάκης, 2010):

Λαμβάνεται μικρή ποσότητα από το εδαφικό υλικό και αναμειγνύεται με ποσότητα νερού τόσο ώστε να αποκτήσει πλασιμότητα. Η μάζα που δημιουργείται μορφοποιείται ώστε να αποκτήσει σχήμα ραβδίσκου ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm (βλέπε Φωτογραφία 4.3).



Φωτογραφία 4.3: Μορφοποίηση ραβδίσκου για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας.

Σε περίπτωση που το δείγμα είναι αρκετά ξηρό και είναι αδύνατος ο σχηματισμός ραβδίσκου, αναμειγνύεται με περισσότερη ποσότητα νερού και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Όταν το δείγμα είναι περισσότερο υγρό από το επιθυμητό (διαπιστώνεται όταν δύναται να διαμορφωθούν ραβδίσκοι λεπτότεροι της διαμέτρου των 3 mm), απομακρύνεται η περίσσια ποσότητα νερού με «ρολλάρισμα» του ραβδίσκου επάνω σε απορροφητικό χαρτί.

Τελικά, όταν επιτυγχάνεται η κατάλληλη πλασιμότητα (θρυμματισμός ραβδίσκου σε διάμετρο λίγο μικρότερη των 3 mm), λαμβάνεται από τον ραβδίσκο μικρή ποσότητα δείγματος και τοποθετείται στο ξηραντήριο (110°C) για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να μετρηθεί η περιεχόμενη υγρασία του.

Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 3 φορές για κάθε δείγμα.

Με βάση τα παραπάνω, για τα τρία εξεταζόμενα δείγματα κατασκευάστηκαν οι Πίνακες 4.10, 4.11 και 4.12. Τα όρια πλαστικότητας (PL) που προέκυψαν από τον μέσο όρο των υγρασιών, είναι ίσα με 20.12, 18.10 και 19.46%, για το 1ο, 2ο και 3ο δείγμα, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.10: Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας στο 1ο δείγμα.

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4 (*)
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	41.84	42.88	41.68	43.17
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	42.54	43.89	42.54	44.06
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	42.42	43.72	42.40	43.88
Μάζα υγρού δείγματος ($\Delta=B-A$) (g)	0.70	1.01	0.86	0.89
Μάζα ξηρού δείγματος ($E=\Gamma-A$) (g)	0.58	0.84	0.72	0.71
Μάζα νερού ($\Sigma T=\Delta-E$) (g)	0.12	0.17	0.14	0.18
Περιεχόμενη υγρασία ($Z=100 \cdot \Sigma T/E$) (%)	20.69	20.24	19.44	25.35
Όριο πλαστικότητας (%)	20.12			

Πίνακας 4.11: Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας στο 2ο δείγμα.

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	41.26	46.56	51.20	52.54
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	42.42	48.82	53.63	54.48
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	42.24	48.50	53.25	54.17
Μάζα υγρού δείγματος ($\Delta=B-A$) (g)	1.16	2.26	2.43	1.94
Μάζα ξηρού δείγματος ($E=\Gamma-A$) (g)	0.98	1.94	2.05	1.63
Μάζα νερού ($\Sigma T=\Delta-E$) (g)	0.18	0.32	0.38	0.31
Περιεχόμενη υγρασία ($Z=100 \cdot \Sigma T/E$) (%)	18.37	17.49	19.54	19.02
Όριο πλαστικότητας (%)	19.10			

Πίνακας 4.12: Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας στο 3ο δείγμα.

Αριθμός δοκιμής	1	2	3	4
Μάζα υποδοχέα (Α) (g)	32.67	51.45	31.80	33.34
Μάζα υγρού δείγματος + υποδοχέα (Β) (g)	34.69	52.77	33.55	34.98
Μάζα ξηρού δείγματος + υποδοχέα (Γ) (g)	34.37	52.51	33.26	34.71
Μάζα υγρού δείγματος ($\Delta=B-A$) (g)	2.02	1.32	1.75	1.64
Μάζα ξηρού δείγματος ($E=\Gamma-A$) (g)	1.70	1.06	1.46	1.37
Μάζα νερού ($\Sigma T=\Delta-E$) (g)	0.32	0.26	0.29	0.27

Περιεχόμενη υγρασία ($Z=100 \cdot \Sigma T/E$) (%)	18.82	24.53	19.86	19.71
Όριο πλαστικότητας (%)	20.43			

Σημειώνεται ότι στο 1ο δείγμα (Πίνακας 4.10) και στο 3ο δείγμα (Πίνακας 4.12), αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό του μέσου όρου υγρασιών η 4η και η 2η δοκιμή (σημειώνονται με * στους πίνακες), αντίστοιχα, καθώς απόκλιναν σημαντικά από τις υπόλοιπες.

4.3.3. Δείκτης πλαστικότητας

Ως δείκτης πλαστικότητας (PI) ορίζεται η διαφορά του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας ($PI = LL - PL$). Στην περιοχή αυτή το υλικό θεωρείται εύπλαστο (Στειακάκης, 2010).

Στον Πίνακα 4.13 δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των ορίων υδαρότητας, πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας που υπολογίσθηκαν για τα τρία δείγματα που εξετάσθηκαν.

Πίνακας 4.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας.

Παράμετρος	Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
Όριο υδαρότητας (LL) (%)	30.58	29.71	30.93
Όριο πλαστικότητας (PL) (%)	20.12	19.10	20.46
Δείκτης πλαστικότητας (PI) (%)	10.45	10.61	10.17

4.4. Γεωτεχνική ταξινόμηση δειγμάτων

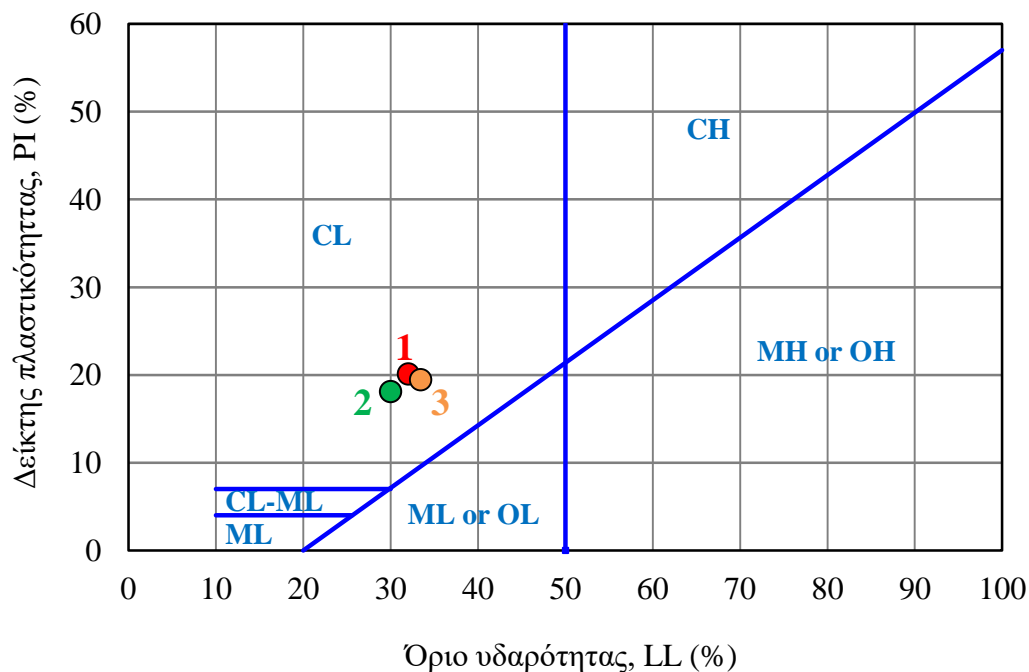
4.4.1. Κατάταξη κατά ASTM

Η γεωτεχνική ταξινόμηση του εδαφικού υλικού, σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS: Unified Soil Classification System, ASTM D2487-17, 2017) περιλαμβάνει δύο βήματα:

A) Χαρακτηρισμός του λεπτόκοκκου κλάσματος του υλικού

Για τον χαρακτηρισμό αυτό χρησιμοποιούνται το όριο υδαρότητας (LL) και ο δείκτης πλαστικότητας (PI) που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (βλέπε Πίνακα 4.13), τα οποία προβάλλονται στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande (Σχήμα 4.10).

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι και τα τρία δείγματα (1, 2 και 3) χαρακτηρίζονται ως CL, δηλαδή άργιλος (C) με χαμηλή πλαστικότητα (L), αφού $LL < 50$.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα πλαστικότητας για τον χαρακτηρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος του υλικού).

B) Ταξινόμηση του συνόλου του υλικού

Χρησιμοποιούνται ο προηγούμενος χαρακτηρισμός του λεπτόκοκκου κλάσματος, τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης (ενότητα 4.2) και τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας (ενότητα 4.3).

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και το κατάλληλο διάγραμμα ροής του USCS (Σχήμα 4.11), προκύπτει ότι το υλικό και στα 3 δείγματα που λήφθηκαν είναι «**καλά διαβαθμισμένη άμμος με χαλίκια**».



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής για την ταξινόμηση χονδρόκοκκου εδάφους (περισσότερο από 50% συγκρατείται στο κόσκινο No. 200).

4.4.2. Κατάταξη κατά AASHTO

Η κατάταξη των εδαφών κατά AASHTO αποσκοπεί να ταξινομήσει το υλικό ανάλογα με την συμπεριφορά του στο έργο και βασίζεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση και την πλαστικότητα.

Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται, εκτός από την κοκκομετρία και την πλαστικότητα, και ο «δείκτης ομάδος» GI. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$GI = 0.2 \cdot a + 0.005 \cdot a \cdot c + 0.01 \cdot b \cdot d \quad [4.3]$$

Όπου, $a = G_{200} - 35$ όταν το ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 έχει τιμή $35\% \leq G_{200} \leq 75\%$.

