



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ
ΑΡΓΙΛΟΜΑΡΓΑΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΑΠΗΤΑ ΣΕ Χ.Υ.Τ.Α.»**

ΑΛΚΥΟΝΗ Γ. ΣΥΝΑΤΣΑΚΗ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ – ΛΕΚΤΟΡΑΣ)

Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ

(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Γ. ΑΛΕΒΙΖΟΣ

(ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΧΑΝΙΑ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Εμμανουήλ Στειακάκη, τόσο για την εμπιστοσύνη του ως προς την ανάθεση του θέματος, όσο και για την πολύτιμη βοήθειά του, την υποστήριξη, την άψογη συνεργασία και το ενδιαφέρον του που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών και της συγγραφής της.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, Καθηγητή, και κ. Γεώργιο Αλεβίζο, Επίκουρο Καθηγητή, που συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή, για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους στο κείμενο και την καλή τους διάθεση να αφιερώσουν μέρος από τον πολύτιμο χρόνο τους για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Διονύση Βαβαδάκη, συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, για την ανεκτίμητη βοήθειά του και τις χρήσιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν.Καθηγητή κ. Νίκο Πασσαδάκη, την κ. Όλγα Παντελάκη και τον κ. Γιώργο Τριανταφύλλου για την σημαντική βοήθειά τους στις εργαστηριακές δοκιμές οργανικού άνθρακα, ειδικής επιφάνειας και ανθρακικού ασβεστίου που έγιναν στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Σ' αυτό το σημείο δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω τους φίλους μου και τους συμφοιτητές μου, τόσο για την ηθική υποστήριξή τους όσο και για

την συμπαράσταση τους σε όλες τις δύσκολες στιγμές των φοιτητικών μου χρόνων.

Τελειώνοντας θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη μου στους γονείς μου για την ανυπολόγιστη συνεισφορά, για την ηθική υποστήριξη και για την ανυπέρβλητη υπομονή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και της αδερφής μου που αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα στις προσπάθειές μου, δείχνοντας πάντα αμέριστη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη!!! Είναι πάντα ένα ισχυρό κίνητρο για να προσπαθώ!!!

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

Στην οικογένεια μου...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της καταλληλότητας μιας αργιλομάργας για χρησιμοποίησή του ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/καλλύματος σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.).

Για την έρευνα επιλέχθηκε διανειοθάλαμος που βρίσκεται στους Νεογενείς σχηματισμούς του Ν. Ηρακλείου (θέση Χαλαυριανός).

Προσδιορίστηκαν εργαστηριακά, η ορυκτολογική σύσταση του γεωυλικού και οι συγκεντρώσεις σε ανθρακικό ασβέστιο και σε οργανικό άνθρακα. Επίσης, διερευνήθηκε η κοκκομετρική του διαβάθμιση, η υδροπερατότητά του, τα όρια Atteberg (υδαρότητας, πλαστικότητας, συρρίκνωσης) και η διόγκωσιμότητα του, όπως επίσης η αντοχή του και η συμπιεστότητα του.

Οι παραπάνω παράμετροι συγκρίθηκαν με τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές, προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα του συγκεκριμένου γεωυλικού για χρήση του στην κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ Χ.Υ.Τ.Α ΓΙΑ ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.	- 4 -
2.1. Επιλογή θέσης	- 5 -
2.2. Γεωτεχνικά κριτήρια	- 7 -
2.3. Γεωλογικά κριτήρια	- 8 -
2.4. Υδρογεωλογικά κριτήρια	- 9 -
2.5. Τοπογραφικά κριτήρια	- 10 -
2.6. Υδρολογικά κριτήρια.....	- 11 -
2.7. Διάθεση στραγγίσματος και βιοαερίου	- 11 -
2.8. Τυπικές διατάξεις των σύγχρονων Χ.Υ.Τ.Α.	- 13 -
2.8.1. Στεγανωτικές στρώσεις πυθμένα	- 15 -
2.8.2. Στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου	- 17 -
2.8.3. Σύστημα συλλογής του στραγγίσματος	- 24 -
2.8.4. Σύστημα τελικής κάλυψης	- 28 -
2.8.5. Σύστημα απαγωγής του βιοαερίου	- 29 -
2.9. Απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές στην Ελλάδα.....	- 30 -
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	- 32 -
3.1. Γεωμορφολογία περιοχής	- 32 -
3.2. Γεωλογία περιοχής	- 32 -
4. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	- 37 -
4.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD).....	- 37 -
4.1.1. Πειραματική διαδικασία	- 37 -
4.1.2. Αποτελέσματα.....	- 38 -

4.2. Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου	- 41 -
4.2.1. Πειραματική διαδικασία	- 42 -
4.2.2. Υπολογισμοί.....	- 43 -
4.2.3. Αποτελέσματα.....	- 44 -
4.3. Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC).....	- 44 -
4.3.1. Πειραματική διαδικασία	- 45 -
4.3.2. Αποτελέσματα.....	- 46 -
4.4. Εκτίμηση ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (CEC).....	- 47 -
4.4.1. Εμπειρικός υπολογισμός	- 49 -
5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ-	
50 -	
5.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	- 50 -
5.1.1. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα.....	- 51 -
5.1.2. Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση αραιομέτρου.....	- 54 -
5.1.3. Αποτελέσματα.....	- 57 -
5.2. Προσδιορισμός ορίων Atteberg.....	- 60 -
5.2.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας	- 62 -
5.2.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας.....	- 64 -
5.2.3. Προσδιορισμός ορίου γραμμικής συρρίκνωσης	- 65 -
5.2.4. Αποτελέσματα.....	- 66 -
5.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση του γεωυλικού.....	- 67 -
5.4. Προσδιορισμός διογκωσιμότητας.....	- 70 -
5.4.1. Πειραματική διαδικασία	- 71 -
5.4.2. Αποτελέσματα.....	- 71 -
5.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ.....	- 72 -
5.5.1. Συμπύκνωση με την πρότυπη μέθοδο Proctor	- 75 -
5.5.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα	- 78 -

5.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....	- 80 -
5.6.1. Μετρήσεις με περατόμετρο πίπτοντος φορτίου	- 81 -
5.6.1. Πειραματική διαδικασία	- 84 -
5.6.2. Αποτελέσματα.....	- 85 -
5.7. Μετρήσεις με περατόμετρο υψηλής πίεσης	- 85 -
5.7.1. Πειραματική διαδικασία	- 87 -
5.7.2. Υπολογισμοί.....	- 88 -
5.7.3. Αποτελέσματα.....	- 89 -
5.8. Εκτίμηση υδροπερατότητας από εμπειρικούς τύπους	- 91 -
5.8.1. Προσδιορισμός ειδικής επιφάνειας.....	- 92 -
5.8.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα	- 93 -
5.9. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ	- 94 -
5.9.1. Πειραματική διαδικασία	- 96 -
5.9.2. Αποτελέσματα.....	- 98 -
5.10 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ	- 101 -
5.10.1.Πειραματική διαδικασία	- 102 -
5.10.2.Υπολογισμοί – Αποτελέσματα	- 104 -
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 107 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 111 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Χ.Υ.Τ.Α ονομάζονται οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και διακρίνονται σε 3 κατηγορίες: Χ.Υ.Τ.Α επικίνδυνων αποβλήτων, Χ.Υ.Τ.Α μη επικίνδυνων αποβλήτων, Χ.Υ.ΤΑ αδρανών αποβλήτων. Για την κατασκευή Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) είναι σημαντική η κατάλληλη επιλογή εδάφους για χρησιμοποίηση του ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/κάλυμμα σε Χ.Υ.ΤΑ προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς τα απορρίμματα κατά την αποσύνθεσή τους παράγουν στραγγίσματα και βιοαέριο πολύ επιβλαβή για την ατμόσφαιρα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της καταλληλότητας αργιλομάργας νεογενών σχηματισμών του Ν.Ηρακλείου για χρήση του ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/καλύμματος σε Χ.Υ.Τ.Α.

Η θέση της δειγματοληψίας δίνεται στο **Σχήμα 1.1**.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα που ελήφθησαν, έχουν ως εξής:

- Ορυκτολογικές δοκιμές:
 - Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD).
 - Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου.
 - Προσδιορισμός οργανικού άνθρακα (TOC).
 - Εκτίμηση ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων.
- Δοκιμές για γεωτεχνική ταξινόμηση:



Σχήμα 1.1: Θέση δειγματοληψίας. Τρισδιάστατη εικόνα από GoogleEarth. Άποψη από ΝΔ.

- Κοκκομετρική διαβάθμιση.
- Προσδιορισμός ορίων Atteberg (όρια υδαρότητας, πλαστικότητας, συρρίκνωσης, δείκτης πλαστικότητας).
- Εκτίμηση διόγκωσης.
- Δοκιμές συμπίκνωσης.
- Δοκιμές για εκτίμηση υδροπερατότητας:
 - Μετρήσεις υδροπερατότητας σε περατόμετρο πίπτοντος φορτίου.
 - Μετρήσεις υδροπερατότητας σε περατόμετρο υψηλού φορτίου.

- Προσδιορισμός ειδικής επιφάνειας και εκτίμηση της υδροπερατότητας με εφαρμογή εμπειρικών τύπων.
- Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης.
- Δοκιμές συμπίεστικότητας.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών συγκρίθηκαν με τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές, και διαπιστώθηκε η καταλληλότητα της συγκεκριμένης αργιλομάργας για χρήση του ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/καλύμματος σε Χ.Υ.Τ.Α.

2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ Χ.Υ.Τ.Α ΓΙΑ ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.

Στις μέρες μας κατασκευάζονται όλο και περισσότεροι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) για λόγους που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος.

Τυπικά, η απόθεση των αποβλήτων στους χώρους αυτούς γίνεται σε κυψέλες πάχους μέχρι 5 m περίπου, οι οποίες καθημερινά καλύπτονται με γαιώδη υλικά πάχους 0,15 – 0,30 m για τον περιορισμό των αναθυμιάσεων, του κινδύνου αυτανάφλεξης των απορριμμάτων, της διασποράς των απορριμμάτων από τα πουλιά και της κατείσδυσης των υδάτων και των βροχοπτώσεων (Καββαδάς, 2007).

Στον πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων κατασκευάζεται αδιαπέρατη στρώση για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους, και το σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης των ρυπογόνων υγρών στραγγισμάτων των απορριμμάτων και του παραγόμενου βιοαερίου.

Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης για την δημιουργία Χ.Υ.Τ.Α. παίζουν ρόλο διάφοροι παράγοντες, όπως η απόσταση από την πηγή γένεσης των αποβλήτων, το κλίμα, η γεωλογία / υδρογεωλογία, η απόσταση από αεροδρόμια, οι διαθέσιμες εκτάσεις αλλά κυρίως οι αντιδράσεις των διαφόρων κοινωνικών ομάδων (Καββαδάς, 2007).

2.1. Επιλογή θέσης

Στην επιλογή της θέσης κατασκευής ενός σύγχρονου Χ.Υ.Τ.Α. λαμβάνονται υπόψη και συναξιολογούνται τα εξής τεχνικά στοιχεία (Καββαδάς, 2007):

1. Χάρτες και λοιπά στοιχεία αποτύπωσης της περιοχής που περιλαμβάνουν:
 - i. Τοπογραφικούς χάρτες για τον εντοπισμό των κατάλληλων φυσικών κοιλωμάτων, την κατανόηση του συστήματος φυσικής αποστράγγισης της περιοχής, την παρουσία υδροβιότοπων, περιοχών που πλημμυρίζουν συχνά, καλλιεργήσιμων εκτάσεων κλπ.
 - ii. Αεροφωτογραφίες για τον προσδιορισμό της χλωρίδας της περιοχής των καλλιεργήσιμων εκτάσεων, γεωτρήσεων ύδρευσης κλπ.
 - iii. Κυκλοφοριακούς χάρτες με σκοπό τον προσδιορισμό του διαθέσιμου κυκλοφοριακού δικτύου για την μεταφορά των αποβλήτων από την πηγή γένεσης στο χώρο απόθεσης.
 - iv. Γεωλογικούς και υδρογεωλογικούς χάρτες για τον προσδιορισμό του είδους των πετρωμάτων και των υδροφορέων, τη δίατα του υπόγειου νερού, την παρουσία πηγών, τη διαθεσιμότητα δανειοθαλάμων για την απόληψη των εδαφικών υλικών ημερήσιας κάλυψης των απορριμμάτων.
 - v. Υδρογεωλογικά και μετεωρολογικά στοιχεία που αφορούν το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις), τη θερμοκρασία και την αναμενόμενη εξατμισοδιαπνοή. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τις ποσότητες των επιφανειακών νερών που θα πρέπει να αποστραγγισθούν, ώστε

να μην αυξηθεί ο όγκος του υγρού στραγγίσματος. Τέλος, η ένταση και διεύθυνση των ανέμων επηρεάζει την διάδοση των οσμών, ρύπων και σκόνης προς τα κατάντη.

2. Στοιχεία για το είδος, την ποσότητα και τη σύνθεση των αποβλήτων. Στην περίπτωση των βιομηχανικών αποβλήτων, θα πρέπει να διευκρινισθεί το είδος των αποβλήτων, το ρυπαντικό τους φορτίο και οι αναμενόμενες ποσότητες.

Όσον αφορά την χωροθέτηση ενός Χ.Υ.Τ.Α., συνήθως εφαρμόζονται τα εξής (Καββαδάς, 2007):

- (1) Ελάχιστη απόσταση 300 m από λίμνες. Η ελάχιστη απόσταση θα πρέπει να αυξηθεί σε περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα επιφανειακής απορροής των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων από την περιοχή του Χ.Υ.Τ.Α. προς την λίμνη.
- (2) Ελάχιστη απόσταση 100 m από ποταμούς.
- (3) Απαγόρευση κατασκευής Χ.Υ.Τ.Α. σε περιοχές που υπάρχει πιθανότητα να πλημμυρίζουν. Συνήθως ως όριο χρησιμοποιείται η πιθανότητα πλημμύρας για βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 100 ετών.
- (4) Ελάχιστη απόσταση 300 m από εθνικές οδούς, εθνικά πάρκα κλπ. Ο περιορισμός αυτός τίθεται κυρίως για αισθητικούς λόγους και μπορεί να μειωθεί εάν κατασκευασθεί κατάλληλο διάφραγμα οπτικής απομόνωσης (π.χ. συστοιχία δένδρων).
- (5) Απαγόρευση κατασκευής Χ.Υ.Τ.Α σε προστατευμένους βιότοπους και υδροβιότοπους.
- (6) Ελάχιστη απόσταση 3000 m από αεροδρόμια που χρησιμοποιούνται από αεριωθούμενα αεροσκάφη και 1.500 m από αεροδρόμια που

χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από ελικοφόρα αεροσκάφη. Ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται για την αποφυγή όχλησης των αεροπλάνων από τα πουλιά που συνήθως συγκεντρώνονται στις περιοχές των Χ.Υ.Τ.Α.

- (7) Ελάχιστη απόσταση 400 m από πηγάδια υδρεύσεως. Η απόσταση μπορεί να αυξηθεί σε περίπτωση ύπαρξης πηγαδιών κατάντη του Χ.Υ.Τ.Α. Ο περιορισμός αυτός δεν καλύπτει την περίπτωση οργανωμένων υδρογεωτρήσεων για την ύδρευση οικισμών, όπου η ελάχιστη απόσταση θα πρέπει να καθορίζεται μετά από ειδική υδρογεωλογική μελέτη.
- (8) Ελάχιστη απόσταση 60 m από τεκτονικά ρήγματα, τα οποία εκτιμάται ότι έχουν ενεργοποιηθεί κατά το Ολόκαινο.

2.2. Γεωτεχνικά κριτήρια

Τα γεωτεχνικά κριτήρια κατασκευής Χ.Υ.Τ.Α. μπορούν να συνοψισθούν στα εξής (Καββαδάς, 2007):

1. Διαπερατότητα του εδάφους: επηρεάζει τη δυνατότητα διαφυγής ρύπων προς τους υδροφορείς της περιοχής, σε περίπτωση αστοχίας των τεχνικών μέτρων σφράγισης του πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. Είναι προφανές ότι εδάφη μικρής διαπερατότητας προτιμώνται για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α.
2. Το pH του εδαφικού νερού: χαρακτηρίζει την ικανότητα προσρόφησης βαρέων μετάλλων. Υψηλότερες τιμές του pH είναι προτιμότερες (μεγαλύτερη ικανότητα προσρόφησης βαρέων μετάλλων).

3. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC): χαρακτηρίζει την ικανότητα του εδάφους να αδρανοποιεί ποικίλους ρύπους μέσω των μηχανισμών ανταλλαγής κατιόντων και προσρόφησης. Υψηλότερες τιμές του δείκτη CEC είναι προτιμότερες.
4. Η φύση των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων: επηρεάζει της απαιτήσεις θεμελίωσης του έργου (π.χ. συμπύκνωση του φυσικού εδάφους πριν από την κατασκευή της στεγανωτικής μεμβράνης), τις συνθήκες ευστάθειας των περιμετρικών πρανών της εκσκαφής (σε περίπτωση υπόγειου Χ.Υ.Τ.Α.), τις πιθανές υποχωρήσεις κλπ. Γενικώς, η παρουσία στιφρών αργιλικών εδαφών με χαμηλή στάθμη υπόγειου ορίζοντα είναι προτιμητέα, τόσο λόγω της μικρής τους συμπιεστότητας όσο και λόγω της μικρής τους διαπερατότητας.
5. Διαθέσιμα υλικά: θα πρέπει στην περιοχή να διατίθενται δανειοθάλαμοι σχετικώς αδιαπέρατων εδαφικών υλικών για την καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων. Οι απαιτούμενοι όγκοι των εδαφικών υλικών αποτελούν σημαντικό ποσοστό (20 – 25%) του όγκου των απορριμμάτων.

2.3. Γεωλογικά κριτήρια

Γεωλογικά, θα πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω (Καββαδάς, 2007):

1. Φύση και εμφάνιση του υποβάθρου: Η παρουσία ασβεστόλιθων σε μικρό βάθος και ιδίως επιφανειακά δεν είναι ευνοϊκή, λόγω πιθανής καρστικοποίησης τους και της ως εκ τούτο αύξησης της διαπερατότητας. Το ίδιο ισχύει και για άλλους τύπους βραχωδών σχηματισμών που

εμφανίζουν έντονη ρηγμάτωση. Γενικώς η παρουσία εδαφικού καλύμματος μεγάλου πάχους είναι ευνοϊκή.

2. Τεκτονικά ρήγματα: Η παρουσία τεκτονικών ρηγμάτων δεν είναι ευνοϊκή λόγω της γενικώς αυξημένης διαπερατότητας κατά μήκος των αξόνων των ρηγμάτων και των πιθανών μετακινήσεων (στις περιπτώσεις ενεργών ρηγμάτων).

2.4. Υδρογεωλογικά κριτήρια

Προκειμένου για τα υπόγεια νερά, οι απαιτήσεις για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. είναι οι κάτωθι (Καββαδάς, 2007):

1. Παρουσία υδροφορέων: Η παρουσία υδροφορέων με αξιόλογο δυναμικό (ανεξαρτήτως του εάν βρίσκονται υπό καθεστώς εκμετάλλευσης), σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, αποτελεί απαγορευτικό παράγοντα για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. στην περιοχή, λόγω της πιθανής ανεξέλεγκτης ρύπανσης σε περίπτωση αστοχίας των τεχνικών μέτρων στεγάνωσης του αποδέκτη των αποβλήτων. Σε περίπτωση υδροφορέων που βρίσκονται υπό καθεστώς εκμετάλλευσης για την ύδρευση οικισμών, οι περιορισμοί είναι ακόμη αυστηρότεροι (όσον αφορά το απαιτούμενο ελάχιστο βάθος).
2. Ποιότητα του υπόγειου νερού: Περιοχές στις οποίες οι υδροφορείς έχουν φτωχή ποιότητα υπόγειου νερού (π.χ. λόγω υφαλμύρωσης ή ρύπανσης από διαφορετικά αίτια) είναι προτιμητέες για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α.
3. Διάιτα του υπόγειου νερού: Περιοχές στις οποίες η κίνηση του υπόγειου νερού είναι τέτοια ώστε να το απομακρύνει από κατοικημένες περιοχές,

ή όπου η κατακόρυφη κίνηση του υπόγειου νερού γίνεται από κάτω προς τα άνω, είναι προτιμητέες για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. Επίσης, περιοχές με μικρή εποχιακή διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού είναι προτιμητέες, επειδή με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η διασπορά των ρύπων από τη μερικώς κορεσμένη ζώνη προς τον υδροφορέα. Τέλος, είναι προφανές ότι προτιμητέες είναι οι περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

2.5. Τοπογραφικά κριτήρια

Η μορφολογία της περιοχής είναι επίσης σημαντική, όπως φαίνεται στα επόμενα (Καββαδάς, 2007):

1. Κλίση του φυσικού εδάφους: Είναι προτιμότερες περιοχές σχεδόν οριζόντιες ή με κατά δυνατόν μικρές κλίσεις (μέχρι 15 – 20%). Στην περίπτωση μεγαλύτερων κλίσεων, είναι πιθανή η επέκταση της ρύπανσης μέσω της ανεξέλεγκτης επιφανειακής απορροής των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.
2. Διαβρωσιμότητα του εδάφους: Περιοχές με έντονα τοπογραφικά χαρακτηριστικά διάβρωσης του εδάφους δεν συνιστώνται για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α., λόγω της ανάγκης περιορισμού της διάβρωσης των εδαφικών υλικών από τα επιφανειακά νερά με περιμετρικά αναχώματα, αναβαθμούς ανάσχεσης των πλημμύρων κλπ.

2.6. Υδρολογικά κριτήρια

Οι απαιτήσεις για τα επιφανειακά νερά, είναι οι εξής (Καββαδάς, 2007):

1. Ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων: Οι έντονες βροχοπτώσεις σε μια περιοχή δεν ευνοούν την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α., λόγω της ανάγκης αποστράγγισης των υδάτων, ώστε να περιορίζεται κατά το δυνατόν ο όγκος του υγρού στραγγίσματος.
2. Εξατμισοδιαπνοή: Έντονη εξατμισοδιαπνοή περιορίζει τον όγκο του υγρού στραγγίσματος. Αντίθετα δεν ευνοεί την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. με αργλικές στεγανωτικές μεμβράνες, λόγω της ρηγμάτωσης της αργίλου από την συρρίκνωση που προκαλείται κατά την ξήρανση.
3. Για λίμνες, ποταμούς, πηγάδια, πηγές, πλημμυριζόμενες εκτάσεις κλπ. θα πρέπει να τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις.

2.7. Διάθεση στραγγίσματος και βιοαερίου

Η διάθεση του στραγγίσματος και βιοαερίου στους αποδέκτες αστικών απορριμμάτων (αλλά και άλλων τύπων στερεών αποβλήτων), αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό τους. Ειδικά τα αστικά απορρίμματα περιέχουν ποικίλα οργανικά υλικά (π.χ. υπολείμματα τροφών, χαρτί, υφάσματα, φυτικές ύλες, ελαστικά και πλαστικά υλικά), τα οποία με την πάροδο του χρόνου αποσυντίθενται.

Συγκεκριμένα, κατά την αποσύνθεση οι οργανικές ύλες των απορριμμάτων διασπώνται από ένζυμα (τα οποία παράγονται από βακτηρίδια), με τρόπο ανάλογο με την χώνευση της τροφής από τον άνθρωπο. Κατά την αποσύνθεση παράγεται διοξείδιο του άνθρακα,

μεθάνιο και άλλα αέρια (υδροθείο, άζωτο κλπ.), ενώ ταυτόχρονα εκλύεται έντονη θερμότητα, λόγω της εξώθερμης φύσης των αντιδράσεων της αποσύνθεσης.

Τα αέρια που παράγονται κατά την αποσύνθεση των απορριμμάτων αποτελούν το λεγόμενο «βιοαέριο». Το παραγόμενο βιοαέριο κινείται προς τα επάνω και φθάνει στην επιφάνεια όπου και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο το βιοαέριο είναι εύφλεκτο (Καββαδάς, 2007).

Σημειώνεται ότι μίγμα μεθανίου με αέρα, σε ποσοστό μεθανίου πάνω από 15%, αποτελεί εκρηκτικό μίγμα. Επιπλέον, το βιοαέριο μπορεί να διαλυθεί στο υγρό στράγγισμα και να επαυξηθεί το ρυπαντικό φορτίο.

Το νερό που παράγεται κατά την αποσύνθεση μαζί με την φυσική υγρασία των απορριμμάτων και τις τυχόν διηθούμενες ποσότητες νερού λόγω των βροχοπτώσεων αποτελούν το υγρό στράγγισμα. Ως γνωστόν, στους πόρους των απορριμμάτων μπορεί να συγκρατηθεί κάποια ποσότητα νερού (μέσω των τριχοειδών δυνάμεων και της συνάφειας) (Καββαδάς, 2007).

Όταν η ποσότητα του νερού υπερβεί την δυνατότητα συγκράτησης των πόρων, αρχίζει η κίνηση του στραγγίσματος προς τα κάτω. Καθώς το στράγγισμα κινείται διαμέσου της μάζας των απορριμμάτων, διαλύει και παρασύρει διάφορες ρυπογόνες ουσίες, οι οποίες αποτελούν το ρυπαντικό φορτίο του στραγγίσματος.

Εάν ο πυθμένας του Χ.Υ.Τ.Α. δεν είναι επαρκώς στεγανός, το στράγγισμα διεισδύει στο υπερκείμενο έδαφος και τελικώς μπορεί να φθάσει στον υποκείμενο υδροφόρο και να τον ρυπάνει (Καββαδάς, 2007).

Ακόμη όμως και στις περιπτώσεις όπου ο πυθμένας του Χ.Υ.Τ.Α έχει επαρκή στεγανότητα, το ύψος της στρώσης του συγκεντρωμένου στραγγίσματος βαθμιαία αυξάνει, με αποτέλεσμα να αυξάνει το υδραυλικό φορτίο στη στεγανωτική στρώση του πυθμένα και συνεπώς η πιθανότητα διαφυγής του στραγγίσματος διαμέσου των ρωγμών, κατασκευαστικών ατελειών.

Για τους ανώτερους λόγους είναι απαραίτητη η αποστράγγιση του στραγγίσματος από τον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. (Καββαδάς, 2007).