$b = G_{200} - 15$ όταν το ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 έχει τιμή $15\% \leq G_{200} \leq 55\%$.

$c = LL-40$ όταν το όριο υδαρότητας κυμαίνεται σε $40\% \leq LL \leq 60\%$.

$d = PI-40$ όταν ο δείκτης πλαστικότητας κυμαίνεται σε $10\% \leq PI \leq 30\%$.

Στην περίπτωση που ένα από τα παραπάνω μεγέθη είναι εκτός των αναφερόμενων ορίων, η τιμή του GI ορίζεται ως μηδενική (0). Αυτό συμβαίνει και στα τρία δείγματα που αναλύθηκαν.

Σύμφωνα λοιπόν με το ποσοστό διερχομένων από τα κόσκινα, καθώς και από το όριο υδαρότητας και τον δείκτη πλαστικότητας, τα 3 ληφθέντα δείγματα χαρακτηρίζονται κατά AASHTO ως υλικά «A2-6» (βλέπε Πίνακα 2.6 στο κεφάλαιο 2). Τα υλικά αυτά θεωρούνται εξαιρετικά έως καλά.

4.5. Προσδιορισμός CBR

Η Διεύθυνση Οδοποιίας της Καλιφόρνιας τη δεκαετία του 1930 ανέπτυξε μια εργαστηριακή μέθοδο μέτρησης του λόγου CBR ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της ικανότητας των εδαφών ως υλικά έδρασης έργων οδοποιίας. Η μέθοδος υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων με την χρήση του CBR, υιοθετήθηκε κατά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο από τον αμερικάνικο στρατό για την μελέτη και κατασκευή διαδρόμων απογείωσης – προσγείωσης αεροσκαφών (Σακελλαρίου, 2003).

Ορισμένοι οργανισμοί τροποποίησαν ελαφρώς την αρχικώς προταθείσα μέθοδο, κυρίως ως προς την υγρασία του συμπυκνωμένου εδαφικού υλικού κατά την δοκιμή και την ενέργεια συμπύκνωσης που επιβάλλεται στο δοκίμιο, πλην όμως η μεθοδολογία καθορισμού του CBR παραμένει η ίδια. Στην Ελλάδα ο καθορισμός του CBR γίνεται σύμφωνα με τις αμερικάνικες προδιαγραφές (AASHTO T193, 2003) και αναλυτικά η μεθοδολογία δίνεται στις προδιαγραφές E 105-86 (ΦΕΚ 955/31-12-86, 1986).

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

Η τιμή (λόγος) CBR υπολογίζεται από τον λόγο της «πίεσης δοκιμής» που απαιτείται ώστε να προκληθεί διείσδυση τυποποιημένου εμβόλου σε συγκεκριμένο βάθος (βάθος

αναφοράς), σε συμπακνωμένο δείγμα εδάφους, σε ορισμένη πυκνότητα και υγρασία, προς την «πίεση αναφοράς», η οποία είναι η απαιτούμενη πίεση ώστε να προκληθεί αυτό το βάθος διείσδυσης σε δείγμα σπασμένης πέτρας.

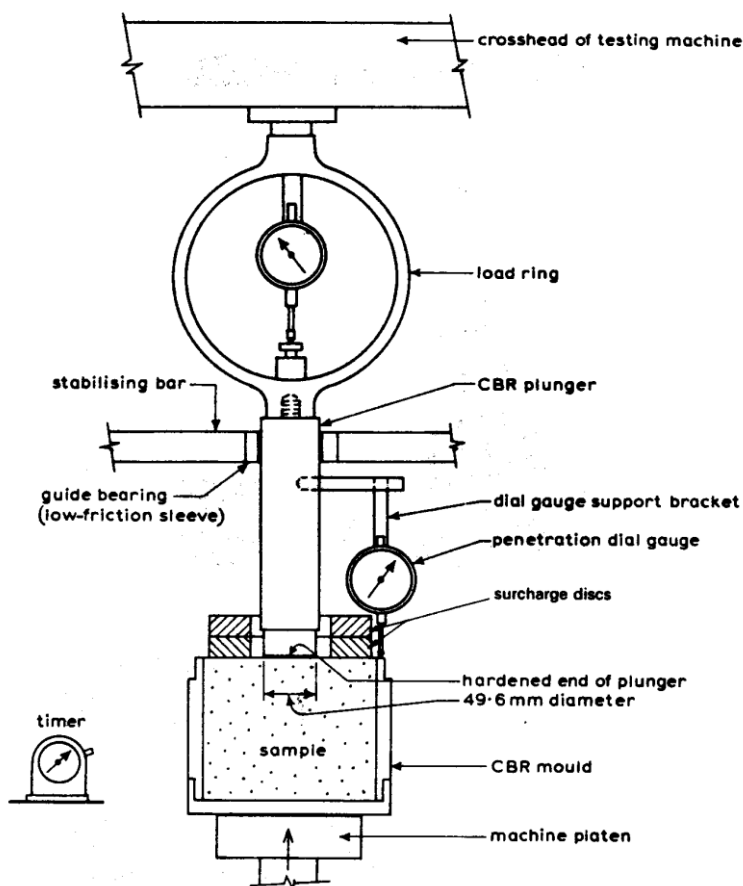
Το βάθος αναφοράς είναι 2.54 mm και η πίεση αναφοράς (για το δείγμα της σπασμένης πέτρας) είναι ίση με 6.9 MPa (Σακελλαρίου, 2003).

Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται και ως βάθος αναφοράς τα 5.08 mm, με πίεση αναφοράς τα 10.35 MPa (Γαλάνης – Νικολόπουλος, 2016).

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, το CBR δίνεται από τη σχέση:

$$\text{CBR (\%)} = 100 \times (\text{Πίεση δοκιμής}) / (\text{Πίεση αναφοράς}) \quad [4.4]$$

Η εφαρμογή της πίεσης δοκιμής (αντίσταση εδάφους) γίνεται σε συγκεκριμένη συσκευή φόρτισης με την χρησιμοποίηση του ειδικού τυποποιημένου εμβόλου, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής πίεσης σε δοκιμή CBR (Head , 1994).

Η επιλογή του πάχους ενός οδοστρώματος γίνεται βάσει της τιμής CBR (μικρές τιμές απαιτούν μεγάλο πάχος) και νομογραφημάτων. Τα νομογραφήματα αυτά συντάσσονται ανάλογα με το φορτίο που πρόκειται να φέρει το οδόστρωμα (Σακελλαρίου, 2003).

Η σπασμένη πέτρα θεωρείται πως έχει την καλύτερη συμπεριφορά για τα έργα οδοποιίας και γι' αυτό το λόγο έχει τιμή CBR σχεδόν 100%. Τα μαλακά εδάφη έχουν μικρότερο CBR.

4.5.1. Μετρήσεις – Επεξεργασία

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση δοκιμής CBR περιλαμβάνει (βλέπε Φωτογραφία 4.4):



Φωτογραφία 4.4: Εξοπλισμός για τον προσδιορισμό του λόγου CBR.

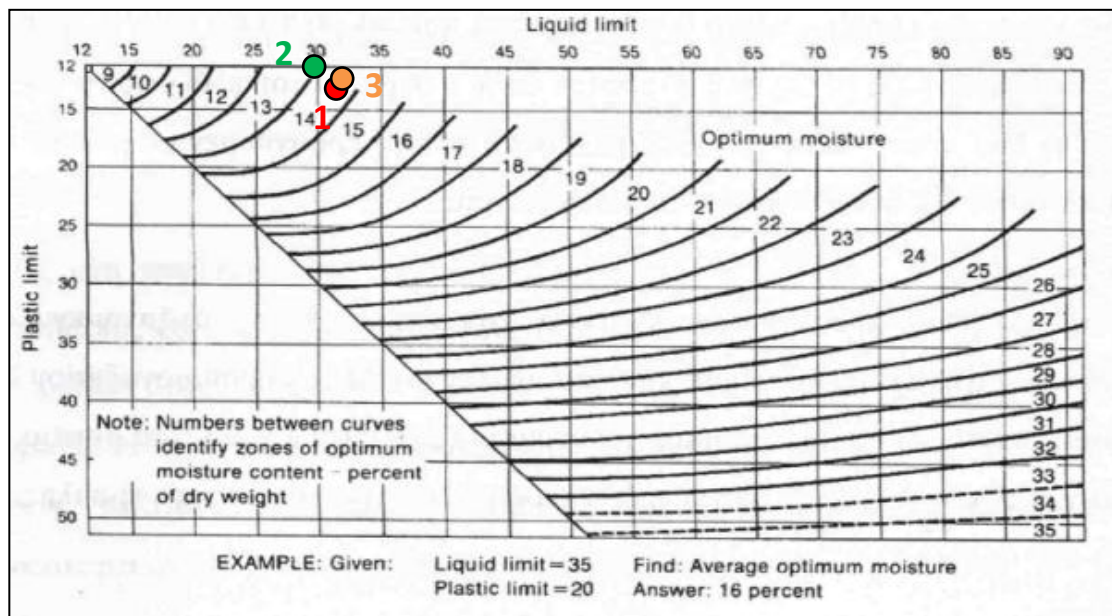
- Μεταλλικές μήτρες κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 152.4 mm (με απόκλιση ± 0.66 mm), ύψους 177.8 mm (με απόκλιση ± 0.41 mm), με διάτρητη βάση.

- Μεταλλικό παρέμβλημα κυκλικού σχήματος διαμέτρου 150.8 mm (με απόκλιση ± 0.8 mm) και ύψους 61.37 mm (με απόκλιση ± 0.13 mm).
- Κόπανος μάζας 2.49 kg, με επιφάνεια κρούσεως κυκλική, διαμέτρου 50.8 mm, με διάταξη ρυθμίσεως του ύψους πτώσεως στα 304.8 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου.
- Συσκευή μέτρησης της διόγκωσης, η οποία αποτελείται από μεταλλική, κυκλική πλάκα, διαμέτρου 149.2 mm, διάτρητη με οπές διαμέτρου 1.6 mm, στέλεχος μέτρησης και τρίποδα υποστήριξης με μηκυνσιόμετρο που προσαρμόζεται στον δακτύλιο προέκτασης της μήτρας.
- Δύο μηκυνσιόμετρα με περιοχή μετρήσεων έως 25.4 mm (= 1") και ακρίβεια 0.02 mm.
- Βάρη επιφόρτισης: Μεταλλικοί κύλινδροι με κυκλική οπή 54 mm στο μέσον, καθώς και μεταλλικά φορτία με εγκοπή ή διαιρούμενα, όλα διαμέτρου 149.2 mm και μάζας 2.27 ± 0.04 kg.
- Έμβολο διείσδυσης: Πρόκειται για μεταλλικό έμβολο κυκλικής διατομής $\Phi 49.63 \pm 0.13$ mm, εμβαδού διατομής 1935 mm^2 , και μήκους τουλάχιστον 102 mm.
- Συσκευή φόρτισης, με δυνατότητα επιβολής ομοιόμορφα αυξανόμενου φορτίου μέχρι 44.5 kN και με ταχύτητα φόρτισης 1.3 mm/min.
- Δοχείο υδρεμποτισμού, κατάλληλο ώστε να διατηρείται η στάθμη του νερού στα 25.4 mm πάνω από τα δοκίμια.
- Κλίβανος ξήρανσης, ικανός να διατηρεί θερμοκρασία $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Διάφορα δοχεία ανάμιξης, σπάτουλες, διηθητικό χαρτί, ζυγοί κ.λπ.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών CBR στα τρία ληφθέντα δείγματα, περιγράφεται στα παρακάτω:

Για κάθε ένα από τα τρία δείγματα, αρχικά διαχωρίζεται εδαφικό υλικό μάζας 11 kg από το συνολικό, με σκοπό τον έλεγχο της υγρασίας και της πυκνότητάς του. Τα υπόλοιπα 24 kg συμπυκνώνονται σε 3 διαφορετικά δοκίμια (Α, Β και Γ), στην βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσής τους (optimum moisture content, OMC).

Για την εκτίμηση της OMC κάθε δείγματος (1, 2, 3) χρησιμοποιήθηκε νομόγραμμα (Σχήμα 4.13), στο οποίο προβάλλονται τα όρια υδαρότητας (LL) και πλαστικότητας (PL).



Σχήμα 4.13: Νομόγραμμα για την εκτίμηση της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης με την πρότυπη δοκιμή Proctor (Στειακάκης, 2010, από Craig, 1984).

Από το παραπάνω διάγραμμα και για τις τιμές LL και PL, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην ενότητα 4.3 (βλέπε Πίνακα 4.13), βρέθηκαν οι τιμές βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.14: Εκτιμώμενες τιμές βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης (OMC).

Δείγμα	OMC (%)
1ο	15
2ο	14
3ο	15

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το νομόγραμμα στο Σχήμα 4.13, και ως εκ τούτου, οι τιμές της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης (OMC) που εκτιμήθηκαν στον Πίνακα 4.14

αφορούν την πρότυπη δοκιμή συμπίκνωσης κατά Proctor. Παρόλα αυτά, η συμπίκνωση των δοκιμίων κάθε δείγματος (1, 2, 3) έγινε με την τροποποιημένη δοκιμή Proctor.

Οι κύριες διαφορές ανάμεσα στην πρότυπη και την τροποποιημένη δοκιμή Proctor παρατηρούνται τόσο στον εξοπλισμό, όσο και στη διαδικασία.

Συγκεκριμένα, η μάζα της σφύρας που χρησιμοποιείται στην πρότυπη δοκιμή είναι ίση με 2.50 kg, ενώ στην τροποποιημένη ίση με 4.54 kg. Το ύψος πτώσεως της σφύρας είναι ίσο με 305 mm και 457 mm, αντίστοιχα.

Ο αριθμός των στρώσεων στις δυο μεθόδους επίσης διαφέρει, αφού χρειάζονται τρεις (3) στρώσεις στην πρότυπη δοκιμή και πέντε (5) στρώσεις στην τροποποιημένη. Αποτέλεσμα των δύο επιπλέον στρώσεων της τροποποιημένης δοκιμής Proctor είναι η αύξηση της επιβαλλόμενης δυναμικής ενέργειας συμπίκνωσης από τα 12.400 (ft·lb)/ft³ (πρότυπη δοκιμή) στα 56.300 (ft·lb)/ft³

Ο αριθμός των κτύπων (πτώσεις της σφύρας) είναι ο ίδιος και στις δυο μεθόδους, δηλαδή 25 ανά στρώση.

Η ακριβής διαδικασία υπολογισμού της τιμής CBR είναι η ακόλουθη:

Η μήτρα συνδέεται στον δίσκο της βάσης, τοποθετείται ο δακτύλιος προέκτασης και ζυγίζεται με προσέγγιση 5 kg. Εισάγεται το παρέμβλημα στη μήτρα και τοποθετείται τραχύ διηθητικό χαρτί στην βάση του δίσκου.

Το υλικό διαχωρίζεται σε 3 ισομερή αντιπροσωπευτικά δείγματα (Α, Β, Γ) των 6.8 kg και το κάθε ένα αναμειγνύεται με τόσο νερό ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή υγρασία.

Στην συνέχεια το δείγμα συμπακνώνεται ακολουθώντας την τροποποιημένη μέθοδο Proctor μέσα στην μήτρα σε 5 ίσες στρώσεις, έως ότου δημιουργηθεί δοκίμιο εδάφους πάχους 127 mm. Το κάθε δοκίμιο πρέπει να συμπακνώνεται σε βαθμό συμπίκνωσης 95% έως και 100% (βλέπε κεφάλαιο 2, ενότητα 2.7).

Για να επιτευχθεί αυτό, ο αριθμός των κτύπων της σφύρας διαμορφώθηκε σε 10 κτύπους για την 1η στρώση, 15 κτύπους για την 2η στρώση, 30 κτύπους για την 3η στρώση, 56 κτύπους για την 4η στρώση και 65 κτύπους για την 5η στρώση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές AASHTO T193, 2003. Αυτή η διαφοροποίηση (δηλαδή, ο αριθμός των κτύπων ανά στρώση) είναι και η μόνη, σε σχέση με την κλασσική τροποποιημένη μέθοδο Proctor.

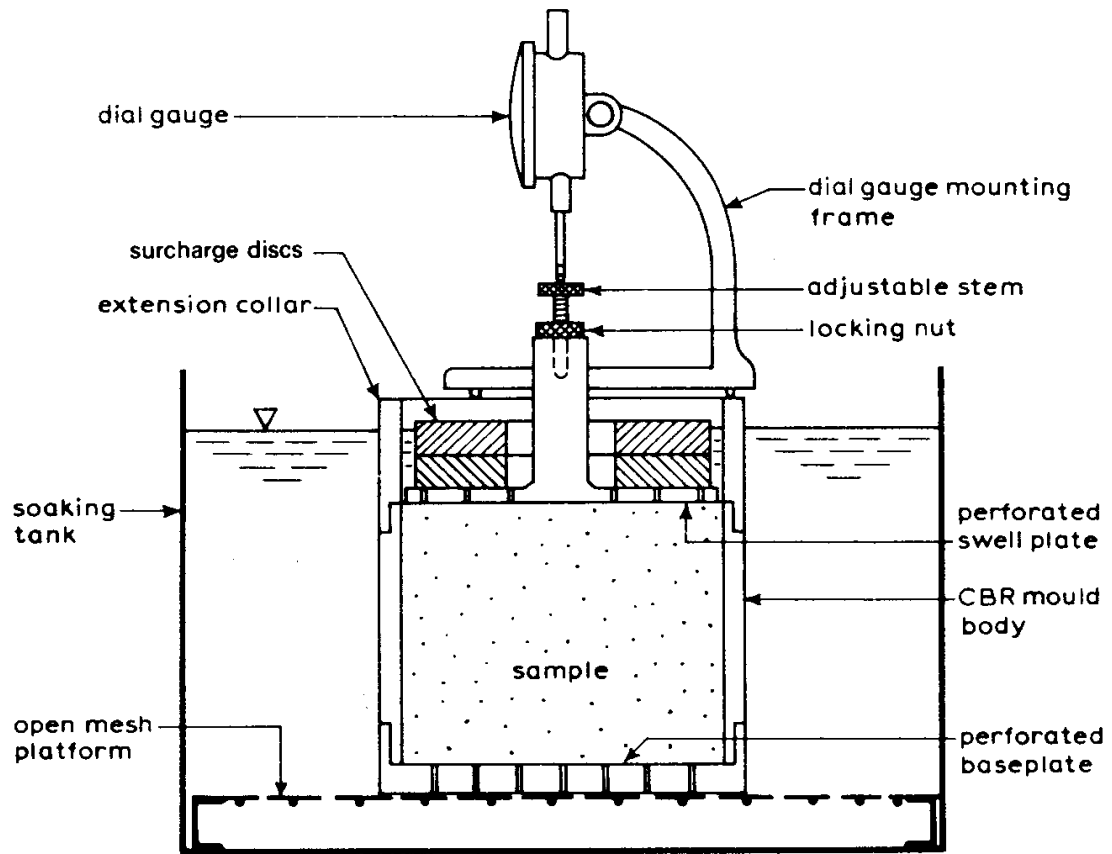
Μετά την διαδικασία της συμπίκνωσης και αφού ισοπεδωθεί η επιφάνεια του δείγματος με οδηγό τα χείλη της μήτρας, εξάγεται το δοκίμιο από την βάση του και ζυγίζεται για τον υπολογισμό της πυκνότητας του.