Στους σύγχρονους αποδέκτες στερεών αποβλήτων προβλέπεται ειδικό σύστημα συλλογής και απαγωγής του βιοαερίου και του υγρού στραγγίσματος, ώστε να αποκλείεται η ανεξέλεγκτη διαφυγή τους στο περιβάλλον (Καββαδάς, 2007).

2.8. Τυπικές διατάξεις των σύγχρονων Χ.Υ.Τ.Α.

Ένα από τα πρώτα θέματα που θα πρέπει να προσδιορισθεί κατά το σχεδιασμό ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι η θέση του ως προς την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή εάν πρόκειται για υπέργειο, ημι-υπόγειο ή υπόγειο αποδέκτη.

Τα υπέργεια έργα προτιμώνται κυρίως σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και συνεπώς η όποια εκσκαφή μειώνει το πάχος της εδαφικής στρώσης μεταξύ του πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Οι υπέργειες κατασκευές έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι το διήθημα ή στράγγισμα που συγκεντρώνεται στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να

αποστραγγισθεί με βαρύτητα (δηλαδή, χωρίς άντληση). Τέλος, η κατασκευή της στεγανωτικής στρώσης στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. είναι περισσότερο ευχερής, αφού κατασκευάζεται στην επιφάνεια του εδάφους (Καββαδάς, 2007).

Οι ημι-υπόγειες και οι υπόγειες κατασκευές πλεονεκτούν ως προς τη χωρητικότητα, και επιπλέον τα προϊόντα των εκσκαφών μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως υλικά για καθημερινή κάλυψη του Χ.Υ.Τ.Α. Ειδικότερα, οι υπόγειες κατασκευές έχουν το πλεονέκτημα ότι η περιοχή μπορεί να επιπεδωθεί μετά την πλήρωση της και ένα επαναχρησιμοποιηθεί (Καββαδάς, 2007).

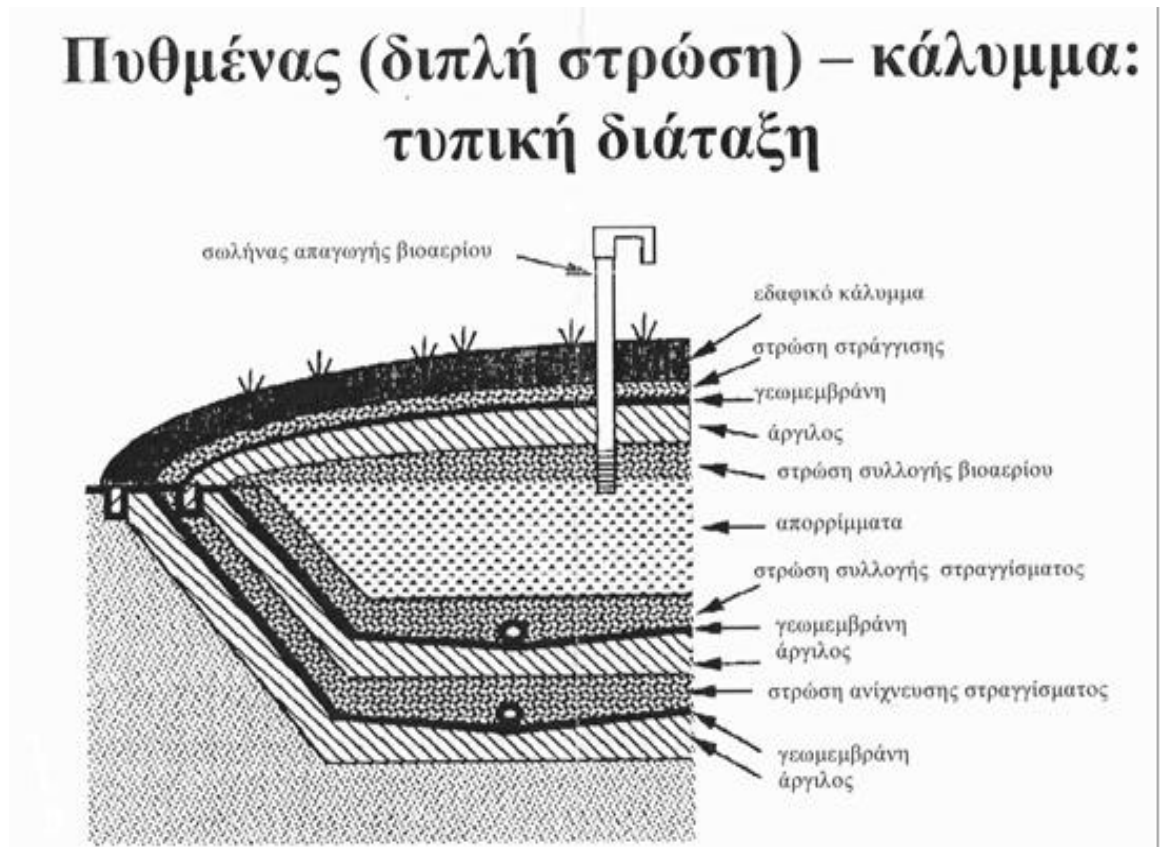
Οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν ειδικά συστήματα για τον έλεγχο και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα συστήματα αυτά έχουν τους εξής σκοπούς (Καββαδάς, 2007):

1. Να ελαχιστοποιήσουν την κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων (βροχόπτωση, χιονόπτωση και επιφανειακές απορροές) εντός του σώματος του Χ.Υ.Τ.Α., ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν ο όγκος του στραγγίσματος.
2. Να συγκεντρώσουν και να απαγάγουν με κατάλληλο τρόπο το υγρό στράγγισμα και το παραγόμενο βιοαέριο.
3. Να ελαχιστοποιήσουν τη διαφυγή του στραγγίσματος προς το υπέδαφος.

Για την πραγματοποίηση των ανώτερων σκοπών οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν (Καββαδάς, 2007):

1. Ειδική στεγανωτική στρώση στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή.

2. Σύστημα συλλογής και απαγωγής του υγρού στραγγίσματος.
3. Σύστημα συλλογής και ελεγχόμενης απαγωγής του βιοαερίου.
4. Ειδικό κάλυμμα στην επιφάνεια του Χ.Υ.Τ.Α., τόσο κατά τις ενδιάμεσες φάσεις πλήρωσης του Χ.Υ.Τ.Α. όσο και μετά την τελική πλήρωση.



Σχήμα 2.1: Τυπική διάταξη ενός Χ.Υ.Τ.Α.(Καββαδάς,2007)

2.8.1. Στεγανωτικές στρώσεις πυθμένα

Το σύστημα μόνωσης ελεγχόμενης εναπόθεσης μη επικίνδυνων αποβλήτων αποτελεί βασικό παράγοντα σωστής λειτουργείας και προϋπόθεση για τις όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Μια στεγανωτική στρώση πρέπει να πληρεί τις εξής προϋποθέσεις (Σκορδύλης, 2002):

- Να κρατά στεγανό το χώρο από τις βροχοπτώσεις και τα επιφανειακά νερά.
- Να αντέχει σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 70 °C.
- Να στεγανοποιεί τα παραγόμενα αέρια και στραγγίσματα.
- Να αντέχει στις τυχόν καθιζήσεις και διαβρώσεις.
- Να αντέχει στην επίδραση των μικροοργανισμών.
- Να τοποθετείτε απλά.
- Να μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη λειτουργία.
- Να μπορεί εύκολα να επιδιορθωθεί και τέλος
- Να μην κοστίζει υπερβολικά.

Όλοι οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν στεγανωτικές στρώσεις στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή που σκοπό έχουν να ελαχιστοποιήσουν τη διαφυγή του υγρού στραγγίσματος προς το υπέδαφος. Οι στρώσεις αυτές μπορεί να είναι (Καββαδάς, 2007):

1. Απλή στρώση συμπυκνωμένης αργίλου.
2. Μεμβράνη από συνθετικό υλικό όπως το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE).
3. Σύνθετη στεγανωτική μεμβράνη που αποτελείται από μια συνθετική μεμβράνη τοποθετημένη σε μια στρώση συμπυκνωμένης αργίλου.

4. Γεω-συνθετική αργιλική στεγανωτική μεμβράνη, που αποτελείται από μια λεπτή αργιλική στρώση (πάχους μερικών χιλιοστών) τοποθετημένη ανάμεσα σε δύο λεπτές συνθετικές μεμβράνες.
5. Διπλή στεγανωτική στρώση με ενδιάμεση αποστραγγιστική στρώση, για τον εντοπισμό και τη συλλογή διαφυγών διαμέσου της ανώτερης στεγανωτικής στρώσης. Το σύστημα αυτό προσφέρει την μέγιστη δυνατή ασφάλεια έναντι διαφυγών και χρησιμοποιείται συνήθως στους αποδέκτες επικίνδυνων ή τοξικών αποβλήτων.

2.8.2. Στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου

Στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου χρησιμοποιούνται συχνά ως η μοναδική επένδυση του πυθμένα αποδεκτών μη επικίνδυνων αποβλήτων, αν και οι νεώτεροι κανονισμοί απαιτούν και τη χρήση συνθετικής μεμβράνης στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή.

Στις περιπτώσεις αποδεκτών επικίνδυνων στερεών αποβλήτων οι συμπυκνωμένες αργιλικές στρώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με κάποια άλλη στεγανωτική επένδυση (π.χ. συνθετικές μεμβράνες) (Καββαδάς, 2007).

Τα αργιλικά υλικά, δηλαδή, τα γαιώδη υλικά που περιέχουν σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος διερχόμενο από το κόσκινο Νο. 200 ($d < 0,075 \text{ mm}$), όταν συμπυκνωθούν με κατάλληλη υγρασία αποκτούν μικρή διαπερατότητα και μπορούν να λειτουργήσουν ως στεγανωτική μεμβράνη.

Κατά τη χρήση των συμπυκνωμένων αργιλικών υλικών ως στεγανωτικών μεμβρανών, στον πυθμένα και τις παρειές των σύγχρονων αποδεκτών μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων, θα πρέπει ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (διαπερατότητας) της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης να είναι μικρότερος από 10^{-9} m/s.(Σκορδίλης, 2002).

Ενδεικτικές απαιτήσεις για την επίτευξη του περιορισμού αυτού είναι (Καββαδάς, 2007):

- α) ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος ($d < 0,075$ mm): κατ' ελάχιστον 20 – 30%,
- β) δείκτης πλαστικότητας: κατ' ελάχιστον 7 – 10%,
- γ) ποσοστό χαλικιών ($d > 4,75$ mm): μικρότερο από 30%, και
- δ) μέγιστη διάσταση κόκκου: 25 – 50 mm.

Οι ανωτέρω είναι ενδεικτικές τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων και συνεπώς ο επιτυγχανόμενος συντελεστής διαπερατότητας θα πρέπει πάντα να ελέγχεται με επαρκή αριθμό δοκιμών μέτρησης της διαπερατότητας. Ανεξάρτητα όμως από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, κατά την επιλογή των υλικών κατασκευής της αργιλικής στεγανωτικής στρώσης θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και σε κατασκευαστικά θέματα που συνδέονται κυρίως με τη διαφορά κλίμακας μεταξύ των εργαστηριακών δοκιμών και της επί τόπου συμπεριφοράς της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης (Καββαδάς, 2007).

Έτσι, για παράδειγμα, η παρουσία υψηλού ποσοστού χαλικιών (50 – 60%) μπορεί να μην αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από το αποδεκτό όριο κατά τις εργαστηριακές δοκιμές, όπου η ανάμειξη των υλικών είναι ικανοποιητική. Κατά τις επί τόπου υγρασίες συμπύκνωσης, όμως, είναι

πολύ πιθανόν να προκληθεί απόμιξη των υλικών και να δημιουργηθούν θύλακες με αυξημένο ποσοστό χαλικιών (άνω του 60%), όπου η διαπερατότητα θα είναι ασφαλώς αυξημένη και θα προκληθούν διαρροές.

Μερικές προϋποθέσεις, ως προς την σύνθεση της αργιλικής μόνωσης είναι οι εξής (Σκορδίλης, 2002):

- α) Το ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό (2 μm) να είναι τουλάχιστον 20%.
- β) Ο οργανικός άνθρακας, στο σύνολο του, να μην υπερβαίνει το 5% κατά βάρος και η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο το 20% κατά βάρος
- γ) Όρια Atteberg:
 - Η υδαρότητα της αργίλου να μην ξεπερνά το 40% κατά βάρος.
 - Ο δείκτης πλαστικότητας (PI) να κυμαίνεται μεταξύ 10 – 25%.
- δ) Το μέγεθος των κόκκων της μόνωσης δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 32 mm.
- ε) Να είναι απαλλαγμένη από ξένες προσμίξεις.

Οι δείκτες του μονωτικού υλικού που μπορούν να επηρεάσουν την λειτουργία της μόνωσης είναι (Σκορδίλης, 2002):

- Η υδροπερατότητα.
- Η χωροταξική κατανομή των σωματιδίων.
- Το φιλτράρισμα.
- Η δυνατότητα καθίζησης των βαρέων μετάλλων.
- Η προσροφητικότητα και απορροφητικότητα των επικίνδυνων ουσιών.
- Η καταλυτική αντίδραση των οργανικών στο υλικό.

Γι' αυτό και η άργιλος που χρησιμοποιείται, εκτός της χαμηλής υδροπερατότητας, θα πρέπει να παραμένει και αδρανής σε χημικά που βρίσκονται στα στραγγίσματα και να επιδεικνύει μεγάλη δυνατότητα ρόφησης των επιβλαβών ουσιών (Σκορδίλης, 2002).

Οι αντιδράσεις της αργιλικής μόνωσης με χημικές ενώσεις δεν επηρεάζουν σχεδόν καθόλου την περατότητα της μόνωσης, αλλά την αντοχή της (Σκορδίλης, 2002).

Οι σπουδαιότεροι παράμετροι στην κατασκευή της αργιλικής μόνωσης είναι οι παράγοντες συμπίεσης: περιεκτικότητα σε νερό, ο τρόπος συμπίεσης, το μέγεθος των κόκκων και η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων (τοποθέτηση ενός στρώματος πάνω στο άλλο)(Σκορδίλης, 2002).

Η τοποθέτηση της αργιλικής μόνωσης γίνεται σε τέσσερις τουλάχιστον στρώσεις πάχους 25 cm η καθεμία. Η διάστρωση του υλικού πραγματοποιείται όταν οι καιρικές συνθήκες είναι κατάλληλες και σε καμία περίπτωση με βροχόπτωση.

Μετά την ομοιόμορφη στρώση της αργιλικής μόνωσης, ακολουθεί η συμπίεση. Το υλικό πρέπει να είναι ομοιογενές και να έχει την φυσική του υγρασία. Όταν η άργιλος δεν έχει την κατάλληλη υγρασία σχηματίζει σβώλους με αποτέλεσμα κατά την συμπίεση ένα μέρος από αυτούς να μην σπάσει και να δημιουργηθούν κενά στο στρώμα της μόνωσης. Η κλίση των πρανών δεν πρέπει να ξεπερνά το 1:3. Σε απότομα πρανή η τοποθέτηση της ορυκτής μόνωσης δεν γίνεται σε οριζόντιες στρώσεις (Καββαδάς, 2007).

Η μόνωση ελέγχεται μετά την τοποθέτηση της ως προς την πυκνότητα, την υγρασία την κοκκομετρία και την περατότητα.

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας των αργιλικών υλικών επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία συμπίκνωσης και την εφαρμοζόμενη ενέργεια. Η υδραυλική αγωγιμότητα προφανώς μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας συμπίκνωσης (Καββαδάς, 2007).

Επιπλέον, η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά (κατά 10 – 100 φορές) με την αύξηση της υγρασίας συμπίκνωσης κατά 2 – 3% πάνω από την βέλτιστη τιμή.

Κατά συνέπεια, στην περίπτωση χρήσης συμπίκνωμένων αργίλων ως στεγανωτικών μεμβρανών, συνιστάται η υγρασία της συμπίκνωσης να είναι ελαφρά μεγαλύτερη (κατά 2% περίπου) από την βέλτιστη (Καββαδάς, 2007).

Επίσης τα αργιλικά υλικά όταν ξηρανθούν συρρικνώνονται και ρηγματώνονται. Η τάση για συρρίκνωση έχει να κάνει γενικώς με την αύξηση του δείκτη πλαστικότητας της αργίλου.

Οι αργιλικές στεγανωτικές μεμβράνες στον πυθμένα Χ.Υ.Τ.Α., γενικά εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία πριν από την αρχική κάλυψη τους, με συνέπεια να ξηραίνονται και να υπάρχει κίνδυνος να ρηγματωθούν.

Για τους λόγους αυτούς (Καββαδάς, 2007):

- I. Δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αργιλικά υλικά υψηλής πλαστικότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο δείκτης πλαστικότητας θα πρέπει να είναι μικρότερος του 30 – 35%, ιδίως στις περιπτώσεις όπου προβλέπεται αξιόλογη ξήρανση του υλικού.
- II. Η συμπίκνωση των επάλληλων στρώσεων της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης θα πρέπει να γίνεται ταχέως, ώστε να

αποφεύγεται παρατεταμένη έκθεση της επιφάνειας της αργίλου στην ηλιακή ακτινοβολία, ξήρανσή της και συνεπώς ρηγμάτωση της.

- III. Η τελική επιφάνεια της συμπυκνωμένης αργιλικής μεμβράνης θα πρέπει να καλύπτεται ταχέως με την διαπερατή (αμμώδη) στρώση συλλογής του υγρού στραγγίσματος, ώστε να αποφεύγεται η ξήρανση και η ως εκ τούτο ρηγμάτωσή της. Επιπλέον, η πλήρωση του αποδέκτη στερεών αποβλήτων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα να καλύπτεται ταχέως από την πρώτη στρώση αποβλήτων, η οποία θα προστατεύσει τη μεμβράνη και από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.
- IV. Σε περιοχές έντονου ψύχους, η αργιλική στρώση θα πρέπει να προστατεύεται και από τον παγετό. Για τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες, η κάλυψη της αργιλικής μεμβράνης με την αμμώδη στρώση συλλογής του υγρού στραγγίσματος είναι συνήθως επαρκής για την αποφυγή βλαβών της αργιλικής στρώσης λόγω παγετού.
- V. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά τη συμπύκνωση της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στις παρειές του αποδέκτη στερεών αποβλήτων. Η συμπύκνωση σε οριζόντιες στρώσεις δεν συνιστάται, επειδή γενικά η διαπερατότητα κατά μήκος των διεπιφανειών μεταξύ των επάλληλων στρώσεων είναι αυξημένη, με συνέπεια πιθανές διαφυγές του στραγγίσματος. Αν τελικώς επιλεγεί η συμπύκνωση σε οριζόντιες στρώσεις, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε η διεπιφάνεια μεταξύ των επάλληλων στρώσεων να έχει κλίση προς το εσωτερικό του αποδεκτή. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι διαφυγές του υγρού στραγγίσματος εκτός του αποδεκτού, υπό την προϋπόθεση βεβαίως ότι το στραγγίσμα

απομακρύνεται από τον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. και δεν δημιουργεί στάθμη ύδατος.

VI. Οι χημικές ουσίες που περιέχονται στο υγρό στράγγισμα μπορούν να προσβάλουν την συμπυκνωμένη αργιλική στρώση και να μεταβάλλουν τις ιδιότητές της (π.χ. να αυξήσουν τη διαπερατότητα ή να τη διαβρώσουν πλήρως). Συγκεκριμένα:

α) Ισχυρά οξέα και βάσεις μπορούν να διαλύσουν τα αργιλικά ορυκτά και να διαβρώσουν την αργιλική μεμβράνη. Ορισμένα οξέα, όπως το υδροφθορικό και το φωσφορικό, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα από την άποψη αυτή.

β) Ποικίλες ανόργανες και οργανικές ουσίες του υγρού στραγγίσματος μπορούν να μεταβάλλουν το πάχος της διπλής στρώσης των αργιλικών ορυκτών, να τροποποιήσουν τη δομή τους και να μεταβάλλουν την υδραυλική τους αγωγιμότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι διάφοροι ρύποι προκαλούν, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα, μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, γεγονός ευνοϊκό για την λειτουργία της στεγανωτικής μεμβράνης. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις προκαλείται θρόμβωση της δομής των αργιλικών ορυκτών, με συνέπεια την ρηγμάτωση της αργίλου και την αύξηση της διαπερατότητας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «συναίρεση» και οι αναπτυσσόμενες ρωγμές «συναιρετικές ρωγμές». Για τους παραπάνω λόγους, θα πρέπει να εκτελούνται ειδικές δοκιμές συμβατότητας για τον έλεγχο επιρροής του αναμενόμενου στραγγίσματος των απορριμμάτων στα συγκεκριμένα αργιλικά υλικά που προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή

της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης. Η χρήση απλής αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα ενός αποδέκτη στερεών αποβλήτων, είναι πιθανόν να παρουσιάσει αξιόλογες διαρροές στραγγίσματος προς το περιβάλλον για κάποιον από τους λόγους που αναφέρθηκαν. Έτσι, στους περισσότερους αποδέκτες στερεών αποβλήτων χρησιμοποιούνται σύνθετες στεγανωτικές στρώσεις που περιλαμβάνουν και άλλες στρώσεις εκτός από την αργιλική μεμβράνη.

2.8.3. Σύστημα συλλογής του στραγγίσματος

Η συλλογή και απομάκρυνση του υγρού στραγγίσματος των απορριμμάτων που συγκεντρώνεται στον πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων είναι τελείως απαραίτητη για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος στεγανώσεως. Το υγρό στράγγισμα που συγκεντρώνεται στον πυθμένα των Χ.Υ.Τ.Α. οφείλεται (Καββαδάς, 2007):

- Στην κατείδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωση, χιόνι) και στην εισροή επιφανειακών υδάτων, λόγω πλημμελούς κάλυψης και περιμετρικής αποστράγγισης του χώρου.
- Στην φυσική υγρασία των απορριμμάτων.
- Στο νερό που παράγεται κατά τις χημικές αντιδράσεις αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών. Το υγρό στράγγισμα έχει αξιόλογο ρυπαντικό φορτίο και συνεπώς η τυχόν διαφυγή του στο υπέδαφος μπορεί να προκαλέσει σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος.

Ακόμη και στην περίπτωση ύπαρξης στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α., το υγρό στράγγισμα που συγκεντρώνεται (αν δεν

απομακρυνθεί με κατάλληλο σύστημα αποστράγγισης) δημιουργεί στάθμη, αυξάνει το υδραυλικό φορτίο στην υποκείμενη στεγανωτική μεμβράνη και ως εκ τούτου πολλαπλασιάζεται η παροχή διηθήσεως διαμέσου των ατελειών της, αλλά και του υποκείμενου εδαφικού υλικού.

Για το λόγο αυτό (Καββαδάς, 2007):

- Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή συστήματος περιμετρικής αποστράγγισης του Χ.Υ.Τ.Α., ώστε να αποφεύγεται η εισροή επιφανειακών υδάτων στο χώρο του Χ.Υ.Τ.Α.
- Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων με εδαφικό υλικό, του οποίου η επιφάνεια θα πρέπει να επιπεδώνεται, να διαμορφώνεται με κατάλληλες κλίσεις και να προβλέπεται σύστημα συγκέντρωσης και απαγωγής των όμβριων υδάτων (μέσω τάφρων, φρεατίων κλπ.).
- Πάνω από την στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. θα πρέπει να κατασκευάζεται ειδικό σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης του στραγγίσματος. Στην περίπτωση πρόβλεψης διπλής στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. (όπως π.χ. απαιτείται στους αποδέκτες επικίνδυνων αποβλήτων), θα πρέπει να κατασκευάζονται και τα δύο συστήματα συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος:
 1. Το κύριο σύστημα συλλογής του στραγγίσματος που κατασκευάζεται στην επιφάνεια της ανώτερης στεγανωτικής μεμβράνης συνήθως αποτελείται από μια στρώση ελεύθερα στραγγιζόμενου εδαφικού υλικού (π.χ. χάλικες) πάχους 30 – 40 cm, η οποία προστατεύεται ως εξής: α) Στην ανώτερη επιφάνεια της φέρει

στρώση φίλτρου από άμμο (πάχους 15 – 20 cm) ή διαπερατό συνθετικό γεωύφασμα με σκοπό την προστασία της υποκείμενης στρώσης στράγγισης από ογκώδη / αιχμηρά απορρίμματα, αλλά και την κατακράτηση των στερεών κόκκων που τυχόν αιωρούνται εντός του στραγγίσματος, ώστε να μην αποφραχθεί η υποκείμενη στρώση στράγγισης. β) Στην κατώτερη επιφάνεια της φέρει ειδικό συνθετικό γεωύφασμα για την προστασία της υποκείμενης στεγανωτικής μεμβράνης από τη διάτρηση (λόγω των χαλικών της στρώσης στράγγισης). Κατά θέσεις εντός της στρώσης στράγγισης τοποθετούνται διάτρητοι σωλήνες για την συλλογή και ταχεία αποστράγγιση του στραγγίσματος. Οι σωλήνες αυτοί οδηγούνται σε φρεάτια απ' όπου το στράγγισμα απάγεται, είτε με φυσική ροή, είτε (συνηθέστερα) με άντληση.

2. Το δευτερεύον σύστημα συλλογής του στραγγίσματος αποτελείται από μια αποστραγγιστική στρώση (άμμο πάχους 20 – 30 cm, διαπερατό συνθετικό γεωύφασμα κλπ.) που τοποθετείται μεταξύ των δύο στεγανωτικών μεμβρανών. Όπως στο πρωτεύον σύστημα, έτσι και στο δευτερεύον προβλέπεται σύστημα συλλογής του τυχόν διαφεύγοντος στραγγίσματος μέσω σωλήνων, φρεατίων άντλησης κλπ. Το δευτερεύον σύστημα συλλογής του στραγγίσματος έχει τους εξής σκοπούς: α) να εντοπίσει τη θέση και το μέγεθος των τυχόν διαρροών στραγγίσματος διαμέσου της ανώτερης (κύριας) στεγανωτικής στρώσης, β) να συλλέξει τις ανωτέρω διαφυγές, και γ) να λειτουργήσει ως κύρια αποστραγγιστική στρώση, στην περίπτωση που η ανώτερη αποστραγγιστική στρώση καταστραφεί (π.χ. λόγω απόφραξης από στερεά υλικά του στραγγίσματος, ανάπτυξη μυκήτων κλπ.).