Στη συνέχεια, το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε δεξαμενή υδρεμποτισμού και εφαρμόζονται τα βάρη επιφόρτισης (αποτελούνται από 3 ζεύγη ημιδακτυλίων διαμέτρου 150 mm και μάζας 2.30 kg, ανά ζεύγος). Τοποθετούνται μηχανοσυστοιχίες στην κορυφή του δοκιμίου και λαμβάνεται αρχική ανάγνωση, καταγράφοντας την ημερομηνία και την ώρα της δοκιμής.

Κατόπιν, η δεξαμενή γεμίζεται με νερό μέχρι 25.4 mm πάνω από το ύψος του δοκιμίου (βλέπε Σχήμα 4.14 και Φωτογραφία 4.5). Ο υδρεμποτισμός διαρκεί το λιγότερο 4 ημέρες. Κατά την διάρκεια αυτών των ημερών γίνεται τακτική καταγραφή των ενδείξεων του μηχανοσυστοιχίου.

Μετά από 4 ημέρες, η τελευταία ένδειξη του μηχανοσυστοιχίου θα δώσει την διόγκωση, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Διόγκωση (\%)} = \frac{\text{Μεταβολή ύψους (mm)}}{116,4 \text{ mm}} \cdot 100 \quad [4.5]$$



Σχήμα 4.14: Τυπική διάταξη δοκιμίου κατά τον υδρεμποτισμό (Head , 1994).



Φωτογραφία 4.5: Υδρεμποτισμός κατά την διάρκεια της δοκιμής CBR.

Με το πέρας του υδρεμποτισμού, το δοκίμιο εξάγεται από την δεξαμενή και αφήνεται (με βαρύτητα) να στραγγίσει από την περίσσεια ποσότητα νερού για περίπου 15 λεπτά. Απομακρύνονται τα βάρη επιφόρτισης, η διάτρητη πλάκα και το διηθητικό χαρτί και ζυγίζεται για τον υπολογισμό της υγρής πυκνότητας.

Αφού περάσει η χρονική περίοδος των 15 λεπτών, το δοκίμιο τοποθετείται στην συσκευή φόρτισης και επανατοποθετούνται τα ίδια βάρη επιφόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υδρεμποτισμό. Μηδενίζονται οι ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου που έχει προσαρμοστεί στην κορυφή του δοκιμίου, την στιγμή που το έμβολο διείσδυσης, με φορτίο 44.5 N, έρθει σε επαφή με το δοκίμιο.

Ακολουθεί διείσδυση του εμβόλου με ταχύτητα 1.3 mm/min. Καταγράφονται οι τιμές των φορτίων για διεισδύσεις 0.64, 1.27, 1.91, 2.54, 5.08, 7.62, 10.16 και 12.70 mm. Με τις τιμές που καταγράφονται κατασκευάζεται καμπύλη με την διείσδυση στον οριζόντιο άξονα και την αντίσταση στην διείσδυση στον κάθετο άξονα.

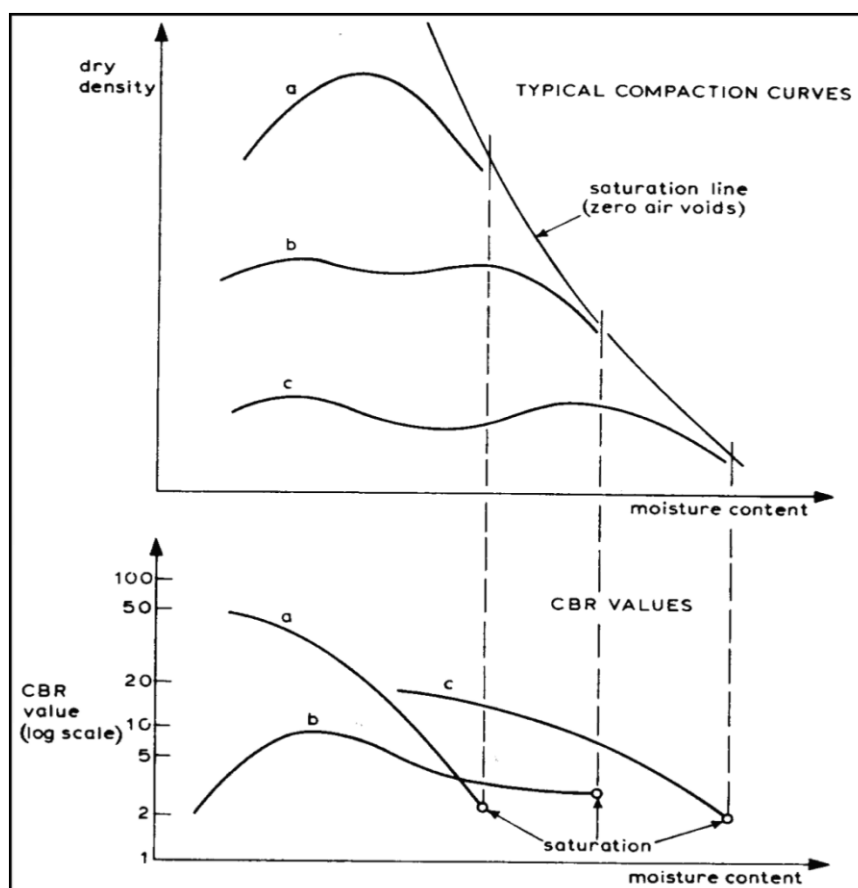
Οι διορθωμένες τιμές πίεσεως καθορίζονται για κάθε δοκίμιο από τις διεισδύσεις των 2.54 mm και 5.08 mm. Οι τιμές του CBR λαμβάνονται ως ποσοστό (%) από την διαίρεση των διορθωμένων τιμών πίεσεως δια των αντίστοιχων φορτίων αναφοράς 13.2 και 19.32 kN.

Σαν τελική τιμή του CBR επιλέγεται η τιμή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 2.54 mm. Στην περίπτωση που η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την τιμή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 5.08 mm, η δοκιμή επαναλαμβάνεται. Αν τα αποτελέσματα είναι ίδια, χρησιμοποιείται ο λόγος που αντιστοιχεί στα 5.08 mm (Γαλάνης – Νικολόπουλος, 2016).

4.5.2. Σχέση της τιμής CBR με χαρακτηριστικά εδαφών

Η τιμή CBR για ένα εδαφικό υλικό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ξηρή πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία.

Για ένα συγκεκριμένο βαθμό συμπίκνωσης, η τιμή CBR μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία (βλέπε Σχήμα 4.15) και η μείωση αυτή γίνεται ακόμα πιο έντονη πάνω από την βέλτιστη υγρασία. Ο ρυθμός μείωσης είναι ιδιαίτερα έντονος για τα κοκκώδη εδάφη (Davis, 1949).



Σχήμα 4.15: Μεταβολή τιμών CBR με την περιεχόμενη υγρασία για (α) καλά διαβαθμισμένη άμμο με άργιλο, (b) ομοιόμορφη λεπτή άμμο, και (c) άργιλο (Head , 1994).

4.5.3. Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών CBR που έγιναν στα τρία διατιθέμενα δείγματα, σε διάφορες υγρασίες συμπίκνωσης γύρω από τις βέλτιστες, όπως αυτές εκτιμήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Πίνακας 4.14).

Συνολικά εξετάστηκαν 6 δοκίμια, 2 σε κάθε ένα από τα τρία ληφθέντα δείγματα.

Παρατήρηση: Κατά την περίοδο εκτέλεσης και λειτουργίας του έργου, η πιθανότητα κορεσμού του εδάφους από την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων νερού (βροχές, πλημμύρες) ήταν σχεδόν μηδενική. Για τον λόγο αυτό, η πραγματοποίηση υδρεμποτισμού θεωρήθηκε μη αναγκαία.

Εδαφικό δείγμα 1-A (w = 14.19%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 1ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 14.19%, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.15. Οι αναλυτικές μετρήσεις δίνονται στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.1 και στο Σχήμα Π.1.

Πίνακας 4.15: Τιμές CBR στο δείγμα 1-A.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2.54	1.608	6.90	23.30
5.08	2.144	10.35	20.71

Εδαφικό δείγμα 1-B (w = 16.59%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 1ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 16.59%, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.16 (συγκεντρωτικά) και στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.2 και στο Σχήμα Π.2.

Πίνακας 4.16: Τιμές CBR στο δείγμα 1-B.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2.54	1.005	6.90	14.57
5.08	1.470	10.35	14.24

Εδαφικό δείγμα 2-A (w = 12.06%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 2ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 12.06%, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.17. Αναλυτικά αποτελέσματα δίνονται στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.3 και στο Σχήμα Π.3.

Πίνακας 4.17: Τιμές CBR στο δείγμα 2-A.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2.54	3.217	6.90	46.62
5.08	4.557	10.35	44.03

Εδαφικό δείγμα 2-B (w = 14.06%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 2ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 14.06%, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18, όπως και στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.4 και στο Σχήμα Π.4.

Πίνακας 4.18: Τιμές CBR στο δείγμα 2-B.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2.54	3.083	6.90	44.68
5.08	4.557	10.35	44.03

Εδαφικό δείγμα 3-A (w = 14.09%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 3ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 14.09%, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.19. Αναλυτικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα Π.5 και στο Σχήμα Π.5 του Παραρτήματος.

Πίνακας 4.19: Τιμές CBR στο δείγμα 3-A.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2.54	4.557	6.90	66.04
5.08	6.768	10.35	65.39

Εδαφικό δείγμα 3-B (w = 16.71%)

Τέλος, τα αποτελέσματα της δοκιμής CBR για το 3ο δείγμα, με υγρασία συμπίκνωσης 16.71%, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.20 και στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.6 και στο Σχήμα Π.6.