Οι ελάχιστες απαιτήσεις του συστήματος συλλογής και αποστράγγισης του υγρού στραγγίσματος προβλέπεται από τους κανονισμούς των διάφορων χωρών.

Ένα από τα κυριότερα θέματα των συστημάτων συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος είναι η αποφυγή της έμφραξης τους κατά τη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α., αλλά και για 30 – 40 χρόνια μετά την κάλυψη του αποδέκτη (δηλαδή, μέχρις ότου εξασθενίσει επαρκώς το ρυπαντικό φορτίο του στραγγίσματος).

Η έμφραξη του συστήματος αποστράγγισης μπορεί να συμβεί για τους εξής λόγους (Καββαδάς, 2007):

- Συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών ουσιών του στραγγίσματος στους πόρους της στρώσης αποστράγγισης.
- Ανάπτυξη μικροοργανισμών (κυρίως μυκήτων) στο εσωτερικό της στρώσης αποστράγγισης, με συνέπεια τη μείωση του ενεργού πορώδους.
- Προσρόφιση ρύπων στην επιφάνεια των κόκκων της στρώσης αποστράγγισης. Για την αποφυγή της έμφραξης, θα πρέπει τα υλικά της στρώσης στράγγισης να είναι χονδρόκοκκα (π.χ. χάλικες), η διαπερατότητα τους να είναι υψηλή (π.χ. $> 0,01 \text{ cm/sec}$ ή και ακόμη υψηλότερη), η στρώση να έχει επαρκές πάχος (άνω των 30 cm), να διαθέτει διάτρητους σωλήνες στράγγισης, και τέλος να υπάρχει σύστημα φίλτρου στην ανώτερη επιφάνεια της στρώσης στράγγισης.

2.8.4. Σύστημα τελικής κάλυψης

Το σύστημα τελικής κάλυψης ενός αποδέκτη στερεών αποβλήτων έχει ως σκοπό τον περιορισμό της κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωσης, χιονιού) μετά την πλήρωση του αποδέκτη, ώστε να περιορισθεί ο παραγόμενος όγκος του υγρού στραγγίσματος, αλλά και την διαμόρφωση της επιφάνειας του αποδέκτη, έτσι ώστε να μπορεί να επανενταχθεί στο περιβάλλον.

Το σύστημα τελικής κάλυψης αποτελείται από επάλληλες στρώσεις, κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο σκοπό. Μια τυπική διάταξη έργου τελικής κάλυψης αποτελείται από τις εξής στρώσεις (από κάτω προς τα πάνω) (Καββαδάς, 2007):

1. Μια στρώση επιπέδωσης πάχους 15 – 60 cm. Η στρώση αυτή έχει σκοπό την επιπέδωση της επιφάνειας των απορριμμάτων, ώστε να καταστεί ευχερής η κατασκευή των επόμενων στρώσεων. Η στρώση επιπέδωσης συνήθως αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά (π.χ. αμμοχάλικα). Σε περίπτωση που τα υποκείμενα υλικά (απορρίμματα) είναι ιδιαίτερα ασταθή και συμπιεστά, συχνά η στρώση επιπέδωσης ενισχύεται με ένα συνθετικό γεωπλέγμα αξιόλογης εφελκυστικής αντοχής.
2. Μια σφραγιστική στρώση η οποία αποτελεί την κύρια στεγανωτική στρώση για τον περιορισμό της κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων. Η στρώση αυτή αποτελείται, είτε από συμπυκνωμένη άργιλο (πάχους 0,50 m περίπου), είτε από συνθετική γεωμεμβράνη πάχους 1 – 2 mm.
3. Μια προστατευτική στρώση που έχει σκοπό να προστατεύει την υποκείμενη σφραγιστική στρώση από της εναλλαγές θερμοκρασίας (παγετός και έντονη θερμότητα) που θα μπορούσαν να προκαλέσουν

την ξήρανση της αργιλικής σφραγιστικής στρώσης και τη ρηγμάτωσή της. Τέλος, η στρώση αυτή έχει σκοπό να επιτρέψει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών. Η προστατευτική στρώση έχει πάχος 30 – 100 cm, αναλόγως της περιοχής και του είδους της υπερκείμενης σφραγιστικής στρώσης.

4. Μια επιφανειακή γαιώδης στρώση (φυτικές γαίες) πάχους 10 – 20 cm, για την αρχική ανάπτυξη των φυτών.

2.8.5. Σύστημα απαγωγής του βιοαερίου

Κατά την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών παράγονται σημαντικές ποσότητες αερίων (βιοαέριο). Συγκεκριμένα κατά την αερόβια αποσύνθεση των οργανικών ουσιών παράγεται κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ενώ κατά την αναερόβια αποσύνθεση παράγεται κυρίως μεθάνιο (CH_4) αλλά και διοξείδιο του άνθρακα (Καββαδάς, 2007).

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι βαρύτερο από τον αέρα και συνεπώς κινείται κυρίως προς τον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α., όπου τελικώς διαλύεται εντός του υγρού στραγγίσματος. Αντίθετα, το μεθάνιο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και ως εκ τούτου ανέρχεται προς την επιφάνεια των απορριμμάτων, εγκλωβίζεται κάτω από την στρώση κάλυψης και τελικώς, αν δεν υπάρχει κατάλληλο σύστημα ελεγχόμενης απομάκρυνσης του, διαφεύγει στον αέρα μέσω των ρωγμών της σφραγιστικής στρώσης.

Για την αποφυγή των ανωτέρω ανεξέλεγκτων διαφυγών του μεθανίου, οι αποδέκτες αστικών απορριμμάτων θα πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με σύστημα συλλογής και ελεγχόμενης απαγωγής (κυρίως μέσω απλής καύσης ή παραγωγής ενέργειας) του βιοαερίου (Καββαδάς, 2007).

2.9. Απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές στην Ελλάδα

Τελικά, στην Ελλάδα, για την κατασκευή στεγανοποιητικής στρώσης από αργιλικά υλικά φυσικών ή τεχνητών κοιλωμάτων που προβλέπονται να διαμορφωθούν ως Χ.Υ.Τ.Α., θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές του Πίνακα 2.1 (εάν δεν καθορίζεται διαφορετικά στην μελέτη κατασκευής). Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν κατασκευή στεγανοποιητικής στρώσης Χ.Υ.Τ.Α για μη επικίνδυνα απόβλητα.

Πίνακας 2.1: Απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές στεγανοποιητικής στρώσης σε Χ.Υ.Τ.Α. στην Ελλάδα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Παράμετροι / Ιδιότητες	Αποδεκτή τιμή
Υδραυλική Αγωγιμότητα (K)	$< 10^{-9}$ m/sec
Όριο Υδαρότητας (LL)	$< 40\%$
Όριο Πλαστικότητας (PL)	5 – 15%
Περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα ($d < 2 \mu\text{m}$)	$> 15\%$, κατά μάζα
Μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων	32 mm
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα	$< 60\%$, επί του ολικού όγκου
Ποσοστό οργανικών	$< 10\%$
Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου	$< 40\%$

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το γεωυλικό μας για να είναι κατάλληλο για χρήση ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/κάλυμμα θα πρέπει (Καββαδάς, Σκορδίλης, Antonio José Roque, Gérard Didier):

- Η υδραυλική αγωγιμότητα θα πρέπει να είναι μικρότερη από 10^{-9} m/sec.
- Το όριο υδαρότητας (LL) να είναι μικρότερο από 40%.

- Το όριο πλαστικότητας (PL) να είναι από 5-15%.
- Η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα ($d < 2 \mu\text{m}$) να είναι μεγαλύτερη από 15% κατά μάζα.
- Η μέγιστη διάσταση των χονδροκόκκων δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 32 mm.
- Η περιεκτικότητα σε χονδροκόκκα να είναι μικρότερη από 60% κατά μάζα.
- Το ποσοστό των οργανικών να είναι μικρότερο από 10%
- Και τέλος το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου να είναι μικρότερο από 40%.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η θέση δειγματοληψίας βρίσκεται σε θέση 1,5 km περίπου νότια-νοτιοδυτικά του οικισμού «Επάνω Αρχάνες» και 0,5 km περίπου δυτικά-βορειοδυτικά του οικισμού «Βαθύπετρο» (βλέπε Σχήμα 1.1), στο νομό Ηρακλείου Κρήτης.

3.1. Γεωμορφολογία περιοχής

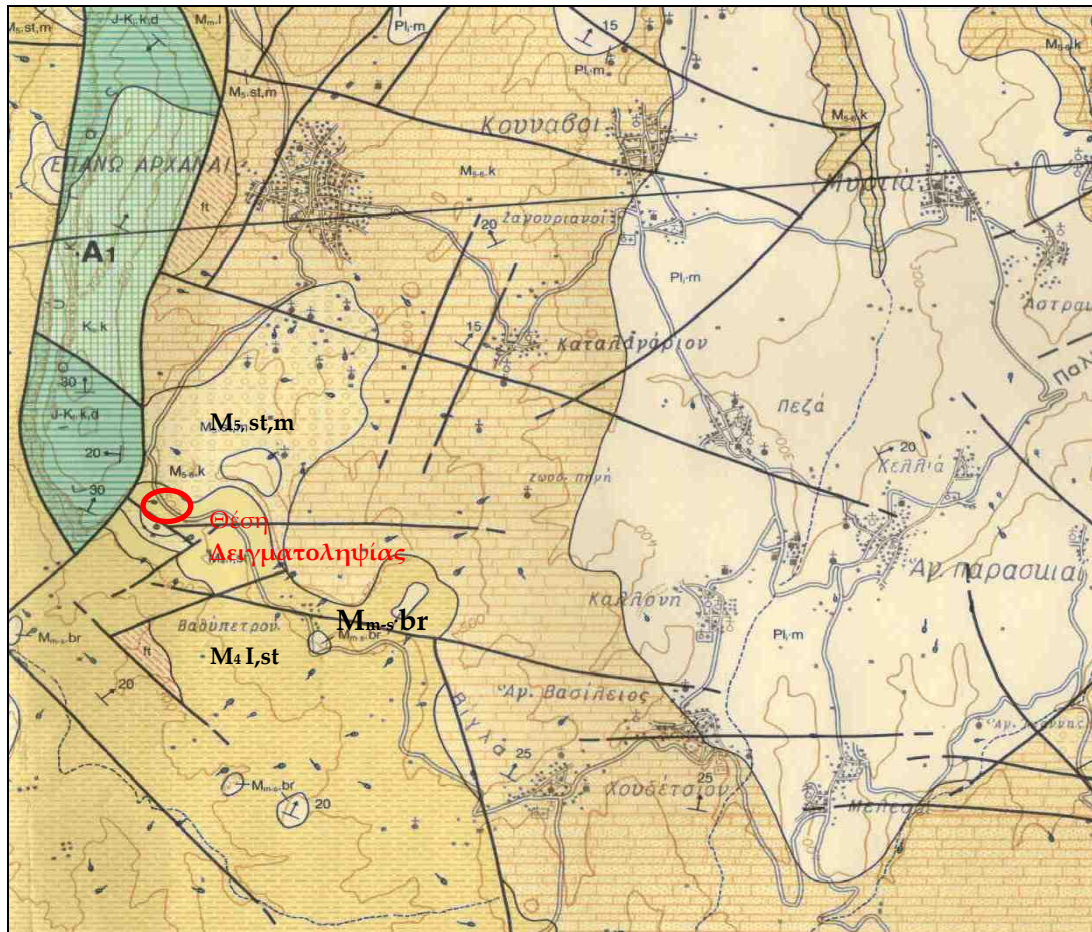
Στην περιοχή είναι το ανάγλυφο σχετικά έντονο, η περιοχή είναι ημιορεινή και οι ισουψείς κυμαίνονται από 200-600 m. Στην θέση από την οποία πήραμε τα δείγματα, το υψόμετρο είναι +255 m.

3.2. Γεωλογία περιοχής

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής αποτελείται από:

- Τεταρτογενή ιζήματα που καλύπτουν όλους τους σχηματισμούς τόσο του αλπικού υποβάθρου όσο και των Νεογενών αποθέσεων και αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αλλουβιακές αποθέσεις, άμμων, κροκάλων, αργίλων και χαλικών, ασύνδετων έως ελαφρά συγκολλημένων. Αναπτύσσονται στις πεδινές εκτάσεις του νησιού.
- Νεογενή και Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα. Αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, λιμναίας, ποτάμιας και θαλάσσιας φάσης.

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής δειγματοληψίας φαίνεται στον χάρτη στο **Σχήμα 3.2**. Στον ίδιο χάρτη σημειώνεται και η θέση από την οποία λήφθηκε δείγμα αργιλομάργας προς εξέταση.



Σχήμα 3.2: Γεωλογία περιοχής ενδιαφέροντος. Απόσπασμα από γεωλογικό χάρτη, κλίμακας 1:50.000 (Βιδάκης – Meulenkamp, 1983).

Σύμφωνα λοιπόν με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο «Επάνω Αρχάναις» (Βιδάκης – Meulenkamp, 1983), απατώνται επιφανειακά οι εξής σχηματισμοί:

➤ **Σχηματισμός Φοινικιάς (Pl.m):**

Ηλικία: Τεταρτογενές, κατώτερο Πλειόκαινο.

Λευκές και ανοικτόφαιες μάργες , ομοιογενείς συχνά ψαμμιτικές με παρεμβολές φυλλωδών μαργών εξελίσσονται προς τα πάνω σε τεφρές ψαμμιτικές μάργες, καστανές άμμους και κατά θέσεις ασβεστιτικούς ψαμμίτες, κατά μήκος των περιθωρίων της λεκάνης Μεσσαρά. Η βάση του σχηματισμού τοπικά συνιστάται από ένα αδιαβάθμητο «μαργαϊκό λατυποπαγές», με συστατικά λευκών ομοιογενών μαργών, ασβεστολίθων και μαργών του «σχηματισμού Αγίας Βαρβάρας», πρασινοπών αργίλων και προνεογενών πετρωμάτων.

➤ **Σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας (M₅₋₆.k,m,g):**

Ηλικία: Νεογενές, ανώτερο Μειόκαινο , ανώτερο Τορτόνιο – Μεσσήνιο.

Βιοκλαστικοί, κατά θέσεις κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι και ολισθημένοι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (M₅₋₆.k), εναλλαγές φυλλωδών και ομοιογενών συχνά ασβεστιτικών μαργών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων (M₅₋₆.m) και γύψοι (M₅₋₆.g), παρεμβαλλόμενοι στη σειρά των φυλλωδών – ομοιογενών μαργών. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού, κοντά στην Άνω Ακρία, απαντούν ασβεστιτικοί ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, ενώ εντός του σχηματισμού παρεμβάλλονται βιοκλαστικοί και υφαλογενείς ασβεστόλιθοι πλούσιοι σε Clypeaster, Pecten, Heterostegina, Bryozoa και κατά θέσεις κοράλλια. Στις φυλλώδεις μάργες αφθονούν τα υπολλείμματα ψαριών και τα φυτικά λείψανα.

➤ **Σχηματισμός Αμπελούζου (M₅.st,m):**

Ηλικία: Νεογενές, ανώτερο Μειόκαινο, Τορτόνιο.

Ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθους, τεφροκύανες μάργες, ιλυώδεις

άργιλους και λιγνίτες. Στα κατώτερα ή μεσαία μέλη του σχηματισμού εμφανίζονται θραύσματα ύφαλων με Κοράλλια, Φύκη και υδρόζωα.

➤ **Σχηματισμός Ηλία (M_{m-s.br}):**

Ηλικία: Νεογενές, ανώτερο – μέσο Μειόκαινο.

Λατυποπαγή και λατυπο-κροκαλοπαγή, αποτελούμενα κυρίως από λατύπες και κροκάλες προερχόμενες από σκούρους προνεογενείς ασβεστόλιθους με ασβεστιτική συγκολλητική ύλη. Σε μερικές θέσεις παρατηρείται σαφής στρώση που είναι αποτέλεσμα εναλλαγών, είτε αδρομερών και λεπτομερών οριζόντων, είτε ασβεστολιθικών και ψαμμιτικών στρωμάτων. Τα λατυποπαγή συχνά συνοδεύονται από σκούρα σώματα προνεογενών ασβεστολίθων που είτε αποτελούν τμήμα του προνεογενούς υποβάθρου (κατά θέσεις), είτε απαντούν σαν αλλόχθονα στοιχεία μέσα στην νεογενή σειρά.

➤ **Σχηματισμός Βιάννου (M_{m.l}):**

Ηλικία: Νεογενές, μέσο Μειόκαινο.

Ποταμολιμναίες, σκούρες τεφρές έως πρασινωπές άργιλοι, γενικά καλά στρωμένες ιλυώδεις άργιλοι με λιγνίτη, κατά θέσεις, ή και ενστρώσεις ασβεστόλιθων και καστανόχρωμοι ψαμμίτες καλά διαβαθμισμένοι. Παρεμβολές πολύμικτων κροκαλοπαγών, κυρίως στο κάτω τμήμα του σχηματισμού.

➤ **Τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Πίνδου – Εθίας: Ασβεστόλιθοι (K_{s.k}):**

Ηλικία: Σενώνιο.

Τέφροι, λεπτοστρωματώδεις, μικριτικοί, πτυχωμένοι και τεκτονισμένοι ασβεστόλιθοι.

➤ Τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Τριπόλεως: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (J-Ks.k,d):

Ηλικία: Ιουρασικό – κατώτερο Κρητιδικό.

Ανοικτότεφροι μέχρι τεφρόμαυροι, μεσο-στρωματώδεις μέχρι άστρωτοι, καρστικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Η δολομιτίωση ελαττώνεται από τη βάση προς την κορυφή. Μέγιστο πάχος: 200 m.

Η δειγματοληψία μας ανήκει στον σχηματισμό **Αμπελούζου**.

4. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι ορυκτολογικές δοκιμές που έγιναν στο σχηματισμό αφορούν προσδιορισμό: α) της ορυκτολογικής σύστασης, β) της συγκέντρωσης ανθρακικού ασβεστίου, γ) της συγκέντρωσης οργανικού άνθρακα, και δ) της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων.

4.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των σχηματισμών πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ (XRD, X-RAY Diffraction Analysis) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (βλέπε **Φωτογραφία 4.1**).

Το περιθλασίμετρο αυτό είναι τύπου D8-advance, της εταιρείας Brucker AXS.

4.1.1. Πειραματική διαδικασία

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-Χ πάνω στους κρυστάλλους του ορυκτού.

Ο Bragg ερμήνευσε, την περίθλαση των ακτίνων-Χ στους κρυστάλλους σαν ανάκλαση τάξης n των ακτινών-Χ, μήκους κύματος λ , οι οποίες προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία (θ) στα πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου (Κωστάκης, 1999).



Φωτογραφία 4.1: Το περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ (XRD) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας.

Έστω ότι το πλέγμα ενός κρυστάλλου αποτελείται από ομάδες πλεγματικών επιπέδων, τα οποία σε κάθε ομάδα είναι παράλληλα και διαδέχεται το ένα το άλλο, πάντα στην ίδια απόσταση, d . Τότε σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg ισχύει:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad [4.1]$$

Με το περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ, καθίστανται δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-Χ που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως (Κωστάκης, 1999).

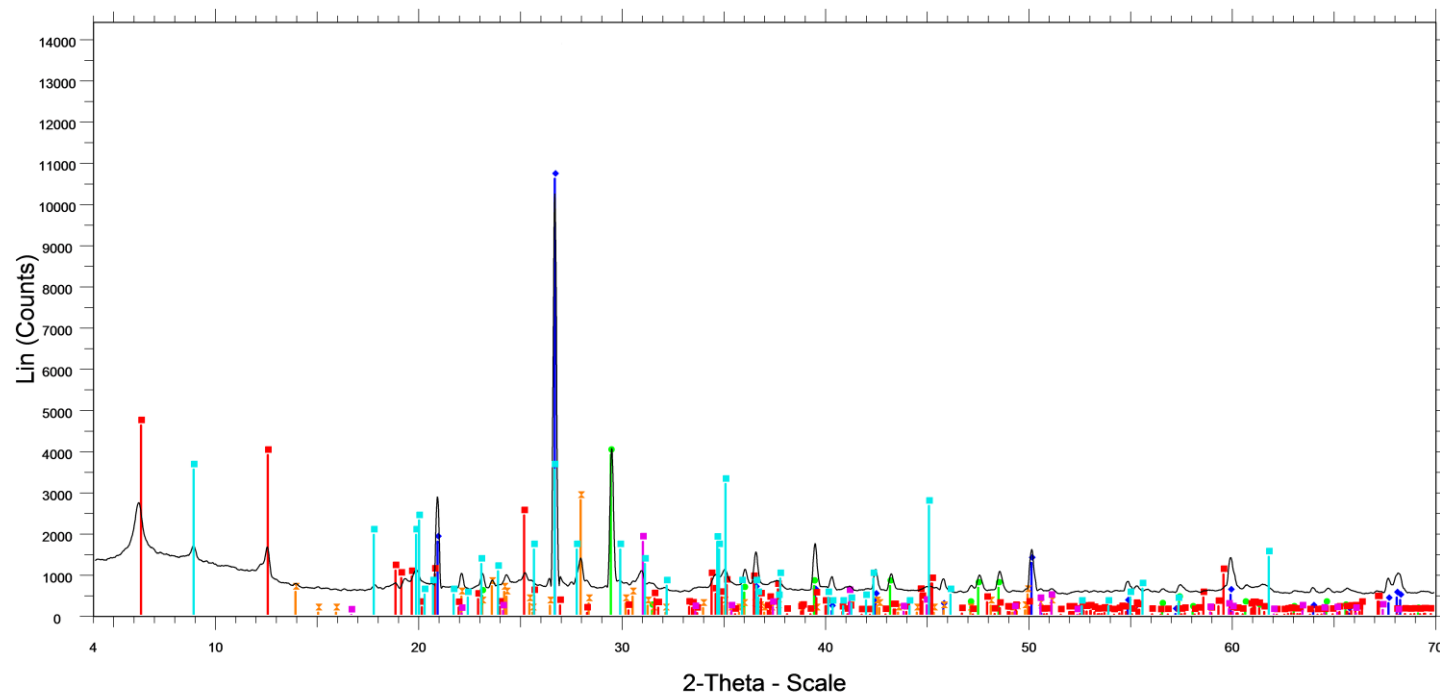
4.1.2. Αποτελέσματα

Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων που έγιναν σε τέσσερα (4) δείγματα.

Πίνακας 4.1: Ημιποσοτική ανάλυση των δειγμάτων.

Ορυκτολογική φάση	Ποσοστό (%) κατά βάρος				
	Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3	Δείγμα 4	M.O.
Χαλαζίας (SiO ₂)	30,0	28,0	28,0	30,0	29,0
Κλινόχλωρο ([Mg,Fe] ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈)	23,0	20,0	22,0	25,0	22,5
Ασβεστίτης (CaCO ₃)	20,0	18,0	19,0	20,0	19,2
Μοσχοβίτης (KAl[OH,F] ₂ /AlSiO ₃ O ₁₀)	12,0	13,0	12,0	13,0	12,5
Αλβίτης (NaAlSi ₃ O ₈)	9,0	11,0	11,0	12,0	10,7
Δολομίτης (CaMg(CO ₃))	6,0	10,0	8,0	-	6,0
ΣΥΝΟΛΟ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Επίσης, στο **Σχήμα 4.1** (τα σχήματα **1-3** βρίσκονται στο παράρτημα) παρουσιάζονται αναλυτικά τα ακτινοδιαγράμματα περιθλασίμετρου για τα τέσσερα δείγματα σχηματισμού που εξετάσθηκαν.



1 - File: d8100129.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.006 ° - Step: 0.019 ° - Step time: 31.8 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 22 s - 2-Theta: 4.000 ° - Theta: 2.000 ° - Chi: 0.00 ° - P
03-065-0466 (C) - Quartz low, syn - SiO₂ - Y: 103.71 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91410 - b 4.91410 - c 5.40600 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3221 (154) - 3
00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 38.09 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 4.98900 - b 4.98900 - c 17.06200 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3c (167) -
00-009-0466 (*) - Albite, ordered - NaAlSi₃O₈ - Y: 27.30 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.14400 - b 12.78700 - c 7.16000 - alpha 94.260 - beta 116.600 - gamma 87.670 - Base-centered - C-1 (0) -
01-089-2972 (C) - Clinocllore 1Mla - Mg₂5Fe1.65Al1.5Si₂2Al1.8O10(OH)8 - Y: 45.07 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.37000 - b 9.30000 - c 14.25000 - alpha 90.000 - beta 96.280 - gamma 9
01-079-1342 (C) - Dolomite - CaMg(CO₃)₂ - Y: 17.39 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 4.80640 - b 4.80640 - c 16.00600 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3 (148
00-007-0032 (D) - Muscovite 2M1, syn - KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂ - Y: 34.58 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.18900 - b 8.99500 - c 20.09700 - alpha 90.000 - beta 95.180 - gamma 90.000 - Base-ce

Σχήμα 4.1: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου του δείγματος 1.

4.2. Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου

Ο προσδιορισμός του ασβεστίτη (CaCO_3), έγινε με ασβεστίμετρο προσδιορισμού διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), τύπου Dietrich-Fruhling, του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (βλέπε **Φωτογραφία 4.2**).

Με το ασβεστίμετρο υπολογίζεται άμεσα το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που εκλύεται. Στη συνέχεια, αυτό ανάγεται σε ασβεστίτη (CaCO_3).



Φωτογραφία 4.2: Το ασβεστίμετρο του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας.