Πίνακας 4.20: Τιμές CBR στο δείγμα 3-B.

Διείσδυση (mm)	Αντίσταση εδάφους (MPa)	Πρότυπες πιέσεις (MPa)	Τιμή CBR (%)
2,54	3.418	6.90	49.53
5,08	5.093	10.35	49.21

Στον Πίνακα 4.21 δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις δοκιμές CBR που πραγματοποιήθηκαν.

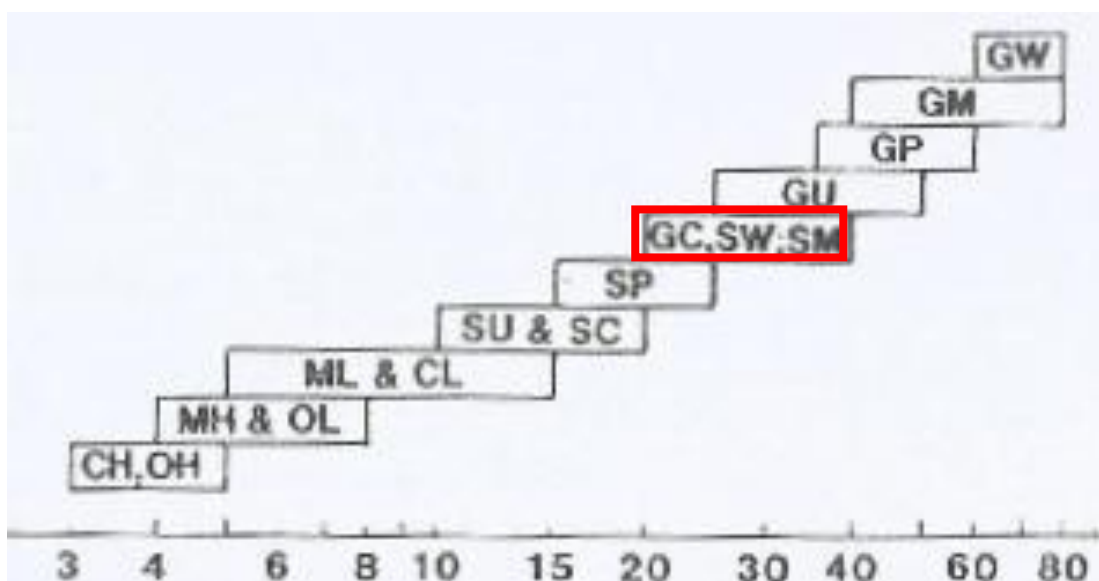
Σύμφωνα με τον πίνακα αυτόν, οι τιμές CBR που υπολογίσθηκαν στα τρία ληφθέντα δείγματα κυμαίνονται σε 14 – 23% για το δείγμα Νο. 1, 44 – 47% για το δείγμα Νο. 2 και 49 – 66% για το δείγμα Νο.3.

Πίνακας 4.21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών CBR.

Δείγμα	Δοκίμιο	Πραγματική υγρασία (%)	Διείσδυση (mm)	Αντίσταση (MPa)	Λόγος CBR (%)
1	A	14.19	2.54	1.608	23.30
			5.08	2.144	20.71
	B	16.59	2.54	1.005	14.57
			5.08	1.474	14.24
2	A	12.06	2.54	3.217	46.62
			5.08	4.557	44.03
	B	14.06	2.54	3.083	44.68
			5.08	4.557	44.03
3	A	14.09	2.54	4.557	66.04
			5.08	6.768	65.39

	B	16.71	2.54	3.418	49.53
			5.08	5.093	49.21

Δεδομένου ότι και τα τρία δείγματα ταξινομήθηκαν γεωτεχνικά ως «καλά διαβαθμισμένη άμμος με χαλίκια» (ενότητα 4.4.1, Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης), αναμένονται να δώσουν τιμές CBR από 20 – 40% (SW, βλέπε Πίνακα 2.9 στο κεφάλαιο 2 και Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22: Σχέση μεταξύ Ενιαίου Συστήματος Ταξινόμησης και τιμών CBR (Carter – Bentley, 1991).

Οι αποκλίσεις από αυτό το εύρος στο δείγμα Νο. 3, προφανώς οφείλονται στην μεγάλη περιεκτικότητα σε μεσαία – χονδρή άμμο και χαλίκια, τα οποία αυξάνουν τον δείκτη CBR, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.22.

Για το δείγμα Νο. 1 οι τιμές του λόγου φέρουσας ικανότητας (CBR) βρίσκονται εκτός του εύρους τιμών που αναφέρθηκαν, όταν η υγρασία της δοκιμής είναι μεγάλη (16.59%). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στον τρόπο που υπολογίσθηκαν οι βέλτιστες υγρασίες συμπύκνωσης, δηλαδή, με την χρησιμοποίηση του νομογράμματος στο Σχήμα 4.13 και τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας.

Το νομόγραμμα αυτό αφορά συμπύκνωση με την πρότυπη δοκιμή Proctor και όχι με την τροποποιημένη που εφαρμόστηκε στις δοκιμές CBR της παρούσας εργασίας. Στην τροποποιημένη δοκιμή Proctor αναμένονται μικρότερες βέλτιστες υγρασίες (λόγω μεγαλύτερης ενέργειας φόρτισης) και συνεπώς μεγαλύτερες τιμές CBR (βλέπε Σχήμα 4.15).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που συνάγονται από την παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Από την κοκκομετρική ανάλυση συμπεραίνεται ότι το κύριο κοκκομετρικό κλάσμα στα τρία δείγματα που αναλύθηκαν είναι η άμμος. Τα ποσοστά των λεπτόκοκκων (άργιλος και ιλύς) είναι αρκετά χαμηλά.
- Τα όρια υδαρότητας (LL) στα τρία δείγματα κυμαίνονται από 11 – 32%. Τα όρια πλαστικότητας (PL) κυμαίνονται από 18 – 20% και ο δείκτης πλαστικότητας (PI) από 11 – 12%.
- Με βάση το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (ASTM), προκύπτει ότι το υλικό και στα τρία δείγματα που εξετάστηκαν είναι «καλά διαβαθμισμένη άμμος με χαλίκια». Η κατάταξη των υλικών κατά AASHTO τα χαρακτηρίζει ως «A2-6».
- Κατά την περίοδο εκτέλεσης και λειτουργίας του έργου, θεωρείται ότι η πιθανότητα κορεσμού του εδάφους από την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων νερού (βροχές, πλημμύρες) είναι αμελητέα. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε ως μη αναγκαίος ο υδρεμποτισμός στις δοκιμές CBR που πραγματοποιήθηκαν.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, οι τιμές CBR και στα 3 δείγματα κυμαίνονται από 14 – 66% (14 – 23% για το δείγμα No. 1, 44 – 47% για το δείγμα No. 2 και 49 – 66% για το δείγμα No.3).
- Το εύρος των παραπάνω τιμών CBR για τα δείγματα No. 2 και No. 3 βρίσκονται εντός ή κοντά στις αναμενόμενες τιμές για «καλά διαβαθμισμένη άμμο με χαλίκια» (σύμφωνα με AASHTO T193). Οι όποιες αποκλίσεις των τιμών CBR που υπολογίστηκαν από τις αναμενόμενες, πιθανόν να οφείλονται στην αυξημένη συμμετοχή χονδρόκοκκων κλασμάτων (δείγμα No. 3) και στον τρόπο εκτίμησης των βέλτιστων υγρασιών συμπίκνωσης (δείγμα No. 1).
- Πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο στις παραπάνω τιμές του CBR παίζει η υγρασία, καθώς παρατηρείται ότι αύξηση της υγρασίας προκαλεί μείωση της τιμής του CBR.

- Σύμφωνα με τις «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 02-07-01-00 (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006) και την κατηγοριοποίηση με την μέθοδο των κατηγοριών Ε, τα δείγματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως «Ε2», το οποίο θεωρείται κατάλληλο για την κατασκευή επιχωμάτων οδοποιίας.
- Περαιτέρω βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών για την κατασκευή επιχωμάτων οδοποιίας μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη τσιμέντου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί στρώση με αυξημένη φέρουσα ικανότητα.
- Επίσης, βελτίωση επιτυγχάνεται πραγματοποιώντας σταθεροποίηση με την χρήση υδρασβέστου ή ασβεστούχου ιπτάμενης τέφρας. Η μέθοδος αυτή επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στα όρια Atterberg του εδαφικού υλικού, δίνοντας την δυνατότητα συμπίκνωσης σε περιπτώσεις με αυξημένη υγρασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βραχίμης, Σ. (2004). «Μέθοδοι διαστασιολόγησης ευκάμπτων και δυσκάμπτων οδοστρωμάτων». Μεταπτυχιακή διατριβή, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Σχολή Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Λεμεσός, Κύπρος.
<https://docslide.net/documents/6-55cf9dec550346d033afdcff.html>
- Γαλάνης, Χ. – Νικολόπουλος, Γ. (2016). «Δοκιμές εδαφομηχανικής σύμφωνα με Euro norms». Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ, Πάτρα.
- ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1989). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Μοχός». Χαρτογράφηση: J.E. Meuleunkamp, H.A. Jonkers (1972-77), Μ. Βιδάκης (1982-83), Κλίμακα 1:50.000.
- ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) (1996). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Ηράκλειο». Χαρτογράφηση: J.E. Meuleunkamp (1973), Μ. Βιδάκης (1983), Κλίμακα 1:50.000.
- Καλτεζιώτης, Ν. – Τσιαμπάος, Γ. (1992). «Παράγοντες που επηρεάζουν την παραμένουσα διατμητική αντοχή των μαργών». 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΤΕΕ, ΕΕΕΕΘ, Θεσσαλονίκη.
- Κοφίτσας, Ι. (2001). «Στοιχεία οδοποιίας». Εκδ. Ίων, Αθήνα.
- Κωστόπουλος, Σ. (1988). «Γεωτεχνική θεώρηση των μαργών του ελληνικού χώρου». 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΤΕΕ, ΕΕΕΕΘ, Αθήνα.
- Μαραγκού, Ι. (2005). «Έλεγχος καταλληλότητας για επιχώματα οδοστρώσας των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων της ευρύτερης περιοχής της μικρής περιμετρικής Πατρών». Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.
http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/963/1/Nimertis_Maragkou%28g%29.pdf