4.2.1. Πειραματική διαδικασία

Η μεθοδολογία της ανάλυσης, σύμφωνα με την προδιαγραφή (ASTM D 4373-84) έχει ως εξής:

- Αρχικά καταγράφονται οι συνθήκες πίεσης (mmHg) και θερμοκρασίας (°C) που επικρατούν στον χώρο που γίνεται η μέτρηση ώστε να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές διόρθωσης.
- Στη συνέχεια, ζυγίζεται ποσότητα πρότυπου δείγματος ασβεστίτη 0,6 – 0,7 g (m), περιεκτικότητας 99% σε ανθρακικό ασβέστιο, ώστε να υπολογισθεί ο συντελεστής διόρθωσης (ΣΔ), καθώς επίσης και ίδια ποσότητα από τα δείγματα προς ανάλυση.
- Αναλόγως με τον αριθμό των δειγμάτων στα οποία θα γίνει ο προσδιορισμός του ασβεστίτη, χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα πρότυπα. Για αριθμό δειγμάτων μεγαλύτερο από 4 – 5 χρησιμοποιούνται 2 πρότυπα.
- Το κάθε δείγμα τοποθετείται στη φιάλη του ασβεστιμέτρου, μαζί με δοκιμαστικό σωλήνα που περιέχει HCL 1:3. Η φιάλη κλείνεται, αδιάζεται το HCL από το δοκιμαστικό σωλήνα και ανακινείται μέχρι το πέρας της παρακάτω χημικής αντίδρασης:



- Το εκλυόμενο αέριο CO₂ που οδηγείται στον βαθμονομημένο σωλήνα, κατεβάζει την στάθμη του υγρού (νερό ελαφρά οξυνισμένο με HCL και ερυθρό του μεθυλίου), λόγω της πίεσης που του ασκεί. Έπειτα, αφού εξισορροπηθεί η υδροστατική πίεση, καταγράφεται η ένδειξη (x) του απελευθερωμένου αερίου σε ml. Σημειώνεται ότι η τάση ατμών του

νερού, $P(H_2O)$, για την συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία, λαμβάνεται από τον αντίστοιχο πίνακα των φυσικών αντιδράσεων.

4.2.2. Υπολογισμοί

Ο υπολογισμός του περιεχόμενου ασβεστίτη βάσει των παραπάνω γίνεται ως εξής (ASTM D 4373-84):

Ο όγκος του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα $V(CO_2)$, σε κανονικές συνθήκες (ΚΣ), δίνεται από τον τύπο:

$$V(CO_2) = \frac{273 \cdot x \cdot [P(CO_2) - P(H_2O)]}{760 \cdot (273 + T)} \quad [4.2]$$

όπου,

x: ένδειξη του απελευθερωμένου αερίου σε ml.

Η επί τοις % περιεκτικότητα (Π) του πρότυπου δείγματος ασβεστίτη σε CO_2 είναι:

$$\Pi = \frac{x}{0,196 \cdot m} \quad [4.3]$$

όπου,

m: μάζα του πρότυπου δείγματος ασβεστίτη = μάζα δείγματος (g).

Ο συντελεστής διόρθωσης ($\Sigma\Delta$) είναι:

$$\Sigma\Delta = 43,56 \cdot \Pi \quad [4.4]$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, η επί τοις % περιεκτικότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) είναι:

$$(\text{CO}_2) = \frac{0,196 \cdot V(\text{CO}_2) \cdot \Sigma \Delta}{m} \quad [4.5]$$

Συνεπώς, το ποσοστό του ασβεστίτη (CaCO_3) είναι:

$$(\text{CaCO}_3) = \frac{(\text{CO}_2) \cdot \text{MB}(\text{CaCO}_3)}{\text{MB}(\text{CO}_2)} \quad [4.6]$$

Και τελικά, εφόσον Μοριακό Βάρος (CaCO_3) = 100 και Μοριακό Βάρος (CO_2) = 44:

$$(\text{CaCO}_3) = 2,273 \cdot (\text{CO}_2) \quad [4.7]$$

4.2.3. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ασβεστιμετρίας, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα (4) δείγματα από την εξεταζόμενη αργιλομάργα.

Πίνακας 4.2: Περιεκτικότητα σε CaCO_3 στα δείγματα.

Αριθμός δείγματος	Περιεκτικότητα σε CaCO_3 (%)
1	29,63
2	20,85
3	25,02
4	26,07
Μ.Ο.	25,39

4.3. Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Η γνώση του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του οργανικού ποσοστού γεωλογικών σχηματισμών.

Ο προσδιορισμός του TOC έγινε στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Υδρογονανθράκων του Πολυτεχνείου Κρήτης, με την χρήση τεσσάρων (4) δειγμάτων.

4.3.1. Πειραματική διαδικασία

- Αρχικά τα δείγματα ξηράθηκαν στους 45°C για 48 ώρες.
- Στην συνέχεια, προστέθηκε με αργό ρυθμό διάλυμα που αποτελείται από 200 ml H₂O και 100 ml HCl 37% (εν θερμώ) και τα δείγματα άρχισαν να αναβράζουν. Μόλις σταμάτησε ο αναβρασμός προστέθηκε λίγο ακόμα HCl.
- Τα δείγματα ξεπλύθηκαν με H₂O μέχρις ότου το pH του διηθήματος να φτάσει σε 5,5 – 6.
- Στην συνέχεια, τα φίλτρα δειγμάτων ξηράθηκαν στους 45°C για 48 ώρες.
- Τελικά, προσδιορίστηκε ο περιεχόμενος οργανικός άνθρακας (TOC) σε στοιχειακό αναλυτή (LECO Carbon Analyzer, βλέπε **Φωτογραφία 4.3**), μέσω της καύσης των δειγμάτων σε θερμοκρασία > 1.000°C, έμμεσα από την απελευθέρωση του CO₂.



Φωτογραφία 4.3: Ο στοιχειακός αναλυτής του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Υδρογονανθράκων του Πολυτεχνείου Κρήτης

4.3.2. Αποτελέσματα

Στον **Πίνακα 4.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της περιεκτικότητας των δειγμάτων αργιλομάργας σε οργανικό άνθρακα (TOC), N, C και H. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα (4) δείγματα από το εξεταζόμενο γεωυλικό.

Πίνακας 4.3: Περιεκτικότητα σε N, C, H και ολικό οργανικό άνθρακα δειγμάτων αργιλομάργας.

Αριθμός δείγματος	Περιεκτικότητες (%)			
	N	C	H	TOC
1	0,04	0,33	0,68	0,25
2	0,11	0,82	0,59	0,62
3	0,10	0,77	0,60	0,58
4	0,05	0,36	0,69	0,27
M.O.	0,07	0,57	0,64	0,43

4.4. Εκτίμηση ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (CEC)

Όλα τα κατιόντα και τα ανιόντα, τα οποία μπορούν να ανταλλάσσονται μεταξύ στερεής και υγρής φάσης ή μεταξύ στερεής και στερεής φάσης ενός συστήματος και εφόσον αυτά βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, χαρακτηρίζονται ως ανταλλάξιμα ιόντα.

Τα ορυκτά, αλλά και η οργανική ουσία του εδάφους, έχουν την ιδιότητα να προσροφούν διάφορα ανιόντα και κατιόντα και να τα συγκρατούν, ως ανταλλάξιμα. Τα κυριότερα κατιόντα, τα οποία απαντούν στα εδάφη ως ανταλλάξιμα είναι το ασβέστιο (Ca^{2+}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}), το νάτριο (Na^+), το κάλιο (K^+), το υδρογόνο (H^+) και το αμμώνιο (NH_4^+).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) του εδάφους εκφράζεται σε χιλιοστοϊσοδύναμα (meq) ανά 100 g εδάφους. Τελευταία όμως συνηθίζεται να εκφράζεται και σε cmol/kg εδάφους. Επειδή η CEC επηρεάζεται και από το pH του μέσου, συγκρίσιμα είναι μόνο τα αποτελέσματα που αφορούν ίδιες τιμές του pH (Rhoades, 1982).

Η CEC είναι μία από τις πιο σημαντικές χημικές ιδιότητες του εδάφους και βοηθά στην κατανόηση και την επίλυση προβλημάτων της εδαφολογίας, αλλά και της θρέψης των φυτών.

Ο προσδιορισμός της CEC επιτρέπει τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού ενός εδάφους με βάσεις και εν συνέχεια τον υπολογισμό ποσοτήτων Ca ή S που χρειάζονται για την διόρθωση της οξύτητας ή της αλκαλικότητας των εδαφών, αντίστοιχα. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι ποσότητες CaSO_4 που απαιτούνται για την βελτίωση των αλατούχων εδαφών (Rhoades, 1982).

Η ποσότητα και το είδος των ανταλλάξιμων κατιόντων που βρίσκονται προσροφημένα από τα κολλοειδή του εδάφους, επιδρούν στην υφή, στην υδροπερατότητα και στην υδατοϊκανότητα του εδάφους (Rhoades, 1982).

Η CEC χαρακτηρίζει την ικανότητα του εδάφους να αδρανοποιεί ποικίλους ρύπους μέσω των μηχανισμών ανταλλαγής κατιόντων και προσρόφησης. Υψηλότερες τιμές του δείκτη CEC είναι προτιμότερες για τον πυθμένα/κάλυμμα των Χ.Υ.Τ.Α. (Καββαδάς, 2007).

Χαρακτηριστικές τιμές CEC (σε meq / 100 g) διαφόρων αργιλικών ορυκτών αναφέρονται στον **Πίνακα 4.4**.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικές τιμές CEC (Carroll, 1959) για pH = 7.

Ορυκτό	CEC (meq / 100 g)
Καολινίτης	3-15
Αλλοϋσίτης 2·H ₂ O	5-10
Αλλοϋσίτης 4·H ₂ O	40-50
Ομάδα Μοντοριλλονίτη	70-100
Ιλλίτης	10-40
Βερμικουλίτης	100-150
Χλωρίτης	10-40
Glaucinite	11-20+
Ομάδα Palygorskite	20-30
Allophane	~70

Ο προσδιορισμός της CEC των δειγμάτων εκτιμήθηκε με εμπειρικούς τύπους.

4.4.1. Εμπειρικός υπολογισμός

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (σε meq / 100 g δείγματος), εκτός από πειραματική διαδικασία προσδιορίσθηκε και με τον παρακάτω εμπειρικό τύπο (Breeuwsama, et al. 1984):

$$\text{CEC} = 0,7 \cdot f_i + 3,5 \cdot C \quad [4.9]$$

όπου,

f_i : ποσοστό (%) αργιλικού κλάσματος του δείγματος, και

C : συνολικό ποσοστό (%) άνθρακα του δείγματος.

Αντικαθιστώντας στη σχέση 4.9, από τον Πίνακα 4.3, σύμφωνα με τον οποίο η μέση τιμή του συνολικού άνθρακα στα δείγματα αργιλομάργας που εξετάσθηκαν είναι ίση με $C = 0,57\%$, και για $f_i = 26,8\%$, σύμφωνα με το Σχήμα 5.1 της κοκκομετρικής διαβάθμισης που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο (κεφ. 5), προκύπτει ότι **CEC = 20,76 meq / 100g**.

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Για την ταξινόμηση της εξεταζόμενης αργιλομάργας, έγινε καταρχήν κοκκομετρική διαβάθμιση και στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα όρια Atterberg. Τελικά, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, το γεωυλικό ταξινομήθηκε με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS).

Επιπλέον, διερευνήθηκε και η διόγκωση που τυχόν παρουσιάζει το εν λόγω υπό εξέταση γεωυλικό, προσδιορίζοντας την ενεργότητά του.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές περατότητας, αντοχής και συμπιεστότητας.

5.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό (ταυτοποίηση και ταξινόμηση) ενός εδαφικού υλικού. Η καταλληλότητα ενός εδάφους ως υλικό σε γεωτεχνικά έργα (π.χ. ως τάπητας σε Χ.Υ.Τ.Α.), εξαρτάται από τον προσδιορισμό της συμμετοχής διαφόρων μεγεθών κόκκων στο σύνολο του θεωρούμενο εδάφους.

Οι πληροφορίες που εξάγονται από την κοκκομετρική ανάλυση διευκολύνουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους, όσον αφορά την αντοχή, την παραμόρφωση και τη δυνατότητα κίνησης του υπόγειου νερού (διήθηση) μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων του (Στειακάκης, 2008).

Πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των εδαφών μπορεί να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό των κάτωθι μεγεθών ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (Κούκης – Σαμπατάκης, 2000):

- Η ενεργή διάμετρος d_{10} , ορίζεται ως η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 10% του δείγματος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη παράμετρος, καθώς συνδέεται με την υδροπερατότητα.
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας (C_u), ορίζεται ως $C_u = d_{60}/d_{10}$, όπου d_{60} η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 60% του δείγματος. Εδάφη με συντελεστή $C_u < 5$ χαρακτηρίζονται «ομοιόμορφα», ενώ για $C_u > 5$ καλούνται «καλά διαβαθμισμένα».
- Ο συντελεστής κυρτότητας (C_c), ο οποίος ορίζεται ως $C_c = (d_{30})^2/(d_{10} \cdot d_{60})$. Ο συντελεστής αυτός υποδηλώνει το μέτρο της καμπυλότητας της καμπύλης μεταξύ των σημείων d_{10} και d_{60} .

Ο προσδιορισμός της κατανομής των μεγέθων κόκκων (κοκκομετρική διαβάθμιση) γίνεται για τα αδρόκοκκα εδάφη με κόσκινα (μηχανική μέθοδος), ενώ για τα λεπτόκοκκα (ιλείς, άργιλοι) με την μέθοδο του αραιομέτρου.

Η όλη διαδικασία για το υπό εξέταση γεωυλικό πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

5.1.1. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα

Η ανάλυση με κόσκινα γίνεται με τη μηχανική δόνηση αντιπροσωπευτικού δείγματος του εδάφους, το οποίο διέρχεται διαμέσου σειράς κοσκίων με βαθμιαία μικρότερη διάσταση οπής και τη μέτρηση του βάρους του υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο.

Τα πρότυπα μεγέθη (διαστάσεις οπής) των κοσκίνων ποικίλουν.

Οι κωδικοί και οι διαστάσεις οπών των κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται στον **Πίνακα 5.1**. Τα κόσκινα αυτά ακολουθούν την προδιαγραφή ASTM D422.

Πίνακας 5.1: Κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Κωδικός κοσκίνου	Διάσταση οπών (mm)
4	4,750
10	2,000
20	0,850
40	0,425
60	0,250
100	0,150
140	0,106
200	0,075

Για την ανάλυση χρησιμοποιείται, ανάλογα με το υπό εξέταση υλικό και τα κόσκινα που διατίθενται, διαφορετική ποσότητα δείγματος.

Για λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη άμμο απαιτούνται 100 – 200 g, για αδρόκοκκη άμμο έως λεπτόκοκκα χαλίκια 500 g και για αδρόκοκκα χαλίκια και κροκάλες 5 kg ή και περισσότερο (ASTM D422). Επίσης, το δείγμα που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι ξηρό, χωρίς συσσωματώματα (Στειακάκης, 2008).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, περιγράφεται ως εξής:

- Το δείγμα θερμαίνεται στους 105°C για τουλάχιστον 24 ώρες και αφού ξηραθεί ζυγίζεται με ζυγό ακριβείας.

- Ζυγίζονται τα κόσκινα.
- Τοποθετούνται τα κόσκινα στη συσκευή με το μέγεθος βρογχίδας να αυξάνει από κάτω προς τα πάνω. Το τελευταίο κόσκινο (No. 200, με διάμετρο οπών ίση με 0,075 mm) συγκρατεί το πιο λεπτομερές κλάσμα της άμμου.
- Τοποθετείται το δείγμα στο κόσκινο με τη μεγαλύτερο διάμετρο.
- Το δείγμα κοσκινίζεται, ενεργοποιώντας κατάλληλο δονητή, για 5 έως 10 λεπτά. Η σειρά των κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως και ο δονητής, διακρίνονται στην **Φωτογραφία 5.1**.



Φωτογραφία 5.1: Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν και ο δονητής του
Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

- Αφαιρούνται τα κόσκινα και ζυγίζονται μαζί με την ποσότητα εδάφους που έχουν συγκρατήσει.

- Υπολογίζεται το ποσοστό του συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο, καθώς και το ποσοστό του διερχόμενου υλικού αφαιρώντας σταδιακά το ποσοστό του συγκρατούμενου σε κάθε κόσκινο.

5.1.2. Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση αραιομέτρου

Για τα υλικά που διέρχονται από το κόσκινο No. 200 (ιλείς και άργιλοι) έγινε κοκκομετρική ανάλυση με την μέθοδο του αραιομέτρου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο όταν διέρχεται > 5% του αρχικού υλικού από το κόσκινο No. 200.

Η αραιομέτρηση βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του (Στειακάκης, 2008):

$$u = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{1800 \cdot \eta} \quad [5.1]$$

όπου,

u: ταχύτητα καθίζησης (cm/s),

d: διάμετρος εδαφικών κόκκων (mm),

ρ_s : πυκνότητα εδαφικών κόκκων (g/cm³),

ρ_f : πυκνότητα υγρού μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η καθίζηση (g/cm³),
και

η : ιξώδες του διαλύματος (g·s/cm²).

Με βάση την ταχύτητα καθίζησης των κόκκων του εδαφικού υλικού, προκύπτει η κατανομή του μεγέθους. Οι μεγάλοι κόκκοι καθιζάνουν πρώτοι και οι μικρότερης διαμέτρου κόκκοι τελευταίοι.

Το αραιόμετρο μετράει την πυκνότητα του εν αιωρήσει στερεού υλικού μέσα σ' ένα υγρό μέσο (απιονισμένο νερό), σύμφωνα με την σχέση (Στειακάκης, 2008):

$$w_d = \frac{R \cdot \alpha \cdot 100}{W} \quad [5.2]$$

όπου,

w_d : ποσοστό (%) των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται (σε δεδομένη χρονική στιγμή) εν αιωρήσει στο διάλυμα,

R : ένδειξη του αραιομέτρου,

α : συντελεστής διόρθωσης της πυκνότητας εδαφικών κόκκων, και

W : μάζα (g) του ξηρού δείγματος που προστέθηκε αρχικά στο διάλυμα.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αραιόμετρο της εταιρείας Eijelkamp που ακολουθεί την προδιαγραφή ASTM 152H (βλέπε **Φωτογραφία 5.2**).

Η διαδικασία της αραιομέτρησης (σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D-422/72) έγινε ως εξής (Στειακάκης, 2008):

- 40g ξηρού εδαφικού δείγματος από το κλάσμα που έχει διέλθει από το κόσκινο No. 200 τοποθετούνται σε δοχείο των 250 ml.
- Προστίθενται 125 ml νατρίουχου εξαμεταφωσφορικού διαλύματος (διάλυμα Calgon) 5% κ.β. Το διάλυμα Calgon λειτουργεί ως παράγοντας διασποράς (αντικροκιδωτικό), ώστε να αποφευχθεί η συσσωμάτωση των εδαφικών κόκκων.



Φωτογραφία 5.2: Το αραιόμετρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

- Το δείγμα ανακατεύεται καλά και αφήνεται τουλάχιστον 16 ώρες να διαποτιστεί. Στη συνέχεια, μεταφέρεται σε δοχείο και αναμιγνύεται για περίπου 1 λεπτό, προκειμένου να διαλυθούν πιθανά συσσωματώματα.
- Το δείγμα μεταφέρεται σε ογκομετρικό κύλινδρο των 1.000 ml, ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό. Αφού σφραγισθεί το στόμιο του κυλίνδρου με πώμα, αναταράσσεται και αμέσως μετά τοποθετείται μέσα σε υδατόλουτρο, για διατήρησι θερμοκρασίας στους 20°C.
- Μόλις το δείγμα αποκτήσει ομοιογενή και κοινή θερμοκρασία με αυτήν του υδατόλουτρου ο κύλινδρος αφαιρείται, αναταράσσεται και επανατοποθετείται στο υδρόλουτρο. Αμέσως αρχίζει καθίζηση των εδαφικών κόκκων.
- Το αραιόμετρο τοποθετείται στο κύλινδρο και οι μετρήσεις λαμβάνονται στους χρόνους: 1, 2, 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8 και 24 h. Ταυτόχρονα με τις ενδείξεις του αραιομέτρου καταγράφονται και οι αντίστοιχες θερμοκρασίας (T).

Σημειώνεται ότι:

α) Οι ενδείξεις του αραιομέτρου διορθώνονται με κατάλληλους συντελεστές, όσον αφορά στον μηνίσκο που παρατηρείται στα τοιχώματα του οργάνου, την θερμοκρασία και το αντικροκιδωτικό που χρησιμοποιήθηκε. Για το συγκεκριμένο αραιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε, η διόρθωση του μηνίσκου είναι ίση με 0,5 g ενώ η διόρθωση του παράγοντα διασποράς (για την συγκεκριμένη ποσότητα αντικροκιδωτικού) είναι ίση με -7,92 g.

β) Η ταχύτητα καθίζησης θεωρείται γραμμική και υπολογίζεται από την ένδειξη του αραιομέτρου (απόσταση που διανύει κάθε εδαφικός κόκκος) προς τον χρόνο από την έναρξη της καθίζησης.

5.1.3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης, δίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 5.2 (κοσκίνηση) και 5.3 (αραιομέτρηση).

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα κοσκίνησης (Αρχική μάζα ξηρού δείγματος: 507,39 g).

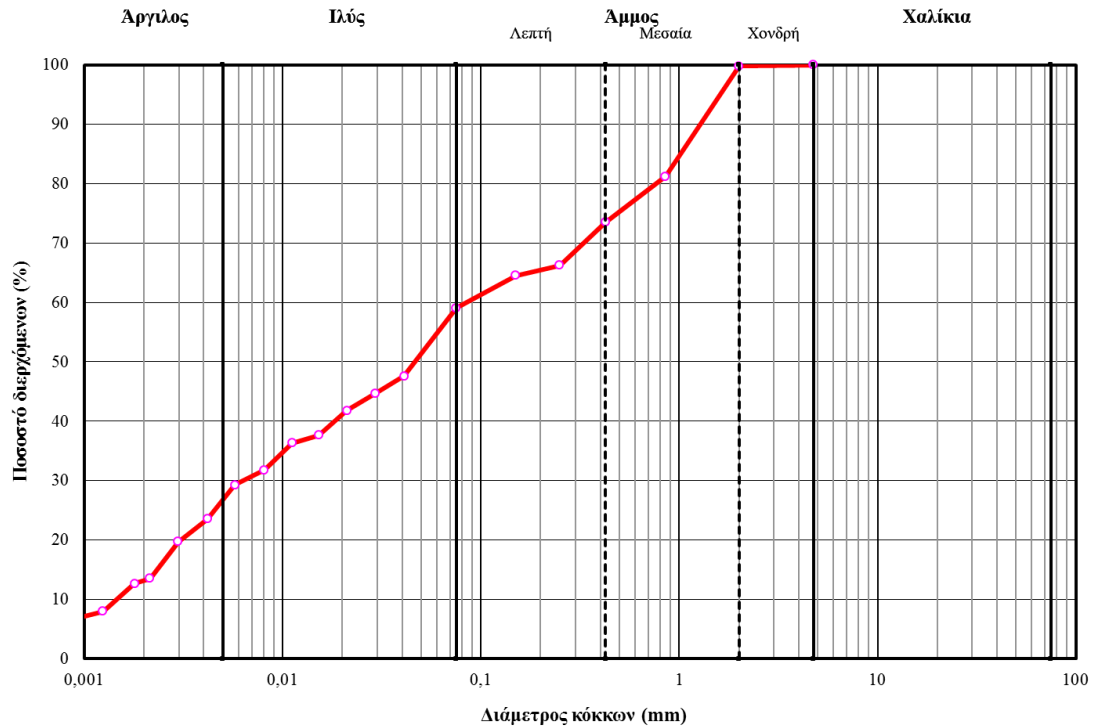
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος σπών d (mm)	Μάζα κοσκίνου (g)	Μάζα κοσκίνου με δείγμα (g)	Μάζα συγκρ. κόκκων (g)	Ποσοστό συγκρ. κόκκων (%)	Ποσοστό διερχ. κόκκων (%)
10	2,000	423,85	424,94	1,09	0,21	99,79
20	0,850	381,35	469,65	88,30	17,40	82,38
40	0,425	350,69	387,04	36,35	7,16	75,22
60	0,250	321,48	355,93	34,45	6,79	68,43
100	0,150	318,86	326,86	8,00	1,58	66,85
200	0,075	298,80	324,94	26,14	5,15	61,70
Συλλέκτης:		282,66	292,12	9,46	1,86	-

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα αραιομέτρησης (Αρχική μάζα ξηρού δείγματος: 40,00 g).

Χρόνος (min)	Αρχική ανάγνωση (g)	Θερμοκρασία (°C)	Ιξώδες (g·sec/cm ²)	R (g)	d (mm)	w _d (%)	Ποσοστό επί του συνόλου (%)
1	38	24,3	9,31E-06	33,8	0,0422	83,47	51,50
2	36	24,0	9,37E-06	31,7	0,0304	78,30	48,31
4	34	23,8	9,41E-06	29,6	0,0218	73,20	45,16
8	31	24,1	9,35E-06	26,7	0,0156	66,01	40,73
15	30	24,3	9,31E-06	25,8	0,0115	63,69	39,30
30	27	23,5	9,48E-06	22,5	0,0083	55,66	34,34
60	25	24,2	9,33E-06	20,7	0,0059	51,25	31,62
120	21	24,0	9,37E-06	16,7	0,0043	41,21	25,43
240	18	25,0	9,16E-06	14,0	0,0030	34,56	21,32
480	14	25,3	9,10E-06	9,6	0,0022	23,67	14,60
690	13	25,0	9,16E-06	9,0	0,0018	22,20	13,70
1518	10	24,0	9,37E-06	5,7	0,0013	14,02	8,65
3176	9	24,0	9,37E-06	4,7	0,0009	11,55	7,12
4596	8	24,1	9,35E-06	3,7	0,0007	9,15	5,65
6235	7	24,1	9,35E-06	2,7	0,0006	6,68	4,12
7249	7	24,2	9,33E-06	2,7	0,0006	6,75	4,17
10183	6	24,7	9,23E-06	1,9	0,0005	4,67	2,88

Για τον Πίνακα 5.3 θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε πυκνότητα εδαφικών κόκκων $\rho_s = 2,7 \text{ g/cm}^3$ και για το απιονισμένο νερό $\rho_F = \rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$. Επίσης για τη συγκεκριμένη πυκνότητα εδαφικών κόκκων, ο συντελεστής διόρθωσης α της σχέσης 5.2 είναι ίσος με 0,9889.

Τα αποτελέσματα αυτά τοποθετήθηκαν σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα (η διάμετρος των κόκκων στη λογαριθμική κλίμακα) και σχεδιάστηκε η **κοκκομετρική καμπύλη**, όπως αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**.



Σχήμα 5.1: Κοκκομετρική καμπύλη.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το δείγμα αποτελείται κατά 26,8% από άργιλο, 32,24% από ιλύ, 14,45% από λεπτή άμμο, 26,21% από μέση άμμο και 0,30% από χονδρή άμμο.

Από την κοκκομετρική ανάλυση το γεωυλικό χαρακτηρίστηκε ως: <<Αργιλομάργα>>.