- Μαρσέλλος, Ν. (1990). «Δοκιμές Proctor, C.B.R., φόρτισης πλακός, συμπίκνωσης». Σεμινάριο: Νεώτερες εξελίξεις στην κατασκευή οδοστρωμάτων, ΤΕΕ, Αθήνα.
http://library.tee.gr/digital/m1051_1100/m1065/m1065_marsellos.pdf
- Νικολαΐδης, Α.Φ. (2002). «Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά – Έλεγχος ποιότητας». Εκδ. Τριανταφύλλου Μ. & Σία, Θεσσαλονίκη.
- Παπανδρέου, Σ. (2016). «Διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων». Πτυχιακή Εργασία, Τεχνικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός, Κύπρος.
- Παπανικολάου, Δ. – Βασιλάκης, Ε. – Βαλαδάκη, Α. – Ζαχαρίας, Ν. – Μανιάτης, Γ. (2008). «Ο υπολογισμός του ρυθμού ολίσθησης ρηξιτεμαχών ως απαραίτητο εργαλείο για την σχεδίαση πόλεων σε περιοχές με ενεργά ρήγματα. Εφαρμογή στην περιοχή της παράκτιας ζώνης του Ηρακλείου Κρήτης». 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, ΤΕΕ – ETAM, Αθήνα.
- Παπασπύρου, Σ.Ν. (2006). «Συμπυκνώσεις επιχωμάτων». Εκδ. Σέλκα – 4Μ ΕΠΕ – Τε-κδοτική, Αθήνα.
- Παπασπύρου, Σ.Ν. (2011). «Στρώσεις εξυγίανσης και βοηθητικές στρώσεις». Εκδ. Γραφικές Τέχνες Λύχνος ΕΠΕ, Αθήνα.
- Σακελλαρίου, Μ. (2003). «Εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής, Αθήνα.
- Σακελλαρίου, Μ. (2006). «Τεχνικά υλικά – Επιχώματα». Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής, Αθήνα.
http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1020/document/TEXNIKA_YLIKA.pdf
- Σαμπατακάκης, Ν.Σ. – Κούκης, Γ. – Δεπούντης, Ν. (2011). «Εφαρμογές της Τεχνικής Γεωλογίας και Γεωτεχνικής στα τεχνικά έργα». Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Στειακάκης, Ε. (2010). «Εργαστηριακές ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής». Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Χανιά.

- Τσιαμπάος, Γ. (1988). «Τεχνικογεωολογικοί χαρακτήρες των Μαργών Ηρακλείου Κρήτης». Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.
- Τσώχος, Γ. (1990). «Κατασκευή άκαμπτων οδοστρωμάτων». Σεμινάριο: Νεώτερες εξελίξεις στην κατασκευή οδοστρωμάτων, ΤΕΕ, Αθήνα.
- ΥΔΕ (Υπουργείον Δημοσίων Έργων) (1966). «Πρότυπος Τεχνική Προδιαγραφή 0 150». Αθήνα.
<http://www.egnatia.eu/files/pdf/150.pdf>
- ΥΔΕ (Υπουργείον Δημοσίων Έργων) (1966). «Πρότυπος Τεχνική Προδιαγραφή 0 155». Αθήνα.
<http://www.egnatia.eu/files/pdf/155.pdf>
- ΥΔΕ (Υπουργείον Δημοσίων Έργων) (1966). «Πρότυπος Τεχνική Προδιαγραφή XI». Αθήνα.
<http://www.egnatia.eu/files/pdf/1.pdf>
- ΥΠΕΧΩΔΕ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων) (2003). «120. Χωματοургικές εργασίες». Πρότυπα Τεύχη για Περιφερειακά Έργα, Τεύχη Δημοπράτησης, Γενική Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων, Αθήνα.
http://www.hellaskps.gr/min_requirements/docs/PE1/DGTSY/1Genika/TD-D-120.0.htm
- ΥΠΕΧΩΔΕ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων) (2003). «810. Ύφαλες και έξαλες επιχώσεις». Πρότυπα Τεύχη για Περιφερειακά Έργα, Τεύχη Δημοπράτησης, Γενική Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων, Αθήνα.
http://www.hellaskps.gr/min_requirements/docs/PE1/DGTSY/4Limenika/TD-D-810.0.htm
- ΥΠΕΧΩΔΕ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων) (2006). «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 02-07-01-00». Αθήνα.
<http://www.ggde.gr/dmdocuments/02-07-01-00.pdf>
- ΥΠΕΧΩΔΕ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων) (2006). «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 02-07-03-00». Αθήνα.

- ΦΕΚ 955/31-12-86 (1986). «Προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής Ε 105-86». Αθήνα.
- AASHTO M145 (2017). «Classification of soil and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes – Standard specification for materials for aggregate and soil–aggregate subbase, base, and surface courses». Washington D.C., USA.
- AASHTO T104 (1999). «Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate». Washington D.C., USA.
- AASHTO T176 (2017). «Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test». Washington D.C., USA.
- AASHTO T193 (2003). «Standard method of test for the California Bearing Ratio». Washington D.C., USA.
- ASTM D1883-99 (1999). «Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory – compacted soils». Philadelphia, USA.
- ASTM D2167-84 (1994). «Standard test method for density and unit weight of soil in place by the Rubber Balloon Method». Philadelphia, USA.
- ASTM D2487-17 (2017). «Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)». Philadelphia, USA.
- ASTM D2940 (2010). «Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports». Philadelphia, USA.
- ASTM D422-63 (1998). «Standard test method for particle-size analysis of soils (Reapproved 1998)». Philadelphia, USA.
- ASTM D4429-09a (2018). «Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of soils in place (Withdrawn 2018)». Philadelphia, USA.
- Carter, M. – Bentley, S. (1991). «Correlations of soil properties». Pentech Press Publishers, London, UK.
- Head, K.H. (1994). «Manual of soil laboratory testing, Vol. 2». Pentech Press, Second Edition, London, UK.

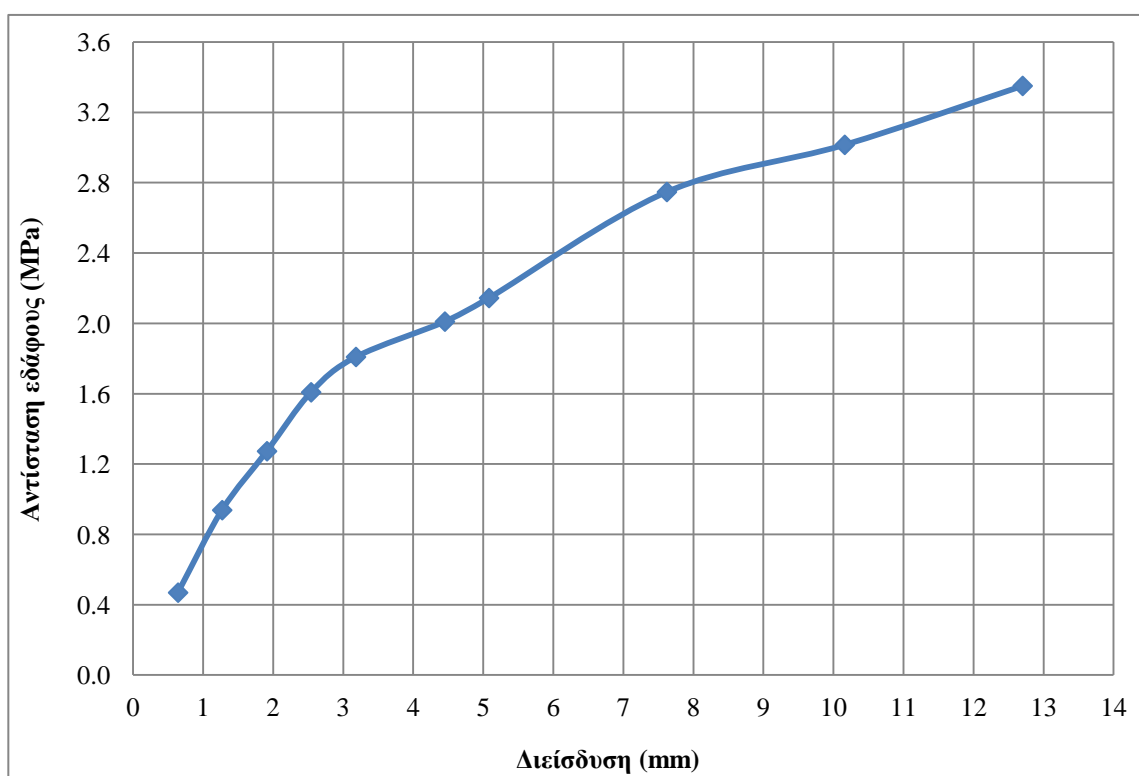
- Tsiambaos, G. (1989). «Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls». Elsevier Science Publishers B.V., Engineering Geology 30, Amsterdam, Netherlands, pp. 357-369.
- Davis, E.H. (1949). «The California Bearing Ratio method for the design of flexible roads and runaways». Geotechnique, Vol. 1, No. 4, pp. 249-263.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εδαφικό δείγμα 1-A (w = 14.19%)