Επιπλέον, προσδιορίσθηκαν η ενεργή διάμετρος (d_{10}), ο συντελεστής ομοιομορφίας (C_u) και ο συντελεστής κυρτότητας (C_c). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.4**.

Πίνακας 5.4: Παράμετροι κοκκομετρικής διαβάθμισης

Παράμετρος	Τιμή
d_{10}	0,001
C_u	80
C_c	0,45

Από τις τιμές αυτές προκύπτει ότι το δείγμα είναι ετερόμορφο ($C_u > 15$) και πτωχής κοκκομετρικής διαβάθμισης (με βάση το συντελεστή κυρτότητας C_c). (Στειακάκης, 2008).

5.2. Προσδιορισμός ορίων Atteberg

Τα όρια Atteberg περιγράφουν την μετάπτωση του εδάφους από την υγρή στην πλαστική και στην συνέχεια στην ημιστερεή και στην στερεή κατάσταση, σύμφωνα με τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας.

Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν εάν το έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας (Στειακάκης, 2008).

Τα όρια Atteberg χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον χαρακτηρισμό των εδαφών με βάση το διάγραμμα Casagrande και την ταξινόμηση τους, σε συνδυασμό με την κοκκομετρική ανάλυση, με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Unified Soil Classification System – USCS) (Στειακάκης, 2008).

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων Atteberg πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικό υλικό που διήλθε από το κόσκινο No. 40 (διάμετρος οπών ίση με 0,425 mm).

Τα όρια Atteberg που υπολογίσθηκαν είναι τα εξής (Στειακάκης, 2008):

- Όριο υδαρότητας (LL): Είναι η περιεκτικότητα σε νερό (%), στην οποία το έδαφος αρχίζει να εμφανίζει διατμητική αντοχή και εκφράζει το όριο μεταξύ της υδαρούς και της πλαστικής κατάστασης του εδάφους. Κάτω

από αυτό το όριο, το έδαφος συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Το LL προσδιορίσθηκε με χρήση της συσκευής Casagrande (ASTM D4318).

- Όριο πλαστικότητας (PL): Όταν η υγρασία του εδάφους μειώνεται από το όριο υδαρότητας, τότε ο όγκος και η πλασιμότητά του μειώνεται αντίστοιχα. Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας, το έδαφος θα σταματήσει να επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά και θα προκληθεί θραύση. Αυτή η περιεκτικότητα σε νερό (%) καλείται όριο πλαστικότητας και εκφράζει το όριο μεταξύ της πλαστικής και της ημιστερεής κατάστασης. Ο προσδιορισμός έγινε με την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο θρυμματίζονταν όταν πλάθονταν σε λεπτούς ραβδίσκους στην προσπάθεια ελάττωσης της διαμέτρου κάτω από 3 mm.
- Όριο συρρίκνωσης (SL): Εκφράζει το όριο μεταξύ της ημιστερεής και της στερεής κατάστασης. Ο προσδιορισμός του έγινε με ειδικά διαμορφωμένο κυλινδρικό δοκίμιο, στο οποίο μετριοταν η μείωση του μήκους του κατά την διάρκεια της φυσικής του ξήρανσης (συρρίκνωση).

Μέσω των ορίων Atterberg προσδιορίσθηκαν και οι παρακάτω δείκτες (Στειακάκης, 2008):

- Δείκτης πλαστικότητας (PI): Είναι το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας, στο οποίο το έδαφος επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά. Μεγάλη τιμή του δείκτη πλαστικότητας δείχνει μεγάλο εύρος υγρασίας στην οποία το έδαφος διατηρείται σε πλαστική κατάσταση. Ορίζεται ως:

$$PI = LL - PL \quad [5.3]$$

- Ενεργότητα: Ο δείκτης PI αποτελεί γραμμική συνάρτηση του ποσοστού (%) των αργιλικών ορυκτών του εδάφους. Η κλίση της ευθείας καλείται

ενεργότητα και ισούται με PI/C , όπου C το ποσοστό (%) του κλάσματος της αργίλου ($d < 0,002\text{mm}$). Η ενεργότητα αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μέτρο της δραστηρότητας του αργιλικού κλάσματος, όσον αφορά την ικανότητά του να προσροφήσει νερό. Όταν η ενεργότητα είναι μικρότερη του 0,75 τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ως «μη ενεργό», όταν είναι μεταξύ 0,75 και 1,25 ως «κανονικό», όταν είναι μεταξύ 1,25 και 2 ως «ενεργό», και για πάνω από 2 «πολύ ενεργό». Στον **Πίνακα 5.5** δίνονται μερικές χαρακτηριστικές τιμές για διάφορα εδάφη.

Πίνακας 5.5: Ενεργότητα αργίλων (Παπαχαρίσης κ.ά., 2003).

Έδαφος - Ορυκτό	Ενεργότητα	Χαρακτηρισμός
Καολινίτης	0,4	Μη ενεργό (< 0,75)
Ιλλίτης	0,9	Κανονικό (0,75-1,25)
Ασβεστούχος μοντμοριλλονίτης	1,5	Ενεργό (1,25-2,00)
Μπεντονίτης	7,0	Πολύ ενεργό (> 2,00)

5.2.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας

Ο τρόπος εργασίας που ακολουθήθηκε, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D4318, είναι ο εξής:

- Λαμβάνεται δείγμα περίπου 100 g, αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα νερού (15 – 20 ml) και τοποθετείται στην κάψα της συσκευής Casagrande (βλέπε **Φωτογραφία 5.3**), έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια. Το μέγιστο πάχος του στρώματος πρέπει να είναι περίπου 1 cm.



Φωτογραφία 5.3: Η συσκευή *Casagrande* του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

- Χωρίζεται το εδαφικό δείγμα σε δύο ίσα μέρη, σύροντας το εργαλείο αυλάκωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου.
- Περιστρέφοντας τον μοχλό της συσκευής με σταθερό ρυθμό περίπου 2 περιστροφών / sec, πραγματοποιούνται πτώσεις του κυπέλλου και μετρώνται οι κτύποι (N) που απαιτούνται έως ότου οι δύο πλευρές του δείγματος ενωθούν στη βάση της χαραγής και κατά μήκος 12,7 mm.
- Εάν ο αριθμός των περιστροφών είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνονται 35 – 40 g από το δείγμα, από την περιοχή της επαφής (κλειστή αύλακα) και πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ζυγίσεις, για την εκτίμηση της υγρασίας.
- Πραγματοποιείται πλήθος δοκιμών (3 – 5) μεταβάλλοντας την περιεχόμενη υγρασία w (%) του δείγματος. Οι τιμές (N, w) σχεδιάζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα και χαράζοντας την ευθεία που προσεγγίζει τα αποτελέσματα, υπολογίζεται η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας w για $N = 25$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο όριο υδαρότητας (LL) του δείγματος.

5.2.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας

Ο προσδιορισμός του PL έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D4318 και περιγράφεται παρακάτω :

- Λαμβάνονται περίπου 20 g εδαφικού υλικού, προστίθεται νερό και αναμιγνύονται ώστε να αποκτήσουν πλασιμότητα.
- Η εδαφική μάζα χωρίζεται σε τρία μέρη. Κάθε δείγμα συμπιέζεται και μορφοποιείται σε μάζα ελλειψοειδούς σχήματος, σχηματίζοντας ραβδίσκο ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm σε όλο το μήκος του.
- Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση ραβδίσκου διαμέτρου 3 mm, το δείγμα αναπλάθεται προσθέτοντας περισσότερο νερό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προσεγγιστεί μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκος θρυμματίζεται κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρος του κάτω από 3 mm.
- Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ορίου πλαστικότητας (ο ραβδίσκος θρυμματίζεται κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρος του κάτω των 3 mm, ενώ η περαιτέρω αύξηση της υγρασίας οδηγεί στο όριο υδαρότητας, οπότε το δείγμα χάνει τις ιδιότητες της εύπλαστης μάζας) το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μη πλαστικό-non plastic.
- Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 3 φορές.
- Για κάθε σχηματιζόμενο ραβδίσκο διαμέτρου 3 mm που θρυμματίζεται κυλινδρούμενος, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ζυγίσεις πριν και μετά την τοποθέτησή του σε ξηραντήριο (θερμοκρασία 110°C), για την εκτίμηση της υγρασίας.

- Τελικά, ως όριο πλαστικότητας (PL) λογίζεται η μέση τιμή των παραπάνω υγρασιών.

5.2.3. Προσδιορισμός ορίου γραμμικής συρρίκνωσης

Για τον προσδιορισμό του (SL) έγιναν τα εξής (ELE International, Inc. (2004) :

- Ελήφθησαν 150 g ξηρού εδαφικού υλικού (διερχόμενο από το κόσκινο No. 40), τα οποία τοποθετήθηκαν μέσα σε κάψα με νερό και αναμίχθηκαν ώστε να αποκτήσουν πλασιμότητα. Η αρχική υγρασία του δείγματος θα πρέπει να είναι ίδια με το όριο υδαρότητας.
- Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε σε κυλινδρικό καλούπι (η επιφάνεια του οποίου είχε επαληφθεί με γράσο ώστε το εδαφικό υλικό να μην κολλήσει στο καλούπι), αποφεύγοντας να παγιδευτεί αέρας, μέχρι να γεμίσει το καλούπι. Το δείγμα στην άκρη του καλουπιού διαμορφώθηκε με χρήση μαχαιριού.
- Το εδαφικό δείγμα αφέθηκε να ξηρανθεί αργά μέσα στο καλούπι, εκτεθειμένο στον αέρα, αλλά σε μέρος χωρίς υγρασία. Μετρήθηκε το αρχικό του μήκος (τουλάχιστον 3 φορές με τον βερνιέρο).
- Όταν το εδαφικό δείγμα συρρικνώθηκε και διαχωρίστηκε από τα τοιχώματα του καλουπιού, τοποθετήθηκε σε ξηραντήριο σε θερμοκρασία 60 – 65°C.
- Όταν σταμάτησε η συρρίκνωση, η θερμοκρασία του φούρνου αυξήθηκε στους 105 – 110°C, μέχρι να ολοκληρωθεί η ξήρανση.
- Στη συνέχεια, το δείγμα αφαιρέθηκε από τον φούρνο και το μήκος του μετρήθηκε με τον βερνιέρο, τουλάχιστον 3 φορές.
- Το όριο συρρίκνωσης SL (%) προσδιορίστηκε από τη σχέση:

$$SL = \left(1 - \frac{L_D}{L_0}\right) \cdot 100 \quad [5.4]$$

όπου,

L_0 : αρχικό μήκος του διαμορφωμένου δείγματος (mm), και

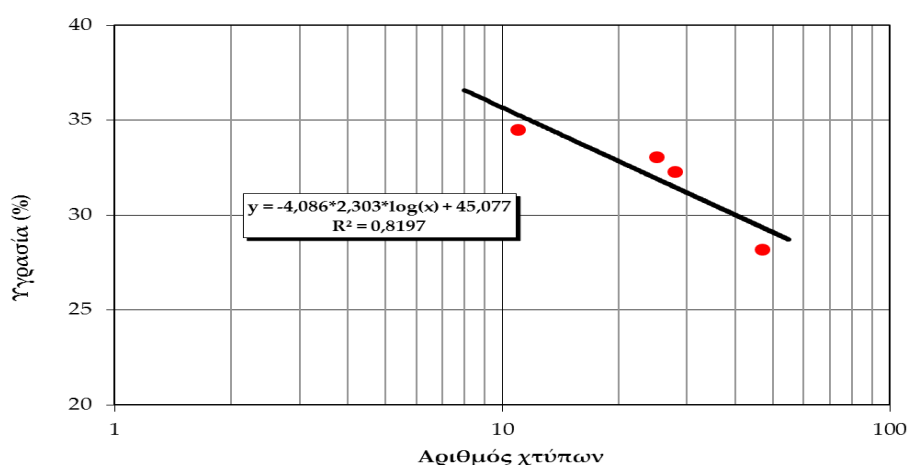
L_D : τελικό μήκος δείγματος (mm),

5.2.4. Αποτελέσματα

Στα επόμενα δίνονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας (Πίνακας 5.6 και Σχήμα 5.2), του ορίου πλαστικότητας (Πίνακας 5.7) και του ορίου συρρίκνωσης (Πίνακας 5.8).

Πίνακας 5.6: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός χτύπων	Μάζα υποδοχέα (g)	Μάζα υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Μάζα υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Υγρασία (%)
1	47	41,83	62,44	57,91	28,17
2	28	42,23	67,22	61,12	32,29
3	25	41,53	64,39	58,71	33,06
4	11	41,67	68,03	61,27	34,49



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Πίνακας 5.7: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας.

Αριθμός δοκιμίου	Μάζα υποδοχέα (g)	Μάζα υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Μάζα υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Υγρασία (%)
1	42,54	44,39	44,16	14,20
2	40,33	41,46	41,32	14,14
3	43,79	45,45	45,24	14,48
4	40,22	41,93	41,73	13,25

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου συρρίκνωσης.

Αριθμός δείγματος	L ₀ (mm)	L _D (mm)	SL (%)
1	73,86	70,2	4,95
2	71,68	68,43	4,48
3	72,88	69,12	5,15
4	87,86	83,75	4,71

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών, μετά και από τους απαραίτητους υπολογισμούς, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Τιμές ορίων Atterberg, δείκτη πλαστικότητας και ενεργότητα του δείγματος(%).

Όριο υδαρότητας (LL)	Όριο πλαστικότητας (PL)	Όριο συρρίκνωσης (SL)	Δείκτης πλαστικότητας (PI)	Ενεργότητα
31,4	14,03	4,8	17,37	1,28

5.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση του γεωυλικού

Για την γεωτεχνική ταξινόμηση του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS). Σύμφωνα με αυτό, κάθε έδαφος χαρακτηρίζεται με ένα συμβολισμό αποτελούμενο από ένα κύριο και ένα

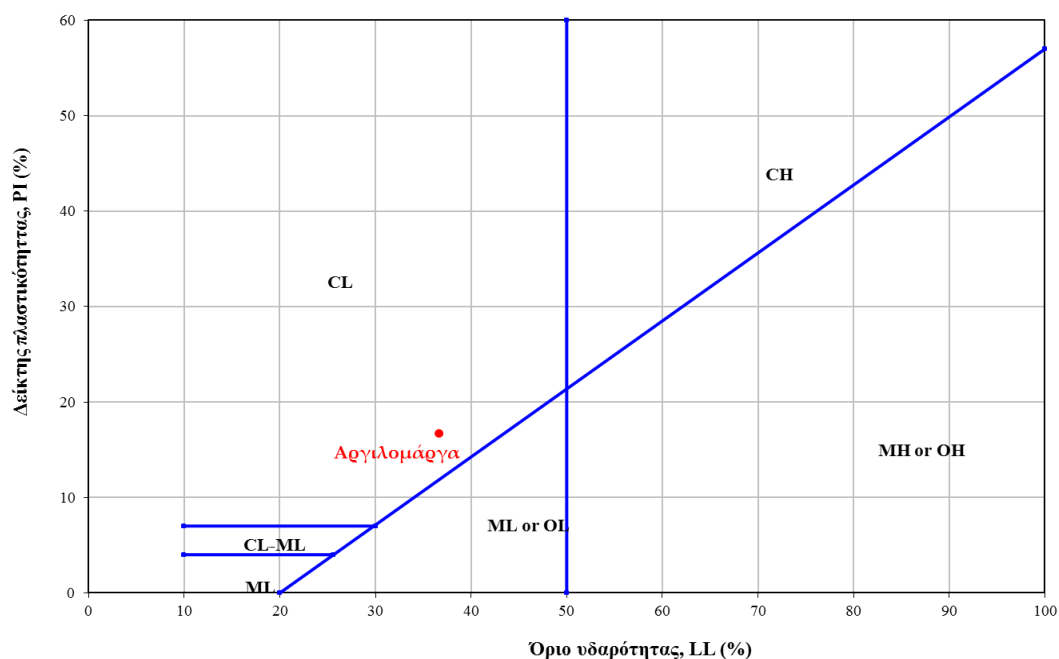
δευτερεύον γράμμα. Τα γράμματα και η σημασία τους δίνονται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Συμβολισμός εδαφών σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης.

Κύριο Γράμμα	Δευτερεύον Γράμμα
G: Χάλικες	W: Καλά διαβαθμισμένο
S: Αμμος	P: Πτωχά διαβαθμισμένο
M: Ιλύς	M: Με μη πλαστικά λεπτομερή
C: Αργίλος	C: Με πλαστικά λεπτομερή
O: Οργανικό έδαφος	L: Χαμηλής πλαστικότητας (LL<50)
Pt: Τύρφη	H: Υψηλής πλαστικότητας (LL>50)

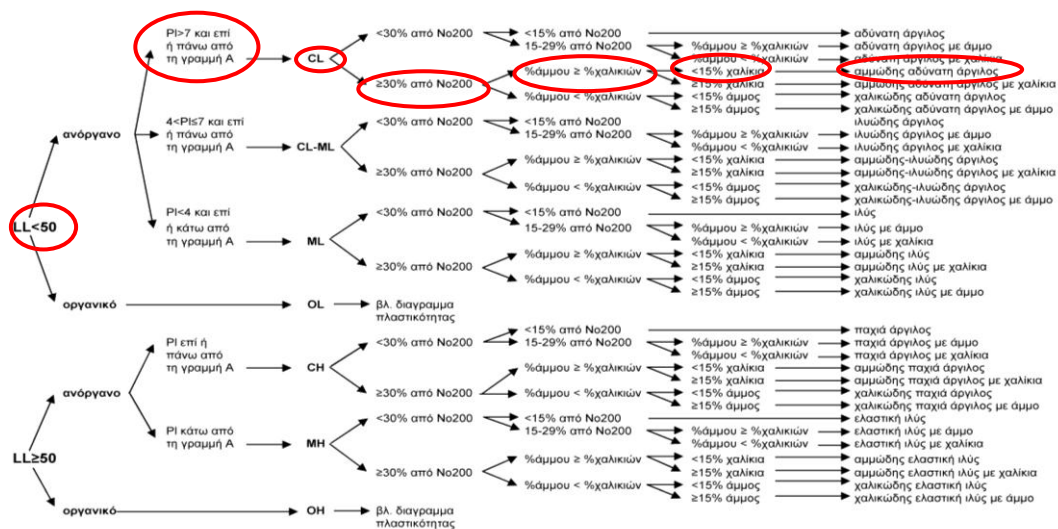
Για την ταξινόμηση του εδάφους με βάση το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS), καταρχήν το έδαφος χαρακτηρίζεται βάσει της θέσης του στο «διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande» (από το όριο υδαρότητας και τον δείκτη πλαστικότητας) και στην συνέχεια, από διαγράμματα ροής που λαμβάνουν υπόψη τόσο την κοκκομετρία του, όσο και τα όρια Atterberg.

Στο Σχήμα 5.3 διακρίνεται η θέση του δείγματος που εξετάστηκε στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande. Σύμφωνα με αυτό, το δείγμα χαρακτηρίζεται ως «CL».



Σχήμα 5.3: Θέση δείγματος στο διάγραμμα πλαστικότητας *Casagrande*.

Με βάση τον παραπάνω χαρακτηρισμό και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης που προηγήθηκε, το υλικό ταξινομείται στο Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (ASTM D2487-00), σύμφωνα με το **Σχήμα 5.4** ως «CL» «**Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας**»:



Σχήμα 5.4: Ταξινόμηση της εξεταζόμενης αργιλομάργας με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών.

5.4. Προσδιορισμός διογκωσιμότητας

Διόγκωση ονομάζεται η αύξηση του όγκου του εδάφους με την υγρασία του.

Αν V_0 ο αρχικός όγκος ξηρού υλικού που τοποθετείται σε νερό και V ο τελικός του όγκος μέσα στο νερό, η διόγκωση (%) του υλικού ορίζεται από την σχέση:

$$\text{Ελεύθερη Διόγκωση} = \frac{V - V_0}{V_0} \cdot 100 (\%) \quad [5.5]$$

Σε υψηλά διογκούμενα εδάφη, όπως ο μπετονίτης, η διόγκωσή τους μπορεί να φτάσει και πάνω από το 2000%.

5.4.1. Πειραματική διαδικασία

- Λαμβάνεται ξηρό εδαφικό δείγμα 50 g (διερχόμενο από το κόσκινο Νο. 40).
- Ρίχνονται 5 ml ξηρού εδαφικού δείγματος σε κυλινδρικό σωλήνα πληρωμένο με 25 ml απιονισμένο νερό.
- Μετράται ο όγκος του υλικού μέσα στον κυλινδρικό σωλήνα, μετά από ώρες, και μέχρι η ένδειξη αυτή να παραμείνει σταθερή.

5.4.2. Αποτελέσματα

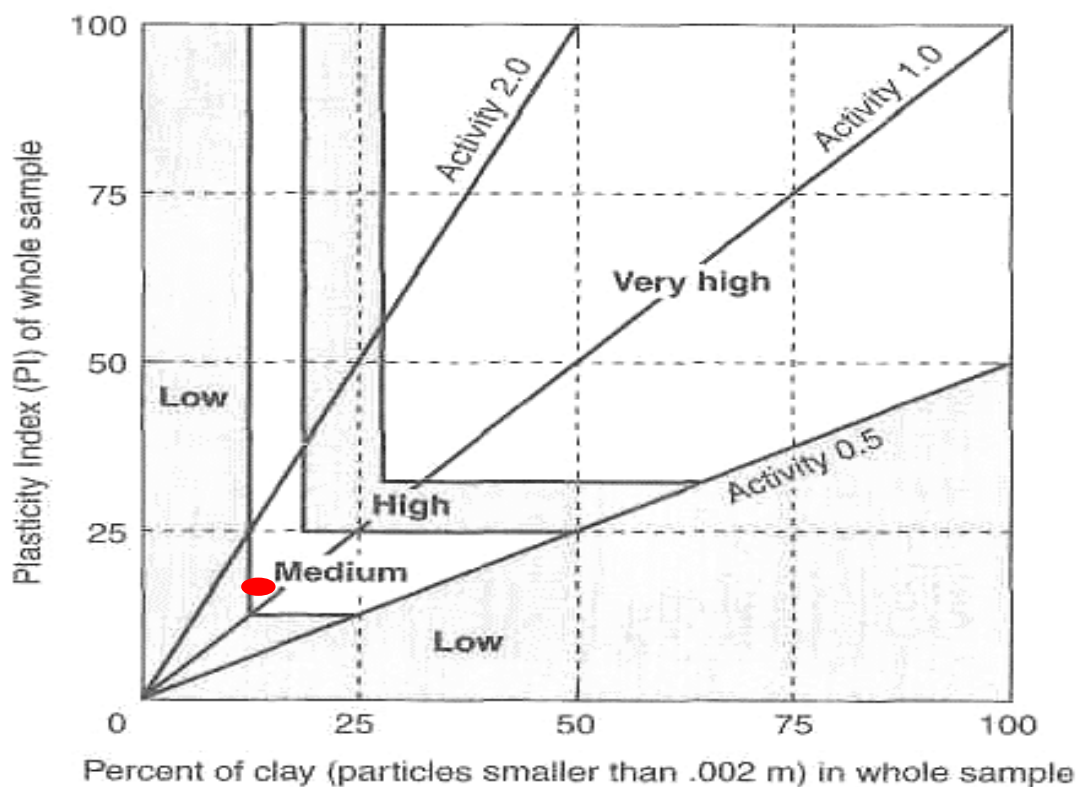
Τα αποτελέσματα της ελεύθερης διόγκωσης για τα εδαφικά δείγματα της αργιλομάργας που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.11**.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα δοκιμών διόγκωσης της αργιλομάργας.

Αριθμός δείγματος	Διόγκωση (%)
1	56
2	50
3	58
4	51

Εδάφη με τιμές ελεύθερης διόγκωσης γύρω στα 50% όπως στην περίπτωση του γεωυλικού παρουσιάζουν προβλήματα διόγκωσης (Τσιαμπάος,1988).

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ενεργότητας, με βάση το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος που είναι 14,5% και το δείκτη πλαστικότητας που είναι 17,37% και η ενεργότητα που είναι 1,28, παρουσιάζει μέτρια διόγκωση.



Σχήμα 5.4: Θέση δείγματος στο διάγραμμα ενεργότητας κατά Skempton.

5.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Με τον όρο συμπύκνωση (compaction) νοείται η τεχνική αύξηση της πυκνότητας του εδάφους που έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της διατμητικής του αντοχής, τη μείωση των καθιζήσεων και της υδραυλικής του αγωγιμότητας.

Μερικές από τις περιπτώσεις στις οποίες επιδιώκεται η συμπύκνωση του εδάφους είναι, η βελτίωση του για τη θεμελίωση τεχνικών έργων, η κατασκευή εδαφικών επιχωμάτων για την κατασκευή δρόμων, η κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων, η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας και η μείωση των ενδεχόμενων καθιζήσεων εδαφικών υλικών πλήρωσης εκσκαφών (Στειακάκης, 2008).

Ο βαθμός συμπίκνωσης ενός εδάφους ορίζεται ως ο λόγος της ξηρής πυκνότητας του εδάφους που επιτυγχάνεται επί τόπου (στο εργοτάξιο) προς αυτήν που έχει υπολογιστεί εργαστηριακά και εκφράζεται επί τοις %.

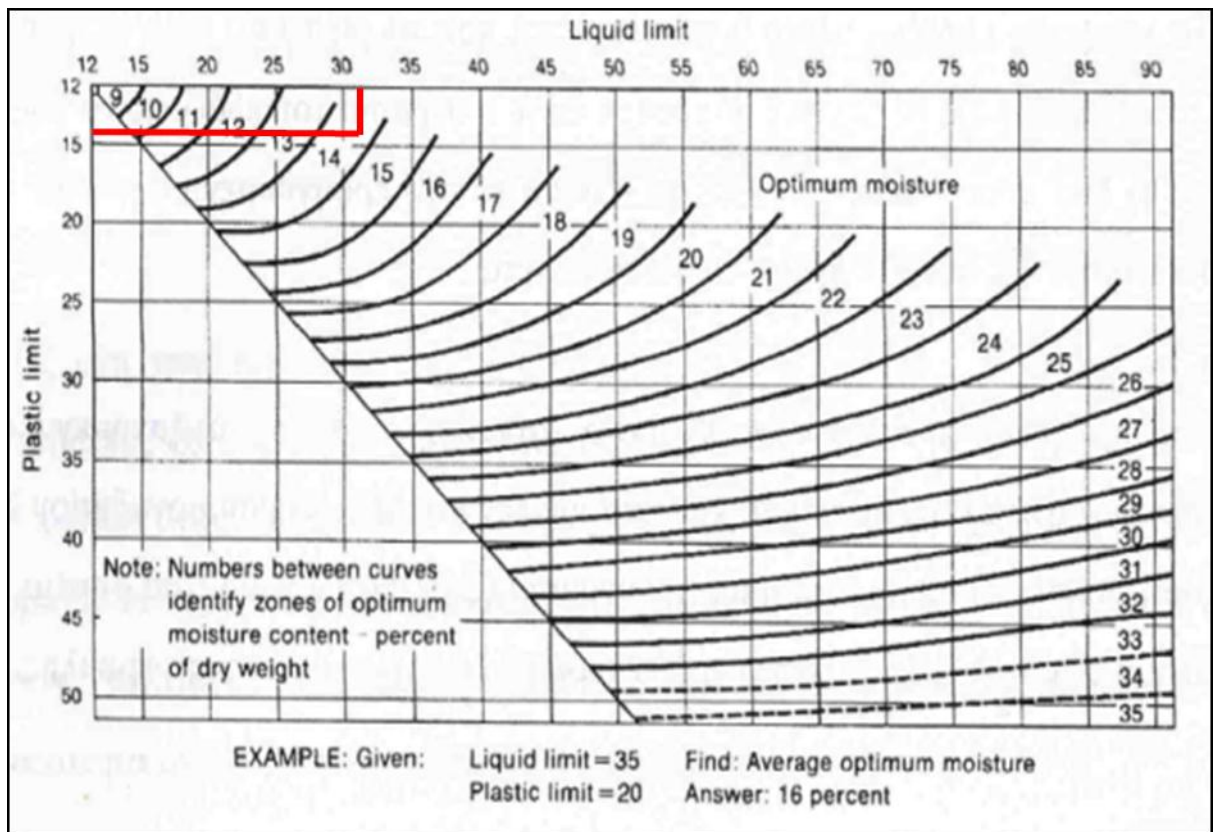
Η μέγιστη συμπίκνωση επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας νερού που ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των κόκκων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη αναδιάταξη των κόκκων σε πυκνότερη δομή. Εάν μεταβληθεί η περιεκτικότητα σε νερό του εδαφικού δείγματος, διατηρώντας σταθερή την ενέργεια συμπίκνωσης (βάρος σφύρας, ύψος πτώσης, αριθμός κτύπων ανά στρώση, πάχος των στρώσεων) και σχεδιαστεί το διάγραμμα μεταβολής του ξηρού μοναδιαίου βάρους (γ_d) σε συνάρτηση με την περιεχόμενη υγρασία (w), τότε προκύπτει μια καμπύλη που παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή του γ_d για μια ορισμένη περιεκτικότητα σε νερό. Η τιμή αυτή χαρακτηρίζεται σαν **βέλτιστη υγρασία** κατά Proctor (Στειακάκης, 2008).

Αν αυξηθεί η ενέργεια συμπίκνωσης αυξάνεται και η μέγιστη τιμή του γ_d και μειώνεται η τιμή της βέλτιστης υγρασίας. Η μορφή της καμπύλης συμπίκνωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

Η τιμή της βέλτιστης υγρασίας αυξάνει λογαριθμικά με την αύξηση των λεπτόκοκκων στο έδαφος, ενώ εμφανίζει γενικά γραμμική σχέση με την αύξηση του ποσοστού των κόκκων της άμμου (Olson – Daniel, 1981).

Προκειμένου να υπολογισθεί η βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης, με βάση την **πρότυπη δοκιμή Proctor** (Olson, Daniel, 1981, Sällfors, Öberg-Högst 2002), πραγματοποιήθηκαν συμπυκνώσεις του υπό εξέταση εδαφικού δείγματος σε υγρασίες γύρω από την «εκτιμώμενη» βέλτιστη υγρασία.

Ο καθορισμός της εκτιμώμενης αυτής βέλτιστης υγρασίας έγινε με βάση το νομόγραμμα στο **Σχήμα 5.5.1**, το οποίο υποδεικνύει τη βέλτιστη υγρασία εάν οι τιμές του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας του εδάφους είναι γνωστές.



Σχήμα 5.5.1: Προσεγγιστικός προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας κατά Proctor, με βάση τα όρια Atterberg (Bowels, 1986 από Johnson και Sfallberg, 1962).

Σύμφωνα με τα όρια Atterberg του δείγματος (κεφ. 5) και το νομόγραμμα στο Σχήμα 6.1, εκτιμήθηκε ότι βέλτιστη υγρασία είναι ίση με 14,5%. Με βάση αυτή την τιμή έγιναν 5 δοκιμές συμπύκνωσης με αρχικές υγρασίες ίσες με 11, 13, 15, 17 και 19% αντίστοιχα.

5.5.1. Συμπύκνωση με την πρότυπη μέθοδο Proctor

Η δοκιμή έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και του ξηρού μοναδιαίου βάρους του εδάφους, το οποίο συμπυκνώνεται με τη χρήση μεταλλικού κόπανου κυκλικής διατομής διαμέτρου $50,8 \pm 0,127$ mm και βάρους $2,49 \pm 0,01$ kg που πέφτει ελεύθερα από ύψος $304,8 \pm 1,524$ mm πάνω από την ανώτερη επιφάνεια του εδαφικού δοκιμίου (ASTM D698) (ΕΛΟΤ,1986).

Η κυλινδρική μήτρα (διαμέτρου 10,14 cm και ύψους 11,64 cm) με πρόσθετο δακτύλιο συνδέονται σταθερά με την ανεξάρτητη πλάκα βάσης.

Οι συμπυκνώσεις της αργιλομάργας με την πρότυπη μέθοδο Proctor, έγιναν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας. Για κάθε συμπύκνωση, η διαδικασία που ακολουθήθηκε, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D698, έχει ως εξής (Στειακάκης, 2008):

- Το κλάσμα του εδαφικού δείγματος που διέρχεται από το κόσκινο No. 4 (με διάμετρο οπών ίση με 4,75 mm) ξηραίνεται και στη συνέχεια θραύονται τα συσσωματώματά του.
- Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα από το κοσκινισμένο έδαφος (περίπου 3 kg), το οποίο αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού για να υγρανθεί.
- Στη συνέχεια, τοποθετείται σε τρεις ίσες στρώσεις μέσα στη μήτρα για την παρασκευή ενός υλικού συμπυκνωμένου ύψους περίπου 127 mm. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 ομοιόμορφα κατανεμημένους κτύπους με τον κόπανο της συσκευής συμπύκνωσης (βλέπε **Φωτογραφία 5.5.1**).

- Μετά τη συμπίκνωση, το συμπυκνωμένο έδαφος περικόπτεται προσεκτικά μέχρι την κορυφή της μήτρας, ζυγίζεται και υπολογίζεται το υγρό μοναδιαίο βάρος γ_b (kN/m³) του.
- Το δοκίμιο εξάγεται από την μήτρα με κατάλληλο εξολκέα (βλέπε **Φωτογραφία 5.5.2**) και από το κεντρικό του τμήμα λαμβάνεται δείγμα (όχι μικρότερο από 100g) για τον προσδιορισμό της πραγματικής περιεχόμενης υγρασίας του (w). Σημειώνεται ότι η υγρασία αυτή δεν θα πρέπει να διαφέρει σημαντικά από την αρχικά επιδιωκόμενη.



Φωτογραφία 5.5.1: Η συσκευή συμπίκνωσης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.



Φωτογραφία 5.5.2: Ο εξολκέας του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

- Το ξηρό μοναδιαίο βάρος, γ_d (σε kN/m^3) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1 + w} \quad [5.5.1]$$

όπου,

γ_b : υγρό μοναδιαίο βάρος (kN/m^3), και

w : περιεχόμενη υγρασία του δείγματος.

- Προστίθεται στο εδαφικό δείγμα νερό ώστε να αυξηθεί η περιεχόμενη υγρασία του (w) και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για κάθε νέα αύξηση της υγρασίας.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας δίδονται σε διάγραμμα «ξηρού μοναδιαίου βάρους (γ_d) – περιεχόμενης υγρασίας (w)», με τη βοήθεια του οποίου προσδιορίζεται το μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος (γ_{dmax}) και η βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία (w_{opt}).

5.5.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 5.5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπύκνωσης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 5.5.1: Αποτελέσματα δοκιμών συμπύκνωσης, με την πρότυπη μέθοδο Proctor.

Αριθμός δείγματος	1	2	3	4	5
Θεωρητική υγρασία (%)	10	12	15	18	20
Υπολογισμός υγρού μοναδιαίου βάρους					
Μάζα υγρού εδάφους και μήτρας (g)	3.587	3.701	3.767	3.723	3.717
Μάζα μήτρας (g)	1.735	1.735	1.735	1.735	1.735
Καθαρή μάζα υγρού εδάφους (g)	1.852	1.966	2.032	1.988	1.982
Όγκος μήτρας (cm ³)	939,98	939,98	939,98	939,98	939,98
Υγρό μοναδιαίο βάρος, γ_b (kN/m ³)	19,33	20,52	21,21	20,75	20,68
Υπολογισμός ξηρού μοναδιαίου βάρους					
Ξηρό μοναδιαίο βάρος, γ_d (kN/m ³)	17,40	18,16	18,37	17,85	17,55
Ξηρό μον. βάρος σε κατ. μηδενικού αέρα, γ_{zav} (kN/m ³)	21,16	20,28	19,10	18,05	17,40
Υπολογισμός υγρασίας					
Μάζα υποδοχέα και υγρού δείγματος (g)	88,98	61,75	69,15	73,36	61,70
Μάζα υποδοχέα και ξηρού δείγματος (g)	84,87	59,42	65,46	68,76	58,69
Μάζα νερού (g)	41,10	20,30	27,60	32,96	19,87
Μάζα υποδοχέα (g)	47,88	41,45	41,53	40,40	41,83
Μάζα ξηρού δείγματος (g)	36,99	17,97	23,93	28,36	16,86
Περιεχόμενη υγρασία, w (%)	11,11	12,97	15,34	16,22	17,85

Το ξηρό μοναδιαίο βάρος σε «κατάσταση μηδενικού αέρα» μεταξύ των κενών του υλικού (γ_{zav}), βρέθηκε από την εφαρμογή της σχέσης:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + w \cdot G_s} \quad [5.5.2]$$

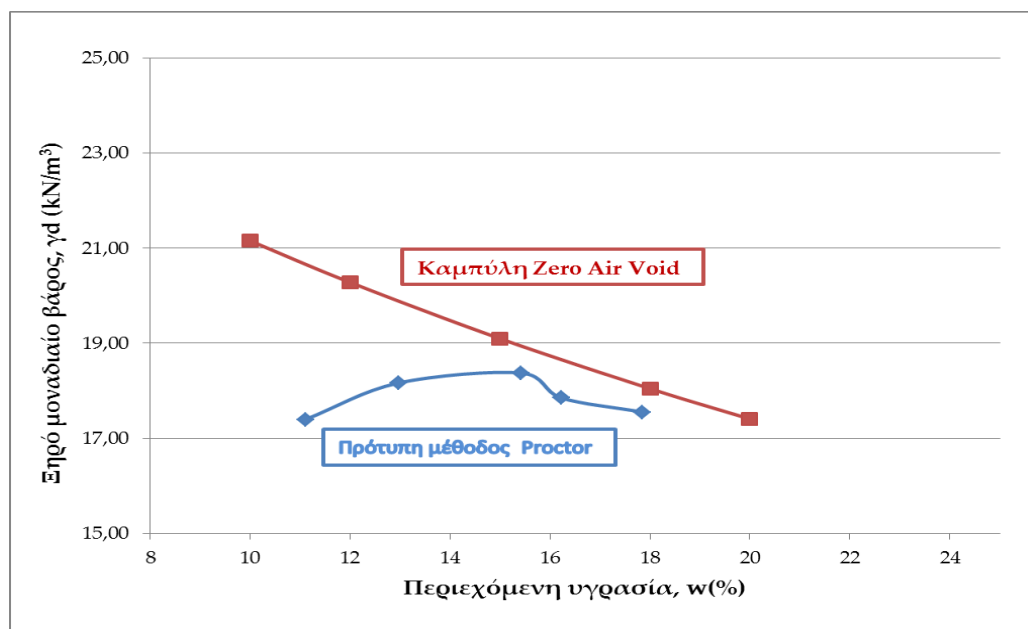
όπου,

G_s : ειδικό βάρος εδαφικών κόκκων, και

γ_w : μοναδιαίο βάρος του νερού (= 9,81 kN/m³).

Το ειδικό βάρος των εδαφικών κόκκων θεωρήθηκε ίσο με 2,7 g/cm³.

Στο **Σχήμα 5.5.2** παρουσιάζεται το διάγραμμα της υγρασίας συμπίκνωσης σε συνάρτηση με το ξηρό μοναδιαίο βάρος, για τα πέντε (5) εδαφικά δείγματα αργιλομάργας που εξετάστηκαν.



Σχήμα 5.5.2: Προσδιορισμός μέγιστου ξηρού μοναδιαίου βάρους και βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης της εξεταζόμενης αργιλομάργας.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η καμπύλη για «κατάσταση μηδενικού αέρα».

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το εδαφικό δείγμα παρουσιάζει μέγιστο μοναδιαίο βάρος $\gamma_{dmax} = 18,37 \text{ kN/m}^3$, για βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης $omc = 15,4\%$.

5.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Η υδροπερατότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) των εδαφών μπορεί να προσδιορισθεί με επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, ενώ η γνώση της είναι απαραίτητη για την μελέτη γεωτεχνικών έργων όπως φράγματα, εδαφικά φίλτρα, τάπητες Χ.Υ.Τ.Α., στραγγιστήρια, κ.α. Η υδροπερατότητα επηρεάζεται και από τον βαθμό συμπίκνωσης του υλικού.

Ωστόσο, ο κρίσιμος παράγοντας για την υδραυλική αγωγιμότητα ενός εδαφικού σχηματισμού, είναι το λεπτόκοκκο κλάσμα που περιέχει. Δηλαδή, η υδροπερατότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρική διαβάθμιση (Στειακάκης, 2008).

Στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την υδροπερατότητα του εδαφικού δείγματος αργιλομάργας, το οποίο συμπυκνώθηκε σε ξηρό μοναδιαίο βάρος (γ_d) ίσο με 95% του μέγιστου ξηρού μοναδιαίου βάρους (γ_{dmax}) (σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D 698) και περιεχόμενη υγρασία (w) 2% πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (omc) κατά Proctor. Δηλαδή, εκτιμήθηκε η υδροπερατότητα της αργιλομάργας με $\gamma_d \approx 17,70 \text{ kN/m}^3$ και $w \approx 17,4\%$.

Για την εκτίμηση αυτή εφαρμόσθηκαν δύο διαφορετικές εργαστηριακές μέθοδοι, στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης:

- α) πίπτοντος φορτίου (falling head method), και
- β) υψηλής πίεσης (high pressure method).

Για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε επίσης ο εμπειρικός τύπος των Charpis – Aubertin, για συγκριτικούς λόγους.

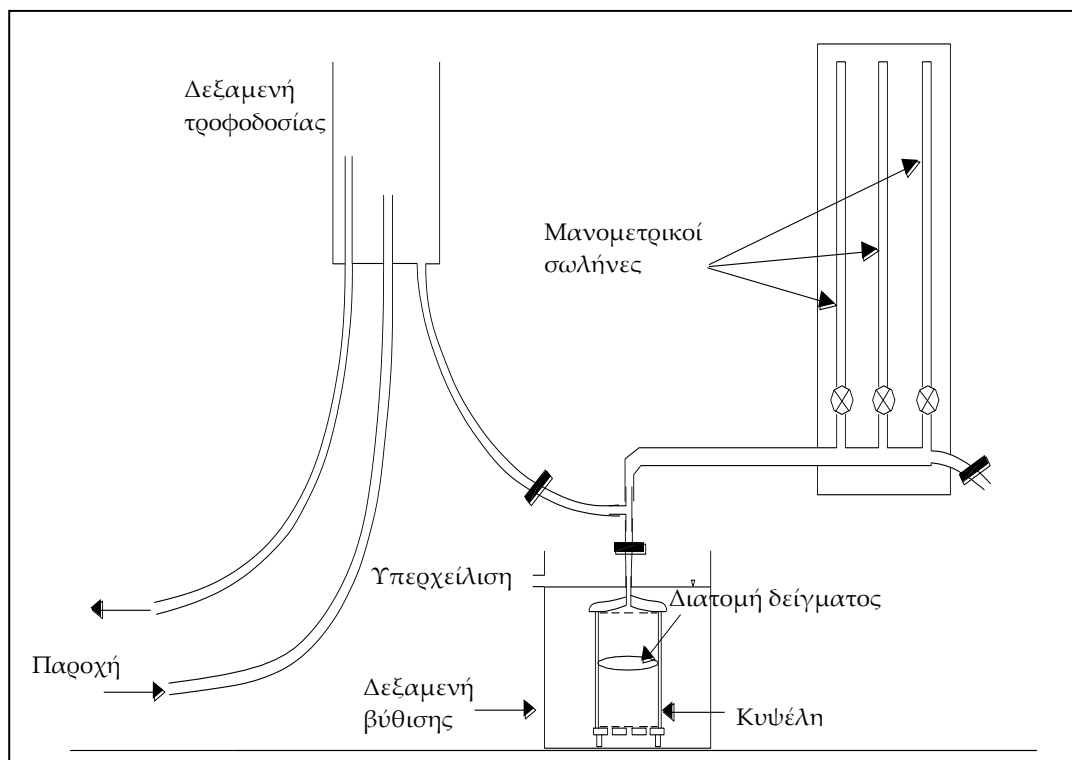
5.6.1. Μετρήσεις με περατόμετρο πίπτοντος φορτίου

Το «περατόμετρο πίπτοντος φορτίου» (falling head permeameter) ή απλά «μεταβλητού φορτίου» (βλέπε **Φωτογραφία 5.6.1**) χρησιμοποιείται για εδάφη χαμηλής έως μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας ($10^{-10} < k \leq 10^{-5}$ m/sec) (Κλειδοπούλου – Βαβαδάκης, 2008).



Φωτογραφία 5.6.1: Το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Η διάταξη της συσκευής φαίνεται αναλυτικά στο **Σχήμα 5.6.1**.



Σχήμα 5.6.1: Διάταξη περατομέτρου πίπτοντος φορτίου (Κλειδοπούλου – Βαβαδάκης, 2008).

Αποτελείται από μια κυψέλη / δειγματολήπτη, στην οποία τοποθετείται το εδαφικό δείγμα, μια δεξαμενή βύθισης της κυψέλης και ένα σύστημα παροχής νερού στο δείγμα που αποτελείται από τρεις μανομετρικούς σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με μία βοηθητική δεξαμενή τροφοδοσίας.

Ανάλογα με την κοκκομετρία του υπό εξέταση εδαφικού υλικού επιλέγεται για χρήση ένας από τους τρεις μανομετρικούς σωλήνες. Όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το εδαφικό δείγμα τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η διάμετρος του μονομετρικού σωλήνα που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Η ροή του νερού διαμέσου του δείγματος περιγράφεται από το Νόμο του Darcy:

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad [5.6.1]$$

όπου,

Q: παροχή (m³/sec),

k: υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού (m/sec),

A: εμβαδόν διατομής της κυψέλης (m²), και

i: υδραυλική βαθμίδα μεταξύ της κορυφής (ένδειξη υδραυλικού φορτίου στο μανόμετρο) και της βάσης (υδραυλικό φορτίο στην υπερχειλίση της δεξαμενής βύθισης) της κυψέλης.

Καθώς ο μανομετρικός σωλήνας είναι και τροφοδότης της κυψέλης με νερό, η στάθμη του νερού μέσα σε αυτόν ταπεινώνεται με την πάροδο του χρόνου, και κατά συνέπεια, η υδραυλική κλίση (i) ελαττώνεται (η στάθμη στην δεξαμενή βύθισης παραμένει σταθερή λόγω υπερχειλιστή).

Με βάση τα παραπάνω και τις κατάλληλες αντικαταστάσεις στη σχέση 5.6.1, προκύπτει:

$$k = 0,02304 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} \quad [5.6.2]$$

όπου,

a: εμβαδό διατομής του μανομετρικού σωλήνα (cm²),

L: ύψος κυψέλης (cm),

A: εμβαδό διατομής της κυψέλης (cm²),

t: χρονικό διάστημα (sec) κατά το οποίο το επίπεδο του νερού κατέρχεται μεταξύ δύο τυχαίων σημείων «1» και «2» του μανομετρικού σωλήνα,

h₁: υδραυλικό φορτίο (cm) στο σημείο «1»,

h₂: υδραυλικό φορτίο (cm) στο σημείο «2», χαμηλότερα του «1», και

h_0 : υδραυλικό φορτίο (cm) στην στάθμη υπερχειλίσης της δεξαμενής βύθισης.

Έτσι, εφόσον είναι γνωστά όλοι οι υπόλοιποι παράμετροι της σχέσης 5.6.2, για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μετράται απλά ο χρόνος (t) που χρειάζεται η στάθμη του νερού να κατέλθει μεταξύ δύο σημείων που σημειώνονται πάνω στον μανομετρικό σωλήνα.

5.6.1. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε (σύμφωνα με την προδιαγραφή **BS 1377-1:1990**), είναι η εξής:

- Αρχικά το εδαφικό δείγμα συμπυκνώνεται σε υγρασία 2% πάνω από την βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης κατά Proctor. Το μέγεθος της μήτρας-κυψέλης που χρησιμοποιήθηκε είναι 100 mm στην εσωτερική διάμετρο και 110 mm στο ύψος.
- Η κυψέλη κλείνει αεροστεγώς, συνδέεται με το κατάλληλο μανόμετρο και πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ενέργειες απαέρωσης με την βοήθεια βαλβίδων.
- Στην συνέχεια, η κυψέλη τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή βύθισης, η οποία γεμίζει με νερό μέχρι το επίπεδο υπερχειλίσης. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην απελευθέρωση τυχόν παγιδευμένου αέρα.
- Ο απαραίτητος κορεσμός (για να ισχύει ο Νόμος Darcy) επιτυγχάνεται με την βοήθεια τριχοειδών δυνάμεων (από κάτω προς τα πάνω). Όταν το νερό εμφανιστεί στην κορυφή της κυψέλης, θεωρείται ότι το δείγμα έχει κορεστεί. Ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση του δείγματος, ο κορεσμός μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως μερικές εβδομάδες.

- Αφού επιτευχθεί κορεσμός, η κυψέλη συνδέεται με τον κατάλληλο μανομετρικό σωλήνα (ο οποίος έχει προπληρωθεί με νερό με την βοήθεια της δεξαμενής τροφοδοσίας, βλέπε Σχήμα 5.6.1) και ανοίγεται η βαλβίδα εισαγωγής νερού από το μανόμετρο προς το δείγμα.
- Καθώς το νερό ρέει προς το δείγμα, μετράται ο χρόνος που χρειάζεται να κατέλθει η στάθμη μεταξύ των σημείων «1» και «2», τα οποία έχουν προσημειωθεί πάνω στο μανόμετρο.

5.6.2. Αποτελέσματα

Η παραπάνω διαδικασία στάθηκε αδύνατο να ολοκληρωθεί επιτυχώς, καθώς ο κορεσμός του δείγματος ήταν υπερβολικά χρονοβόρος (άνω του ενός μηνός).

Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε ότι η υδροπερατότητα του δείγματος είναι πολύ χαμηλή ($k < 10^{-10}$ m/sec), πιθανόν εκτός ορίων εφαρμογής του περατομέτρου πίπτοντος φορτίου, γεγονός που οδήγησε σε περαιτέρω έρευνα της υδραυλικής αγωγιμότητας του δείγματος με το περατόμετρο υψηλής πίεσης.

5.7. Μετρήσεις με περατόμετρο υψηλής πίεσης

Το «περατόμετρο υψηλής πίεσης» (high pressure permeameter) είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί δοκιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, είτε σε δείγματα εξαιρετικά χαμηλής υδροπερατότητας, με την τεχνική του πίπτοντος φορτίου, είτε σε δείγματα μεγαλύτερης υδροπερατότητας με την τεχνική του σταθερού φορτίου.

Η μονάδα που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας περιλαμβάνει μετρητές πίεσης, βαλβίδες και τις απαραίτητες συναρμολογήσεις τους (βλέπε **Φωτογραφία 5.7.1**).



Φωτογραφία 5.7.1: Το περατόμετρο υψηλής πίεσης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Η δεξαμενή τροφοδοσίας είναι περίπου 4" (102 mm) σε διάμετρο και 20" (508 mm) σε ύψος. Στην συσκευή χρησιμοποιείται ένας ευαίσθητος ρυθμιστής πίεσης του νερού για να διατηρείται η πίεση σταθερή στο δείγμα κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων. Η μέγιστη πίεση που μπορεί να εφαρμοστεί είναι 400 kPa, γεγονός που κάνει την συσκευή κατάλληλη για δοκιμές σε δείγματα ημί-βραχου καθώς και αργιλικά δείγματα με πολύ μικρή υδροπερατότητα.

Ο μετρητής πίεσης, η βαλβίδα εκροής του περατομέτρου και η μεγάλης διαμέτρου δεξαμενή, καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας με βάση τον τύπο του Darcy (σχέση 5.6.1) και μετρώντας την παροχή του νερού για καθορισμένη εφαρμοζόμενη υδραυλική κλίση, ως συνέπεια της διαφοράς πίεσης των ενδείξεων των δύο μανομέτρων ($P_1 - P_2$).

Η παραπάνω τεχνική προσομοιάζει την κλασική «μέθοδο σταθερού φορτίου», η οποία και επιλέχθηκε τελικά για το εξεταζόμενο δείγμα. Η επίσης κλασική «μέθοδος πίπτοντος φορτίου» (αυτή που περιγράφηκε στην παρ. 7.1), προσωμοιάζεται με διαδοχικές εφαρμογές της ίδιας διαδικασίας, δηλαδή με σταδιακά μειούμενες σταθερές εφαρμοζόμενες πιέσεις.

Το μέγεθος της κυψέλης / δειγματολήπτη που χρησιμοποιήθηκε είναι 33 mm σε διάμετρο και 77 mm σε ύψος.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί προκειμένου ο δειγματολήπτης να είναι πλήρης με εδαφικό δείγμα και να μην μένει κενός χώρος, προκειμένου να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός αέρα στο σύστημα.