Πίνακας Π.1: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 1-A.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)				52.75		Ποσοστό υγρασίας (%)				14.19
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)				61.52						
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)				60.43						
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)				11211		Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4461
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	70	140	190	240	270	300	320	410	450	500
Αντίδραση (kN)	0.908	1.815	2.464	3.112	3.501	3.890	4.149	5.316	5.835	6.484
Αντίσταση εδάφους (MPa)	0.469	0.938	1.273	1.608	1.809	2.010	2.144	2.748	3.016	3.351

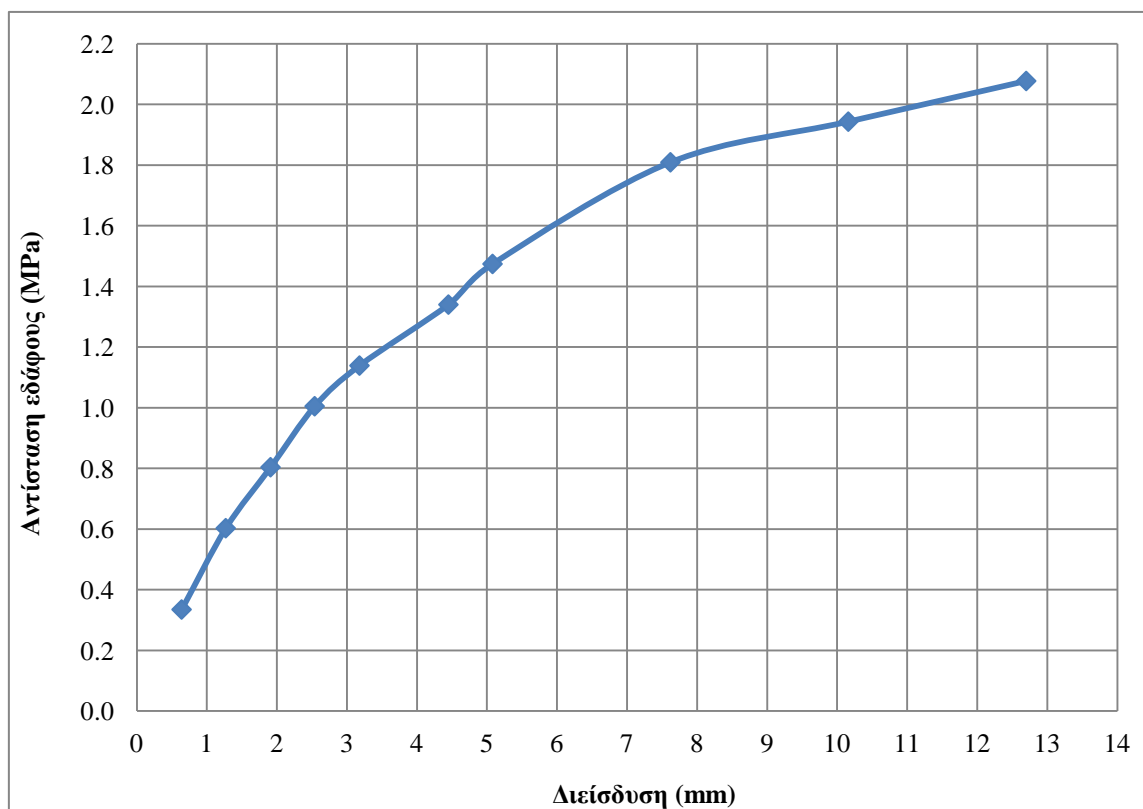


Σχήμα Π.1: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 1-A.

Εδαφικό δείγμα 1-B (w = 16.59%)

Πίνακας Π.2: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 1-B.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)				43.78		Ποσοστό υγρασίας (%)				16.59
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)				55.80						
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)				54.09						
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)				11256		Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4506
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	50	90	120	150	170	200	220	270	290	310
Αντίδραση (kN)	0.648	1.167	1.556	1.945	2.204	2.593	2.853	3.501	3.760	4.020
Αντίσταση εδάφους (MPa)	0.335	0.603	0.804	1.005	1.139	1.340	1.474	1.809	1.943	2.077

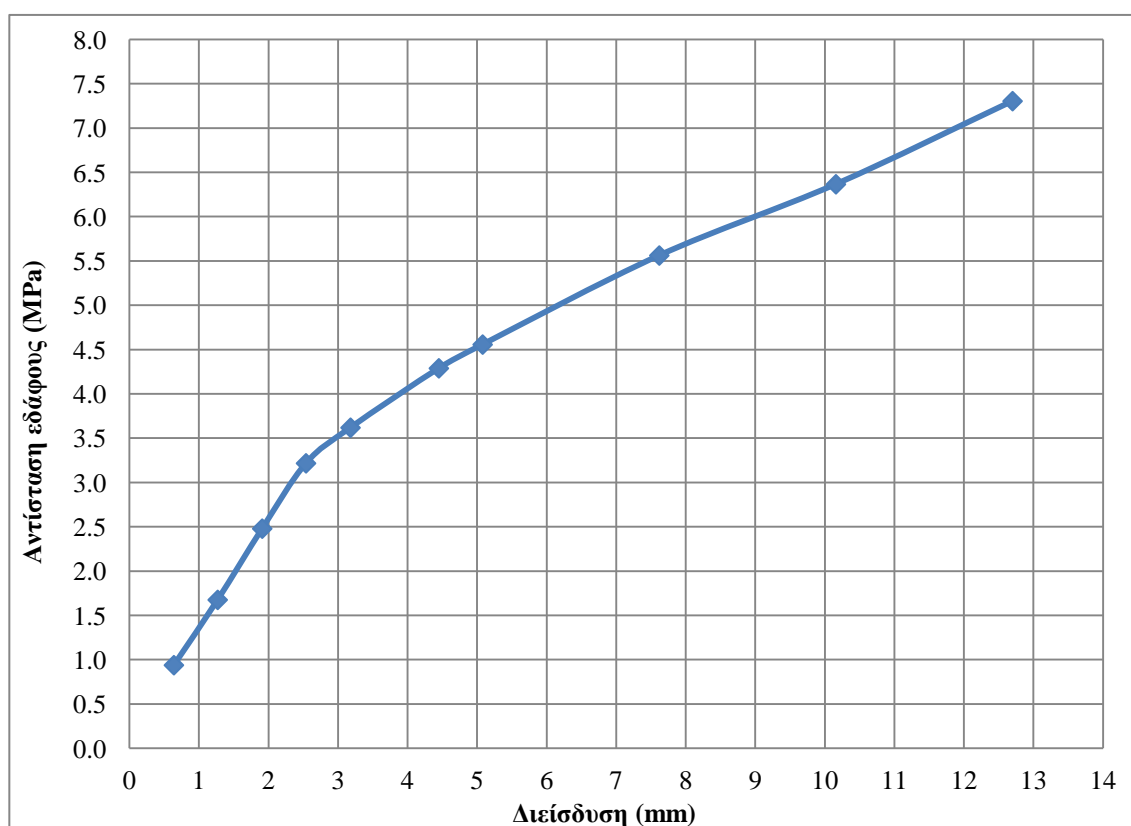


Σχήμα Π.2: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 1-B.

Εδαφικό δείγμα 2-A (w = 12.06%)

Πίνακας Π.3: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 2-A.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)				40.10		Ποσοστό υγρασίας (%)				12.06
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)				50.04						
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)				48.97						
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)				11380		Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4630
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	140	250	370	480	540	640	680	830	950	1090
Αντίδραση (kN)	1.815	3.242	4.798	6.224	7.002	8.299	8.818	10.763	12.319	14.134
Αντίσταση εδάφους (MPa)	0.938	1.675	2.479	3.217	3.619	4.289	4.557	5.562	6.366	7.304

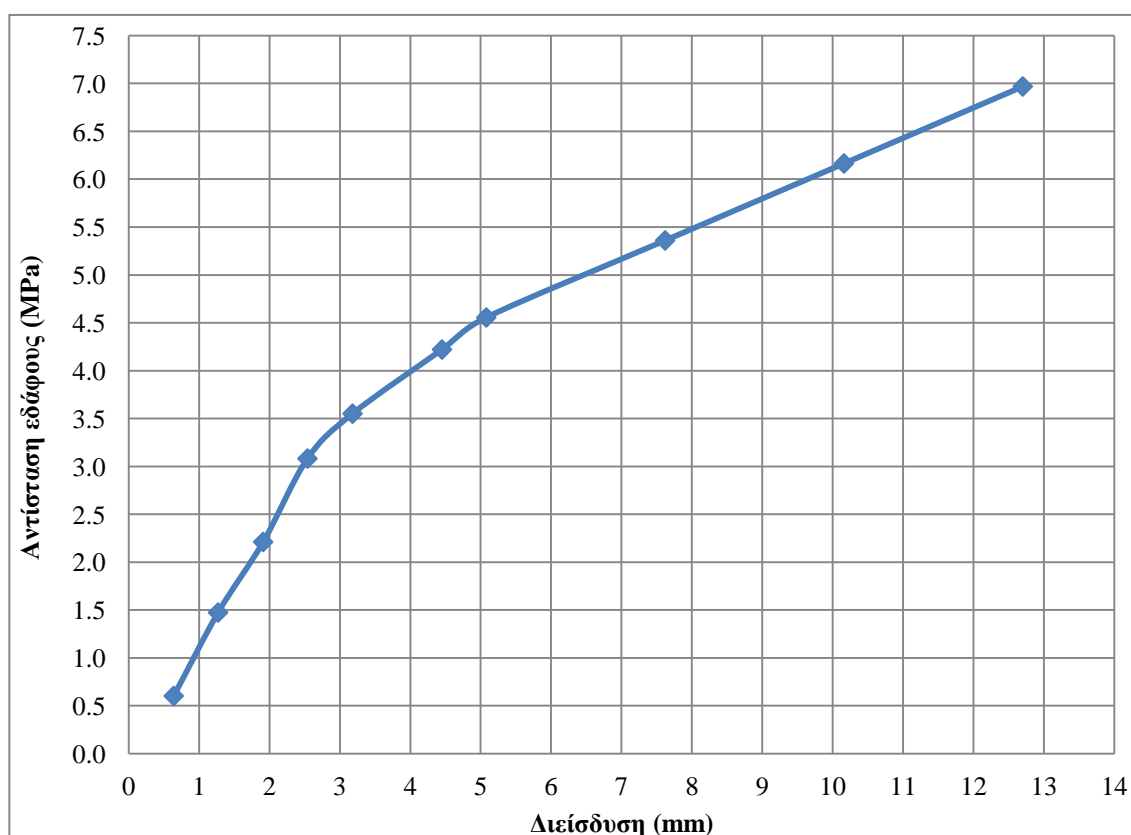


Σχήμα Π.3: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 2-A.