Απαραίτητη επίσης προϋπόθεση για την μέτρηση της υδροπερατότητας είναι ο πλήρης κορεσμός του δείγματος που θα πρέπει να επιβεβαιώνεται πριν την έναρξη των μετρήσεων.

5.7.1. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε (τεχνική σταθερού φορτίου) είναι η εξής (ELE International, 2004):

- Πριν χρησιμοποιηθεί η συσκευή, ελέγχονται οι σωλήνες για τυχόν διαρροές, καθαρίζονται καλά οι πορόλιθοι και γεμίζεται η δεξαμενή με απαερωμένο / απιονισμένο νερό, για να αποτραπεί η διάβρωση στο σύστημα και να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα.
- Το δοκίμιο που διαμορφώθηκε από το δείγμα το οποίο συμπυκνώθηκε στην κατάλληλη υγρασία (2% πάνω από τη βέλτιστη), τοποθετείται

προσεχτικά στην μήτρα. Περιμετρικά του δοκιμίου γίνεται επάλειψη σιλικόνης για την αποφυγή πλευρικών διαρροών.

- Αρχικά εφαρμόζεται μικρή υδραυλική βαθμίδα (πίεση εισόδου 10 – 20 kPa), η οποία δύναται να αυξάνεται σταδιακά, έως ότου το δοκίμιο κορεστεί. Ο κορεσμός του δείγματος ελέγχεται από την εκροή στην έξοδο του δειγματολήπτη. Συγκεκριμένα, θα πρέπει ο όγκος του νερού που ρέει από την έξοδο να είναι τουλάχιστον ίσος με 2ml της μάζας του όγκου κενών του υλικού. Για το συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα αργιλομάργας, ο κορεσμός έγινε σε αρκετά υψηλή πίεση εισόδου (120 kPa) και διήρκησε 7 ημέρες.
- Αφού επιβεβαιωθεί ο κορεσμός, η διαδικασία συνεχίζεται με την εφαρμογή αυξανόμενων τιμών πίεσης (υδραυλικής βαθμίδας) στη είσοδο του δειγματολήπτη και την μέτρηση του όγκου του νερού που ρέει στην έξοδό του, ανά 24 ώρες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόσθηκαν πιέσεις εισόδου ίσες με 150 και 200 kPa. Η τελική υδραυλική κλίση που χρησιμοποιήθηκε έφτασε την τιμή $i = 354$.
- Μετά το πέρας της δοκιμής, το δοκίμιο ζυγίσθηκε, ξηράθηκε και επαναζυγίσθηκε, για τον προσδιορισμό του ξηρού μοναδιαίου βάρους και της φυσικής υγρασίας.

5.7.2. Υπολογισμοί

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (ELE International 2004), η οποίες προκύπτουν από τον Νόμο Darcy (σχέση 5.6.1):

$$k = \frac{v \cdot L}{H} \quad [5.7.1]$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H} \quad [5.7.2]$$

όπου,

k: υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού (cm/sec),

v: ταχύτητα ροής (cm/sec),

Q: παροχή στην έξοδο (cm³/sec),

L: μήκος δοκιμίου (cm),

H: εφαρμόζόμενο υδραυλικό φορτίο (cm), και

A: εμβαδόν διατομής δοκιμίου (cm²).

Το H (cm) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = \frac{70,31 \cdot (P_1 - P_2)}{h} \quad [5.7.3]$$

όπου,

P₁: πίεση (kPa) στην είσοδο του νερού στον δειγματολήπτη,

P₂: πίεση (kPa) στην έξοδο του νερού στον δειγματολήπτη, και

h: υδραυλικό φορτίο (cm) στον μανομετρικό σωλήνα στην είσοδο του νερού στον δειγματολήπτη (υψομετρική διαφορά από το επίπεδο εισόδου του νερού στον δειγματολήπτη).

Σημειώνεται ότι η τιμή υδροπερατότητας (υδραυλική αγωγιμότητα, k) διορθώνεται στην θερμοκρασία των 20°C, με βάση την μετρούμενη θερμοκρασία.

5.7.3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο περατόμετρο υψηλού φορτίου, όπως και όλοι οι επιμέρους υπολογισμοί, δίνονται στους **Πίνακες 5.7.1 και 5.7.2**.

Πίνακας 5.7.1: Αποτελέσματα μετρήσεων πριν και μετά την δοκιμή περατομέτρου υψηλής πίεσης.

Μετρήσεις υγρασίας				
	Πριν τη δοκιμή		Μετά τη δοκιμή	
Υποδοχέας (g)	42,88		41,83	
Βάρος υγρού εδάφους + υποδοχέας (g)	70,20		71,08	
Βάρος ξηρού εδάφους + υποδοχέας (g)	67,79		66,90	
Βάρος υγρού εδάφους (g)	27,32		29,25	
Βάρος ξηρού εδάφους (g)	24,91		25,07	
Ποσοστό υγρασίας w _i , w _f (%)	9,67		16,67	
Μετρήσεις δοκιμίου				
	Σύμβολο	Μονάδες	Τύπος	Τιμή
Διάμετρος μήτρας	D _o	mm		31,20
Ύψος μήτρας		mm		68,20
Ύψος πορολίθου		mm		5,77
Ύψος δοκιμίου	H _o	mm		62,43
Εμβαδόν διατομής δοκιμίου	A _o	mm ²	$= \frac{\pi \times D_o^2}{4}$	764,54
Όγκος δοκιμίου	V _o	mm ³	$= A_o \times H_o$	47727,05
Βάρος μήτρας		g		123,15
Βάρος πορολίθου		g		22,19
Βάρος μήτρας + υγρό δοκίμιο πριν τη δοκιμή + πορολίθος		g		253,43
Βάρος μήτρας + υγρό δοκίμιο μετά τη δοκιμή + πορολίθος		g		258,26
Αρχικό βάρος υγρού δοκιμίου	W _o	g		108,09
Αρχικό βάρος ξηρού δοκιμίου	W _d	g	$= \frac{W_o}{1 + w}$	98,55
Αρχική υγρή πυκνότητα δοκιμίου	ρ _b	Mg/m ³	$= \frac{W_o \times 10^3}{V_o}$	2,26
Αρχικό υγρό μοναδιαίο βάρος	γ _b	kN/m ³	$= \rho_b \times g$	22,22
Αρχική ξηρή πυκνότητα δοκιμίου	ρ _d	Mg/m ³	$= \frac{W_d \times 10^3}{V_o}$	2,06
Αρχικό ξηρό μοναδιαίο βάρος	γ _d	kN/m ³	$= \rho_d \times g$	20,26
Ειδικό βάρος εδαφικών κόκκων	G _s			2,65
Μοναδιαίο βάρος νερού	γ _w	kN/m ³		9,81
Αρχικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	e _o		$= \frac{G_s \times (1 + w)}{\rho_b} - 1$	0,28
Αρχικός βαθμός κορεσμού	S _o	%	$= \frac{\rho_b \times w \times G_s}{G_s \times (1 + w) - \rho_b}$	90,50
Αρχικό πορώδες	n _o	%	$= \frac{e_o}{1 + e_o}$	22,08
Τελικό βάρος υγρού δοκιμίου	W _f	g		112,92
Τελικό βάρος ξηρού δοκιμίου	W _{df}	g	$= \frac{W_f}{1 + w_f}$	96,78
Τελική υγρή πυκνότητα δοκιμίου	ρ _{bf}	Mg/m ³	$= \frac{W_f \times 10^3}{V_o}$	2,37
Τελικό υγρό μοναδιαίο βάρος	γ _{bf}	kN/m ³	$= \rho_{bf} \times g$	23,21
Τελικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	e _f		$= \frac{G_s \times (1 + w_f)}{\rho_{bf}} - 1$	0,31
Τελικός βαθμός κορεσμού (%)	S _f	%	$= \frac{w_f \times G_s}{e_f}$	144,01
Τελικό πορώδες	n _f	%	$= \frac{e_f}{1 + e_f}$	23,48

Πίνακας 5.7.2: Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής περατομέτρου υψηλής πίεσης.

Έναρξη μέτρησης	Λήξη μέτρησης	Διελθών χρόνος t		Ένδειξη ογκομετρικής στήλης		Ύψος στήλης νερού (cm)		Πίεση (kPa)		Όγκος εκροής V _{out} (ml)	Θερμοκρασία T (°C)	Υδραυλικό φορτίο H (cm H ₂ O)	Υδραυλική κλίση i	Παροχή Q (cm ³ /s)	Ταχύτητα ροής v (m/s)		Διαπερατότητα k (m/s)	
		(h:m:s)	(sec)	(πριν την εφαρμ. πίεσης)	(μετά την εφαρμ. πίεσης)	h ₁ (πριν την εφαρμ. πίεσης)	h ₂ (μετά την εφαρμ. πίεσης)	(εισόδου P _{in})	(εξόδου P _{out})						(στους T°C)	(στους 20°C)	(στους T°C)	(στους 20°C)
20/10/10 (12:45)	27/10/10 (12:47)	168:02:00	604920	5,40	5,30	1,90	1,80	200	0	3,50	25,5	2041,85	327,08	5,79E-06	7,57E-09	6,57E-09	2,31E-11	2,01E-11
27/10/10 (12:47)	02/11/10 (12:55)	144:08:00	518880	5,30	5,20	1,80	1,70	200	0	5,50	22,8	2041,75	327,07	1,06E-05	1,39E-08	1,29E-08	4,24E-11	3,94E-11

Με βάση το πίνακα 5.7.2 προκύπτει ότι η υδροπερατότητα είναι ίση με $k = 2,01 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$. Πραγματοποιήθηκαν 2 μετρήσεις για πιο ακριβή αποτελέσματα.

5.8. Εκτίμηση υδροπερατότητας από εμπειρικούς τύπους

Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι εκτίμησης της υδροπερατότητας από εμπειρικούς τύπους, βασισμένους στα χαρακτηριστικά της κοκκομετρικής διαβάθμισης, ώστε να ξεπεραστούν τα εργαστηριακά προβλήματα απόκτησης αντιπροσωπευτικών δειγμάτων και, πολύ συχνά, των μεγάλων χρόνων δοκιμής.

Υπάρχουν πολυάριθμοι τύποι που έχουν προκύψει βάσει πειραματικών μετρήσεων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, εφαρμόζοντας τους τύπους αυτούς, εξαρτάται από τη φύση του υλικού του οποίου ερευνάται η υδραυλική αγωγιμότητα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Kozeny - Carman, η οποία είναι η εξής (Chapuis, P.R. – Aubertin, M. (2003)):

$$\log k_{pr} = A + \log \frac{e^3}{Gs^2 \cdot S^2 \cdot (1+e)} \quad [5.8.1]$$

όπου,

k_{pr} : εκτιμώμενη υδραυλική αγωγιμότητα (m/sec),

A: συντελεστής που κυμαίνεται μεταξύ 0,29 – 0,51, ίσος με 0,5 για το εξεταζόμενο υλικό (Carman, 1939),

e: λόγος κενών (υπολογίζεται από τύπο, βλέπε Πίνακα 5.7.1) (=0,50)

Gs: ειδικό βάρος εδαφικών κόκκων (= 2,7) και

S: ειδική επιφάνεια των κόκκων (m^2/g) ($=15,24 \text{ m}^2/\text{g}$).

Προκειμένου λοιπόν να εφαρμοσθεί ο παραπάνω εμπειρικός τύπος, ήταν αναγκαίος ο προσδιορισμός της ειδικής επιφάνειας των κόκκων (S), όπως και έγινε.

5.8.1. Προσδιορισμός ειδικής επιφάνειας

Ο προσδιορισμός της ειδικής επιφάνειας των εδαφικών κόκκων έγινε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ισόθερμης προσρόφησης αζώτου (BET), από την οποία υπολογίζεται η ποσότητα του αζώτου για την πλήρη κάλυψη της επιφάνειας με μονομοριακό στρώμα, χρησιμοποιώντας συσκευή τύπου NOVA 2200 (Gas Sorption Analyser) της εταιρείας Quantachrome (βλέπε **Φωτογραφία 5.8**).



Φωτογραφία 5.8: Η συσκευή προσδιορισμού της ειδικής επιφάνειας των κόκκων του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού.

Για το δείγμα που εξετάσθηκε με την μέθοδο BET, βρέθηκε ειδική επιφάνεια εδαφικών κόκκων $S = 15,24 \text{ m}^2/\text{g}$.

5.8.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα

Για την θεωρούμενη συμπύκνωση του υλικού σε υγρασία 2% πάνω από την βέλτιστη ($w_{mc} = 15,4\%$), ο λόγος κενών υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w \cdot (1 + w)}{\gamma_b} - 1 = 0,50$$

[5.8.

2]

όπου,

γ_w : μοναδιαίο βάρος του νερού ($= 9,81 \text{ kN/m}^3$),

w : περιεχόμενη υγρασία της συμπυκνωμένης αργιλομάργας ($= 17,4\%$), και

γ_b : υγρό μοναδιαίο βάρος της συμπυκνωμένης αργιλομάργας ($= 20,77 \text{ kN/m}^3$, σύμφωνα με την σχέση 5.5.1 του κεφ. 5.5 και για $\gamma_d = 17,70 \text{ kN/m}^3$).

Έτσι, αντικαθιστώντας στην σχέση Kozeny - Carman (σχέση 5.8.1), $e = 0,5$ και $S = 15,24 \text{ m}^2/\text{g}$, η υδροπερατότητα εκτιμήθηκε ίση με $k = 1,55 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$.

Η τιμή αυτή είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτή που υπολογίσθηκε πειραματικά (περατόμετρο υψηλού φορτίου, βλέπε παρ. 5.7.1).

5.9. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Κατά τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη προσδιορίζεται η αντοχή σε θλίψη (q_u) ενός κυλινδρικού εδαφικού δοκιμίου, στο οποίο εφαρμόζονται θλιπτικές τάσεις χωρίς καμιά πλευρική υποστήριξη.

Με τον προσδιορισμό της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (q_u) είναι δυνατόν να εκτιμηθούν απλά και γρήγορα:

- α) Η διατμητική αντοχή (τ) και οι εδαφοτεχνικές παράμετροι (c , ϕ) του υλικού.
- β) Η ευαισθησία αργιλικών εδαφών.
- γ) Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του δείγματος.

Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης είναι μια δοκιμή σε συνθήκες φυσικής υγρασίας (συντά καλείται U-test). Εφαρμόζεται μόνο σε συνεκτικά εδάφη, αφού το μη συνεκτικό έδαφος δεν είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί σε κυλινδρικό δοκίμιο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθεί σε ετερογενή εδάφη, επειδή η απουσία πλευρικής υποστήριξης κατά τη δοκιμή είναι μία απότομη οριακή συνθήκη (Στειακάκης, 2008).

Όμως, πλεονεκτεί έναντι της δοκιμής άμεσης διάτμησης, εξαιτίας των πλέον ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων που εφαρμόζονται στο δοκίμιο.

Επίσης, η επιφάνεια θραύσης τείνει να εμφανισθεί στην ασθενέστερη ζώνη του δοκιμίου, σε αντίθεση με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης, όπου το δοκίμιο εξαναγκάζεται σε θραύση κατά μια επιφάνεια προκαθορισμένη, η οποία δεν είναι απαραίτητα και η ασθενέστερη (Στειακάκης, 2008).

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (q_u) μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ καλό δείκτη για την περιγραφή και διερεύνηση της συμπεριφοράς της εδαφικής μάζας και εξαρτάται, όχι μόνο από τον τύπο εδάφους, αλλά και από τη σύνθεση της εδαφικής μάζας (π.χ. περιεκτικότητα σε νερό).

Στον **Πίνακα 5.9.1** δίνονται τυπικές τιμές αντοχής αργίλων σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Πίνακας 5.9.1: Τυπικές τιμές q_u για αργίλους (Στειακάκης, 2008).

Αργίλος	q_u (kg/cm ²)
Πολύ χαλαρή	0,25
Χαλαρή	0,25 – 0,50
Μέση	0,50 – 1,00
Συμπαγής	1,00 – 2,00
Πολύ συμπαγής	2,00 – 4,00
Σκληρή	> 4,00

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε τέσσερα (4) δοκίμια. Οι δοκιμές αυτές έγιναν στην συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης της εταιρείας ELE (**Φωτογραφία 5.9.1**) του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.



***Φωτογραφία 5.9.1: Η συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης του Εργαστηρίου
Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.***

Επίσης, η καταγραφή των μετρήσεων έγινε με το αυτόματο καταγραφικό σύστημα MPX3000 (μέσω Η/Υ) του εργαστηρίου.

5.9.1. Πειραματική διαδικασία

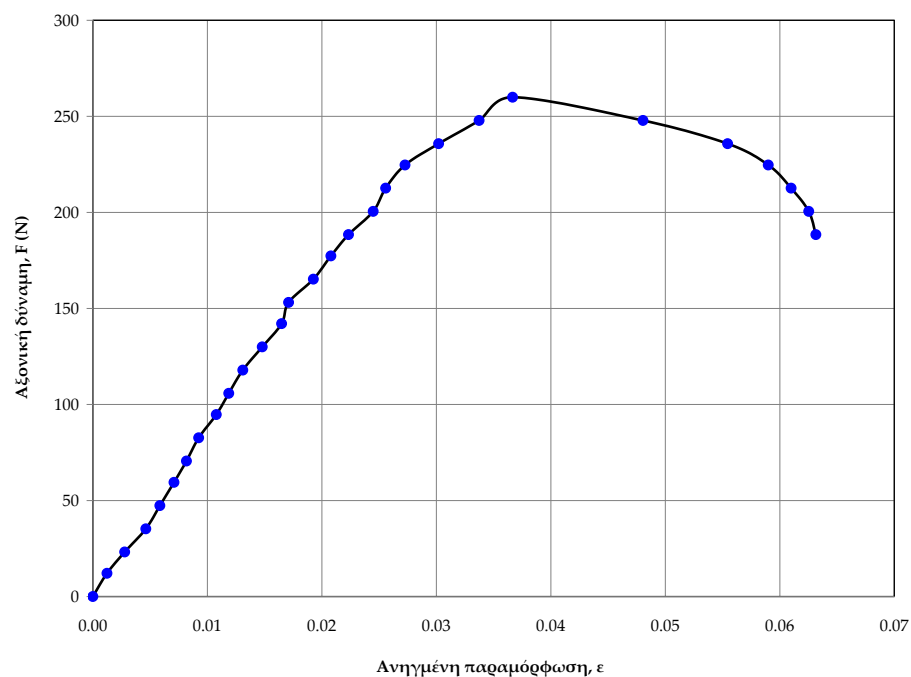
Κάθε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης έγινε με την εξής διαδικασία:

- Διαμορφώνεται κυλινδρικό δοκίμιο με ονομαστική διάμετρο 38 mm και ύψος 76 mm ανά εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε (κατά Proctor) με υγρασία 2% πάνω από την βέλτιστη ($w_{mc} = 15,4\%$).
- Μετρώνται οι διαστάσεις του δοκιμίου με ακρίβεια 0,1 mm και ζυγίζεται με ακρίβεια 0,1 g.

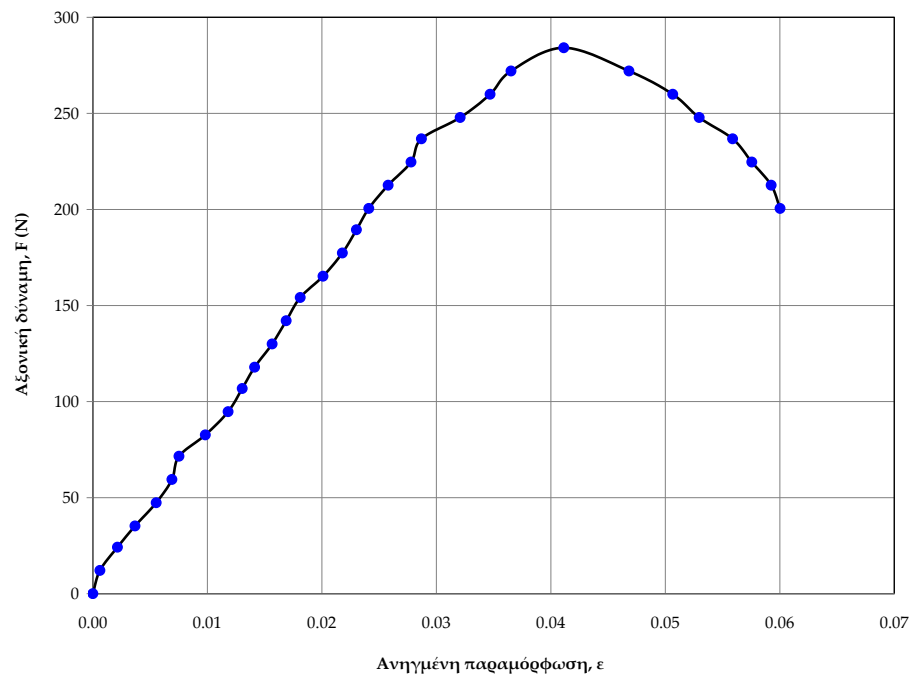
- Το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή, έτσι ώστε ο κατακόρυφος άξονας του να διέρχεται διαμέσου των κέντρων των πλακών φόρτισης. Οι πλάκες φόρτισης μετακινούνται, έτσι ώστε η πάνω επιφάνεια του δοκιμίου μόλις να εφάπτεται με την πάνω πλάκα.
- Προσαρμόζεται δύο (2) μηχανοσκόπετρα, συνδεδεμένα με το αυτόματο καταγραφικό σύστημα, για την μέτρηση α) της αξονικής παραμόρφωσης, και β) της παραμόρφωσης του δυναμομετρικού δακτυλίου που μετράει την αξονική δύναμη. Τα μηχανοσκόπετρα αυτά ρυθμίζονται, έτσι ώστε να έχουν μηδενική αρχική ένδειξη.
- Ορίζεται η ταχύτητα φόρτισης, έτσι ώστε η παραμόρφωση που θα επιτυγχάνεται ανά λεπτό να είναι της τάξης των 0,5% έως 2% του ύψους του δοκιμίου. Επειδή ο χρόνος που απαιτείται για την θραύση του δοκιμίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 min, και δεδομένου ότι ο λόγος ύψους προς την διάμετρο του δοκιμίου είναι 2:1, χρησιμοποιείται διαφορετική ταχύτητα φόρτισης, ανάλογα με την διάμετρο του δοκιμίου. Τα συγκεκριμένα δοκίμια διαμέτρου 38 mm, φορτίστηκαν στην συσκευή μονοαξονικής θλίψης με ταχύτητα φόρτισης ίση με 1,5 mm/min.
- Στη συνέχεια, περιστρέφεται ο μοχλός φόρτισης με την επιλεγμένη ταχύτητα και απλά καταγράφονται οι ενδείξεις αξονικής παραμόρφωσης και αξονικής δύναμης μέσω Η/Υ.
- Μετά την θραύση, το δοκίμιο ζυγίζεται ξανά και τοποθετείται στο ξηραντήριο με σκοπό τον προσδιορισμό της υγρασίας.

5.9.2. Αποτελέσματα

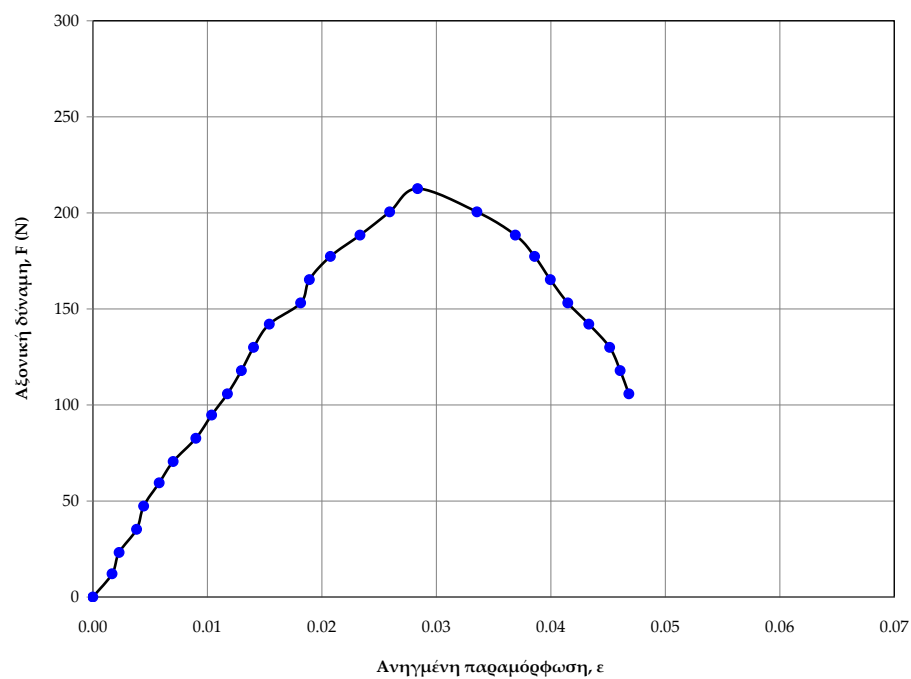
Επίσης, στα Σχήματα 5.9.1 έως και 5.9.4 παρίστανται οι καμπύλες «ανηγμένης παραμόρφωσης – αξονικής δύναμης», για τις αντίστοιχες τέσσερεις δοκιμές.



Σχήμα 5.9.1: Καμπύλη «ανηγμένης παραμόρφωσης – αξονικής δύναμης» δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 1).



Σχήμα 5.9.2: Καμπύλη «ανηγμένης παραμόρφωσης – αξονικής δύναμης» δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 2).



Σχήμα 5.9.3: Καμπύλη «ανηγμένης παραμόρφωσης – αξονικής δύναμης» δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 3).

Στον Πίνακα 5.9.2 δίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής στο σημείο θραύσης.

Πίνακας 5.9.2: Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, στο σημείο θραύσης.

Δοκιμή	F _{max} (N)	ε	σ _{max} (kN/m ²)	c (kN/m ²)
1	260	0,037	229	115
2	284	0,041	238	119
3	213	0,028	189	95
M.O.	252	0,024	219	110

Τελικά, από τον μέσο όρο των μέγιστων αξονικών τάσεων (σ_{max}), προκύπτει ότι η εξεταζόμενη αργιλομάργα έχει **q_u = 219 kN/m²** και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.9.1 χαρακτηρίζεται ως «πολύ συμπαγής» (q_u ≈ 2,1 kg/cm²).