Εδαφικό δείγμα 2-B (w = 14.06%)

Πίνακας Π.4: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 2-B.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)					52.22	Ποσοστό υγρασίας (%)				14.06
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)					61.47					
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)					60.33					
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)					11302	Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4552
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	90	220	330	460	530	630	680	800	920	1040
Αντίδραση εδάφους (kN)	0.648	1.167	1.556	1.945	2.204	2.593	2.853	3.501	3.760	4.020
Αντίσταση εδάφους (MPa)	0.335	0.603	0.804	1.005	1.139	1.340	1.474	1.809	1.943	2.077

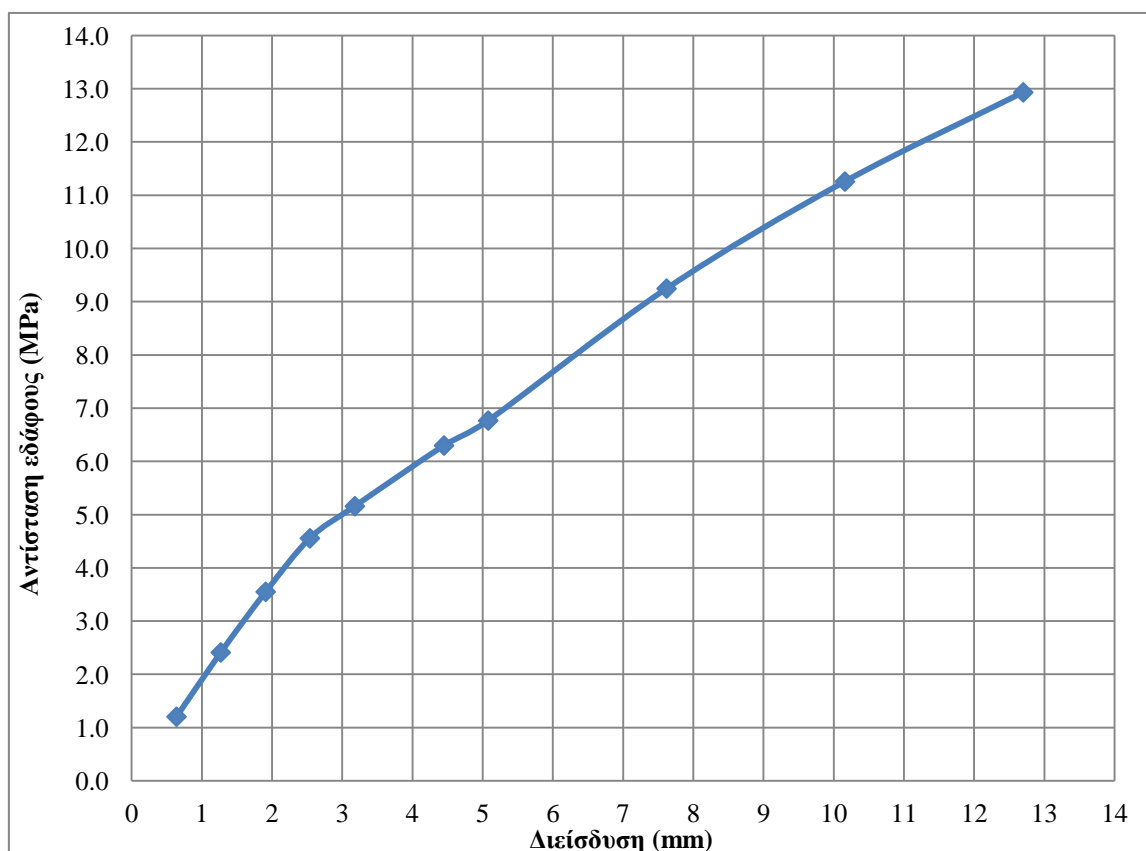


Σχήμα Π.4: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 2-B.

Εδαφικό δείγμα 3-A (w = 14.09%)

Πίνακας Π.5: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 3-A.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)					43.13	Ποσοστό υγρασίας (%)				14.09
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)					49.69					
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)					48.88					
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)					11247	Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4497
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	180	360	530	680	770	940	1010	1380	1680	1930
Αντίδραση εδάφους (kN)	2.334	4.668	6.873	8.818	9.985	12.189	13.097	17.894	21.785	25.026
Αντίσταση εδάφους (MPa)	1.206	2.412	3.552	4.557	5.160	6.299	6.768	9.248	11.258	12.933

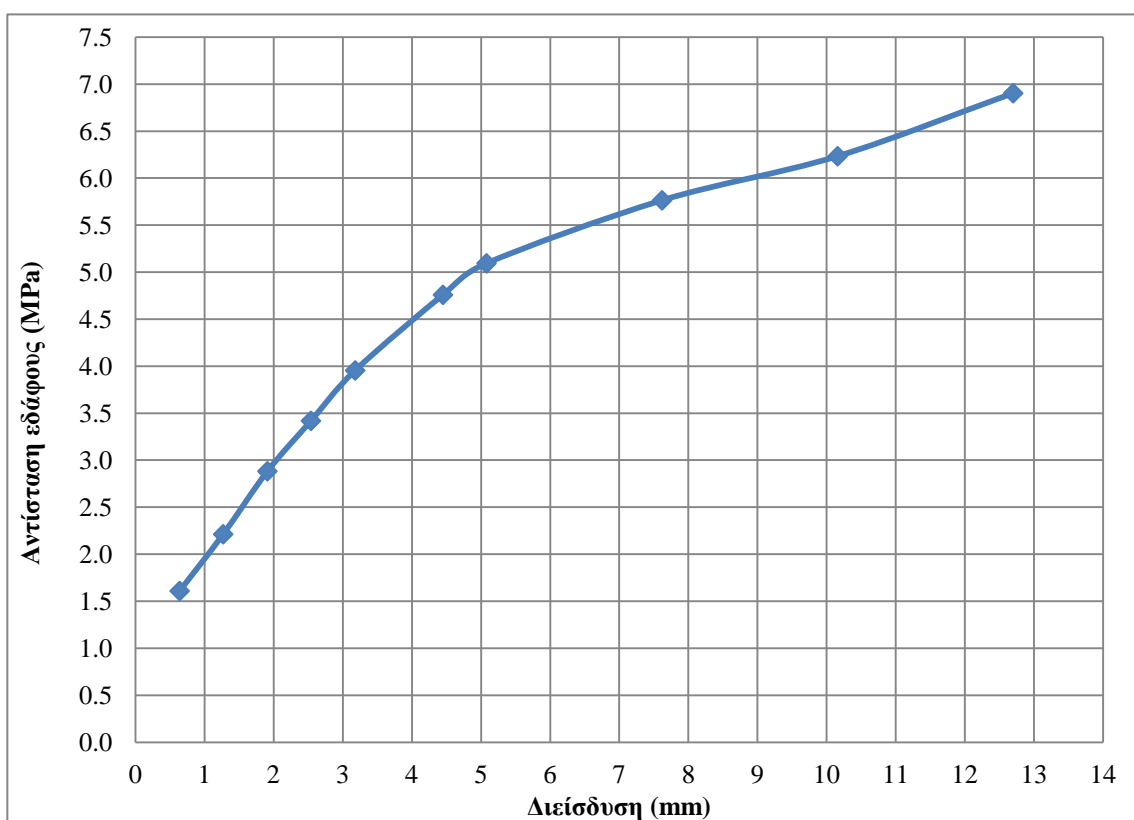


Σχήμα Π.5: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 3-A.

Εδαφικό δείγμα 3-B (w = 16.71%)

Πίνακας Π.6: Αποτελέσματα δοκιμής CBR στο δείγμα 3-B.

Υπολογισμός υγρασίας										
Μάζα υποδοχέα (g)				48.05		Ποσοστό υγρασίας (%)				16.71
Μάζα υποδοχέα + υγρού δείγματος (g)				57.97						
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)				56.55						
Υπολογισμός μάζας εδαφικού υλικού										
Συνολική μάζα (μήτρα + βάση + υλικό) (g)				11196		Μάζα εδαφικού υλικού (g)				4446
Μετρήσεις										
Ενδείξεις διείσδυσης (div)	64	127	191	254	318	445	508	762	1016	1270
Διείσδυση εμβόλου (mm)	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	4.45	5.08	7.62	10.16	12.7
Ενδείξεις φορτίου (div)	240	330	430	510	590	710	760	860	930	1030
Αντίδραση (kN)	3.112	4.279	5.576	6.613	7.651	9.207	9.855	11.152	12.059	13.356
Αντίσταση εδάφους (MPa)	1.608	2.211	2.882	3.418	3.954	4.758	5.093	5.763	6.232	6.902



Σχήμα Π.6: Διάγραμμα δοκιμής CBR στο δείγμα 3-B.