Επίσης, η συνοχή της (c), φτάνει τα 110 kN/m², αν θεωρηθεί μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής (φ = 0) και σύμφωνα με τη σχέση:

$$c = \frac{q_u}{2} \quad [5.9.1]$$

5.10 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Με την δοκιμή συμπίεστότητας προσδιορίζονται οι παράμετροι συμπίεστότητας, σε εδαφικά δείγματα πλευρικά περιορισμένα που φορτίζονται αξονικά.

Η διαδικασία φόρτισης οδηγεί στη βαθμιαία μείωση του όγκου του εδάφους με την πάροδο του χρόνου.

Η δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης προβλέπει το ρυθμό και το μέγεθος καθίζησης των κατασκευών επί αργιλικών εδαφών. Γίνεται με οιδήμετρο που επιτρέπει τον κορεσμό του δοκιμίου, την επιβολή ενός κατακόρυφου φορτίου και την μέτρηση της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου.

Η συσκευή οιδημέτρου του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (βλέπε **Φωτογραφία 5.10.1**), αποτελείται από ένα ζυγό φόρτισης για την εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων στο δοκίμιο, ένα μηκυνσιόμετρο για τη μέτρηση της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου κατά τη στερεοποίηση, μια κυψέλη νερού για να εξασφαλιστεί ο πλήρης κορεσμός και τη συσκευή στερεοποίησης, μέσα στην οποία το δοκίμιο συγκρατείται σε δακτύλιο με πορόλιθους στην άνω και κάτω επιφάνειά του. Ο δακτύλιος εμποδίζει τις πλευρικές παραμορφώσεις, δημιουργεί συνθήκες Κ₀ και εμποδίζει την πλευρική αποστράγγιση, εξασφαλίζοντας έτσι συνθήκες μονοδιάστατης στερεοποίησης (Στειακάκης, 2008).



Φωτογραφία 5.10.1: Τα οιδήμετρα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι κυλινδρικά με 51 mm διάμετρο και 20 mm ύψος.

5.10.1.Πειραματική διαδικασία

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) δοκιμές σε ένα (1) εδαφικό δείγμα της εξεταζόμενης αργιλομάργας, με διαδικασία διαφορετική από την συνηθισμένη, καθώς ενδιέφερε η συμπίεση του δοκιμίου κάτω από διάφορα φορτία και η επίδραση του νερού κάτω από το τελικό μέγιστο φορτίο του (192,09 kPa).

Με βάση την παραπάνω απαίτηση, έγιναν καταρχήν τρεις δοκιμές φόρτισης με φορτία 10, 20 και 40 kg, κατά τις οποίες η κυψέλη του οιδημέτρου δεν πληρώθηκε με νερό. Στη συνέχεια, και μετά το πέρας της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου με την μέγιστη επιλεγμένη ορθή τάση

(φορτίο 192,09 kPa), το δοκίμιο επαναφορτίστηκε με γεμάτη την κυψέλη του οιδημέτρου με νερό.

Αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

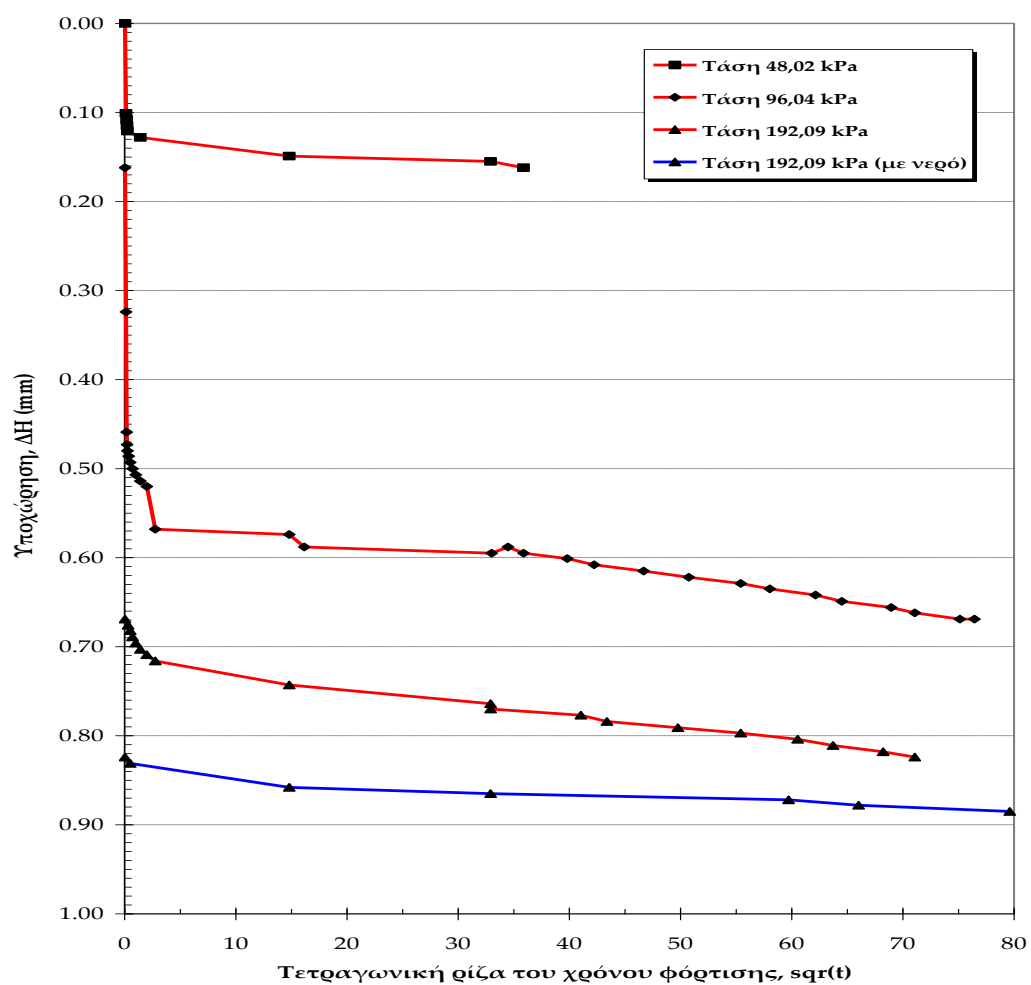
- Οι πορόλιθοι υγραίνονται (με βραστό νερό), ώστε να μην απορροφούν νερό από το δοκίμιο, ούτε να αποδίδουν νερό σε αυτό.
- Το δοκίμιο συγκρατείται στο δακτύλιο μέσα στην κυψέλη και, μέσω ενός αναρτήρα φορτίων και ενός συστήματος μοχλών με λόγο φορτίου 10:1, φορτίζεται αξονικά με φορτία που διπλασιάζονται σε κάθε στάδιο φόρτισης (10, 20 και 40 kg), διατηρώντας την ορθή τάση σταθερή για διάστημα 24 ωρών.
- Πριν από την εφαρμογή της επόμενης βαθμίδας φόρτισης καταγράφεται η μεταβολή του πάχους του δοκιμίου μέσω του ηλεκτρονικού μηκυνσιομέτρου. Η καταγραφή των ενδείξεων συμπίεσης γίνεται μέσω του αυτόματου καταγραφικού συστήματος του εργαστηρίου, σε Η/Υ, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου.
- Μετά την φόρτιση με την μέγιστη κατακόρυφη τάση (φορτίο 40 kg), προστίθεται νερό στην κυψέλη και καταγράφεται νέα υποχώρηση με την επίδραση του νερού.
- Τελικά, το δοκίμιο ζυγίζεται, ξηραίνεται και επαναζυγίζεται για τον προσδιορισμό του ξηρού μοναδιαίου βάρους και της φυσικής υγρασίας του.

5.10.2.Υπολογισμοί – Αποτελέσματα

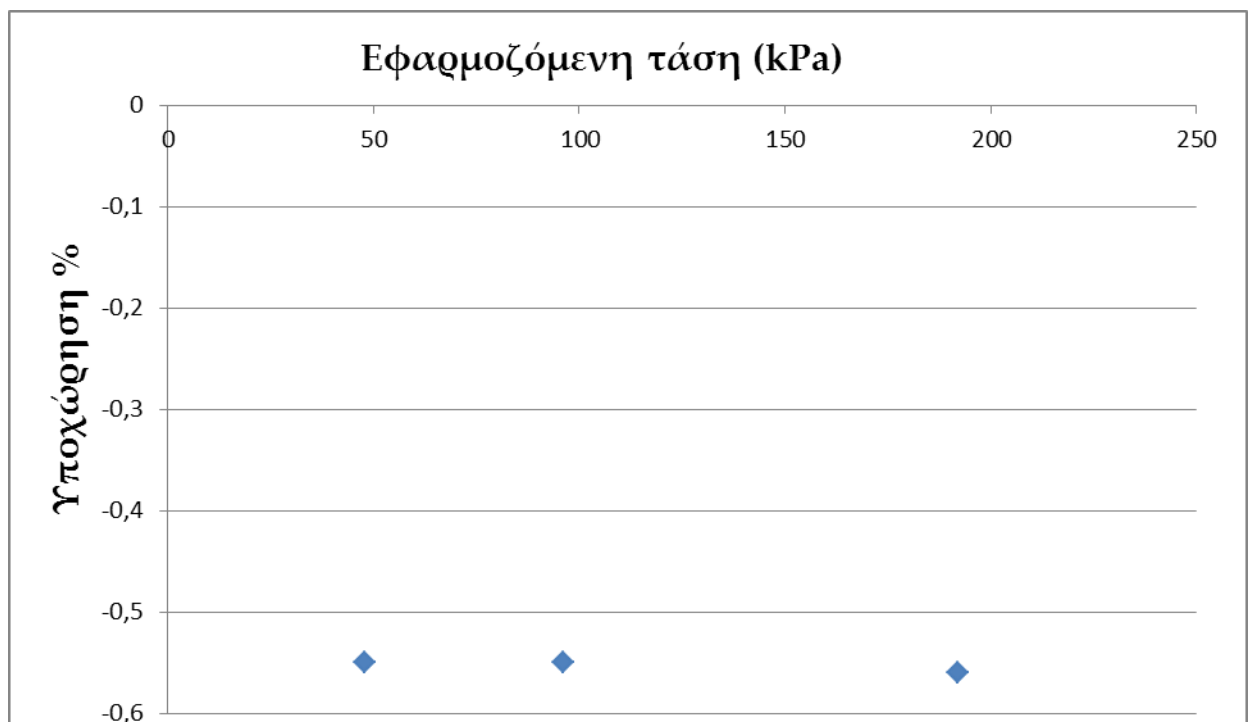
Στον **Πίνακα 5.10.1** που βρίσκεται στο παράρτημα δίνονται οι βοηθητικοί υπολογισμοί που έγιναν πριν και μετά τις δοκιμές συμπίεστότητας.

Στους **Πίνακες 1** έως και **4** (που βρίσκονται στο παράρτημα) δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεστότητας που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Με βάση τους παραπάνω πίνακες, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα «τετραγωνική ρίζα του χρόνου φόρτισης – υποχώρηση» (**Σχήμα 5.10.1**) και «εφαρμοζόμενη ορθή τάση (σε λογαριθμική κλίμακα) – λόγος κενών» (**Σχήμα 5.10.2**), για τις τέσσερις δοκιμές συμπίεστότητας.



Σχήμα 5.10.1: Καμπύλες «τετραγωνικής ρίζας του χρόνου φόρτισης – υποχώρησης» δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεστότητας.



Σχήμα 5.10.2: Διάγραμμα «εφαρμοζόμενης ορθής τάσης – υποχώρησης» δοκιμών μονοδιάστατης συμπιεστότητας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα, στο γεωυλικό μας παρατηρείται ίδια “υποχώρηση” (-0,5%) σε υγρασία +2% πλέον της βέλτιστης (17,4%), σε κάθε εφαρμοζόμενη τάση (48.02, 96.04, 192.09). Με τον όρο “υποχώρηση” εννοούμε την απότομη μείωση του όγκου κατά τον κορεσμό ($\Delta H/H_0$).

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται για σύγκριση και οι απαιτούμενες προδιαγραφές.

Πίνακας 6.1: Συνοπτικά αποτελέσματα και αποδεκτές τιμές όλων των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Παράμετρος / Ιδιότητα	Αποτελέσματα	Αποδεκτές τιμές (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006)
Ορυκτολογική σύσταση	Χαλαζίας: 29,0% Κλινόχλωρο: 22,5% Ασβεστίτης: 19,2% Μοσχοβίτης: 12,5% Αλβίτης: 10,7% Δολομίτης: 6,0%	
Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου	25,39%	< 40%
Ποσοστό οργανικού άνθρακα (TOC)	0,43%	< 10%
Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC)	20,76 meq / 100g	
Κοκκομετρική διαβάθμιση	Αργίλος: 26,8% Ιλύς: 14,45% Λεπτή άμμος: 14,45% Μέση άμμος: 26,21% Χονδρή άμμος: 0,30%	
Περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα ($d < 2 \mu m$)	13,5%	> 15%, κατά βάρος
Μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων	5 mm	32 mm
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα	40,95%	< 60% του ολικού όγκου
Συντελεστής κυρτότητας (Cc)	0,45	
Συντελεστής ομοιομορφίας (Cu)	80	
Όριο Υδαρότητας (LL)	31,4	< 40%
Όριο Πλαστικότητας (PL)	14,03	5-15%

Όριο συρρίκνωσης (SL)	4,8	
Δείκτης Πλαστικότητας(PI)	17,37	
Ένεργότητα	1,28	
Διόγκωση	53,75%	
Βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (omc)	14,5%	
Μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος (γ_{dmax})	22 kN/m ³	
Υδραυλική αγωγιμότητα (K)	2,01×10 ⁻¹¹ m/sec	< 10 ⁻⁹ m/sec
Ειδική επιφάνεια εδαφικών κόκκων (S)	15,24 m ² /g	
Αντοχή σε μονοαξονική θλιψη (q_u)	206 kN/m ²	
Συνοχή (c)	103 kN/m ²	

Με βάση τις ορυκτολογικές αναλύσεις, το γεωυλικό συνιστάται από: Χαλαζία (29,0%), Κλινόχλωρο (22,5%), Ασβεστίτη (19,2%), Μοσχοβίτη (12,5%), Αλβίτη (10,7%) και Δολομίτη (6,0%)

Το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου προσδιορίστηκε ίσο με 25,4% και ικανοποιεί τις προσωρινές προδιαγραφές (ΥΠΕΧΩΔΕ,2006) (<40%).

Επιπλέον, το ποσοστό του οργανικού άνθρακα είναι 0,43% και ικανοποιεί τις τιμές των προαναφερόμενων προδιαγραφών που θέτουν σαν απαίτηση να είναι <10%.

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων σύμφωνα με εμπειρικό τύπο (Breeuwsame,et al. 1984) προσδιορίστηκε ίση με 20,76 meq / 100g

Σύμφωνα με την κοκκομετρική διαβάθμιση το γεωυλικό συνίσταται από: Άργιλο (26,8%), Ιλύ (14,4%), Λεπτόκοκκοι άμμο (14,4%), Μεσόκοκκοι άμμο (26,2%), Χονδρόκοκκοι άμμο (0,3%) και χαρακτηρίζεται ως “αργιλομάργα”.

Με βάση την καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης ο συντελεστής κυρτότητας (Cc) προσδιορίσθηκε ίσος με 0,45, και το γεωυλικό μας χαρακτηρίζεται ως “πτωχής κοκκομετρικής διαβάθμισης”, ενώ ο συντελεστής ομοιομορφίας (Cu) είναι 80, τιμή που το χαρακτηρίζει ως “ετερόμορφο”.

Η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα είναι 13,5% ενώ βάσει των προσωρινών τεχνικών προδιαγραφών (ΥΠΕΧΩΔΕ,2006) έπρεπε να είναι >15%.

Η μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων είναι 5mm και η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα είναι 40,9%.

Η αργιλομάργα περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος (59,04%) διερχόμενο από το κόσκινο No.200 ($d < 0,075 \text{ mm}$). Όταν συμπυκνωθεί με κατάλληλη υγρασία (+2% πλέον της omc) αποκτά πολύ μικρή διαπερατότητα της τάξης των $2,01 \cdot 10^{-11} \text{ m/sec}$ και λειτουργεί ως πολύ καλή στεγανωτική στρώση.

Το όριο υδαρότητας (LL) είναι 31,4%, το όριο πλαστικότητας (PL) 14,0%, το όριο συρρίκνωσης είναι 4,8% και ο δείκτης πλαστικότητας (PI) 17,4% .

Με βάση το δείκτη πλαστικότητας που είναι 17,4% και το όριο υδαρότητας 31,0%, το γεωυλικό χαρακτηρίζεται ως **CL <<Αργίλος χαμηλής πλαστικότητας>>** σύμφωνα με το USCS.

Η ενεργότητα του γεωυλικού προσδιορίσθηκε ίση με 1,28 και χαρακτηρίζεται ως <<οριακά μη ενεργό>> υλικό.

Η ειδική επιφάνεια εδαφικών κόκκων (S) είναι 15,24 m²/g.

Η βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (omc) προσδιορίστηκε 15,4% με μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος (γ_{dmax}) 18,37 kN/m³.

Η υδραυλική αγωγιμότητα της αργιλομάργας που προσδιορίστηκε με το περατόμετρο υψηλού φορτίου σε υλικό συμπυκνωμένο +2% πλέον της omc που η περατότητα προσδιορίστηκε ίση με $2,01 \cdot 10^{-11}$ m/sec. Το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας επιβεβαιώνεται με τον εμπειρικό τύπο Kozeny - Carman (Chapuis, P.R. – Aubertin, M. (2003)) η οποία εκτιμήθηκε ίση με $1,55 \cdot 10^{-11}$ m/sec .

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (q_u) σε υγρασία +2% πλέον της omc μετρήθηκε ίση με 219 KN/m².

Τέλος από την δοκιμή συμπιεστότητας που πραγματοποιήθηκε σε δείγμα που είχε συμπυκνωθεί με την πρότυπη μέθοδο Proctor και υγρασία +2% της βέλτιστης προέκυψε ότι η υποχώρηση του γεωλικού είναι 0,5% σε όλα τα στάδια φόρτισης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης ο γεωλογικός σχηματισμός της αργιλομάργας που διερευνήθηκε είναι κατάλληλος για χρήση του ως στεγανωτική στρώση πυθμένα/κάλυμμα αποδεκτών μη επικίνδυνων αποβλήτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM D422. "Standard test methods for particle-size analysis of soils". Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.
- ASTM D698. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))". Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.
- ASTM D4318. "Standard test methods for liquid limit, plasticity limit, and plasticity index of soils". Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.
- ASTM D4373-84. "Standard test methods for calcium carbonate content in soils". Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.
- ASTM 2487-00. "Standard classifications of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)".
- BS 1377-1:1990. "Methods of test for soils for civil engineering purposes. General requirements and sample preparation". British Standards Institution.
- Carman, P.C. (1937). "Fluid Flow through Granular Beds". Trans. Inst. Chem. Eng., 15, 150.

- Carroll, D. (1959). "Ion exchange in clays and other minerals". Geological Society of America Bulletin 70 (6), pp. 749-780.
- Chapuis, P.R., Aubertin, M. (2003). "On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils". Can. Geotech. J. 40 (3), pp. 616-628.
- Βιδάκης, Μ., Meulenkamp, J.E. (1983). "Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο «Επάνω Αρχάναι»". ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:50.000.
- ΓΥΣ (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) (2007). "Τοπογραφικός Χάρτης, Φύλλο «Επάνω Αρχάναι»". κλίμακα 1:50.000.
- Driscoll, F.G. (1986). "Groundwater and Wells". Second Edition, Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul - Minnesota, USA.
- ELE International, Inc. (2004). "High Pressure Permeameter Set, Model 25-0670 (K-670A). Operating Instructions".
- ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) (1986). "Εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής (Ε105-86)". ΥΠΕΧΩΔΕ – ΓΓΔΕ – Δ/νση Ερευνών Εδαφών (ΕΚ1), Αθήνα.
- Fetter, C.W. (1988). "Applied Hydrogeology". Second Edition, Merrill Publishing Company, Columbus – Ohio, USA.
- Freeze, R.A. – Cherry, J.A. (1979). "Groundwater". Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

- Head, K.H., MA (cantab) "Manual of soil laboratory testing Vol.1." C. Eng.-pentech press FICE, PGS 1992.
- Καββαδάς, Μ. (2007). "Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κλειδοπούλου, Μ., Βαβαδάκης, Δ. (2008). "Εργαστηριακές Ασκήσεις μαθήματος «Υδρογεωλογία και Υδροτεχνικά Έργα»". Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν. (2000). "Τεχνική Γεωλογία". Εκδ. Παπασωτηρίου.
- Κωστάκης, Γ. (1999). "Κεφάλαια Ακτινοσκοπία των Κρυστάλλων". Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Manual of soil laboratory testing Vol.1
- Olson, R.E., Daniel, D.E. (1981). "Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-Grained Soils. Permeability and Groundwater Contaminant Transport". ASTM STP 746, T.F. Zimmie and C.O. Rigs, Eds., American Society for testing and Materials, Philadelphia, pp. 18-64.
- Παπαχαρίσης, Ν., Γραμματικόπουλος, Ι., Μάνου-Ανδρεάδη, Ν. (2003). "Γεωτεχνική Μηχανική", Β' Έκδοση, Εκδ. Αδελφών Κυριακίδη.
- Rhoades, J.D. (1982). "Cation Exchange Capacity". In A.L. Page et al. (ed) "Methods of soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties". 2nd ed, Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 149-157

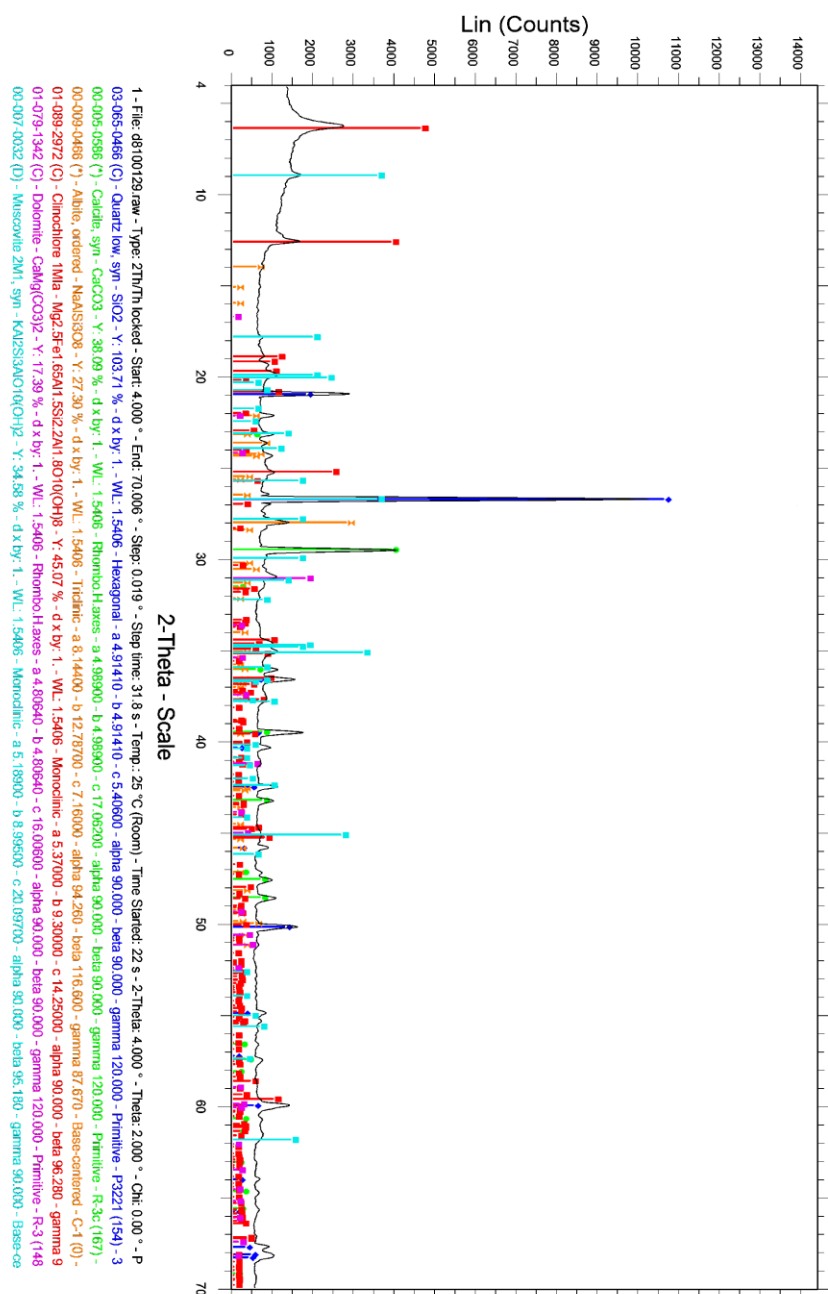
- Roque, A., Dibier, G. (2005) "Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions".
- Sällfors, G., Öberg-Högst., A. (2002). "Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes". Geotechnical and Geological Engineering, pp. 65-80.
- Σκορδίλης, Α "Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών μη Επικίνδυνων Αποβλήτων" Εκδόσεις Ιων.
- Στειακάκης, Ε. (2005). "Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής". Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Στειακάκης, Ε. (2008). "Εργαστηριακές ασκήσεις «Τεχνικής Γεωλογίας - Εδαφομηχανικής»". Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Πόρων, Χανιά.
- Σούλιος, Γ. (1986). "Γενική Υδρογεωλογία". Τόμοι Α και Β, University Press, Θεσσαλονίκη.
- Τσιαμπάος, Γ. (1988). "Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου Κρήτης", Διδακτορική Διατριβή.
- Todd, D.K. (1980). "Groundwater Hydrology". Second Edition, John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- ΥΠΕΧΩΔΕ (2006). "Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές: 08. Υδραυλικά Έργα, 05. Στεγανώσεις και Αρμοί τεχνικών Έργων, 03. Στεγανοποιήσεις Λιμνοδεξαμενών – ΧΥΤΑ, 02. Υπόστρωμα

Στεγανοποιητικών Στρώσεων από λεπτόκοκκο Διαβαθμισμένο Υλικό (ΠΕΤΕΠ 08-05-03-02)". Έκδοση 1.0.

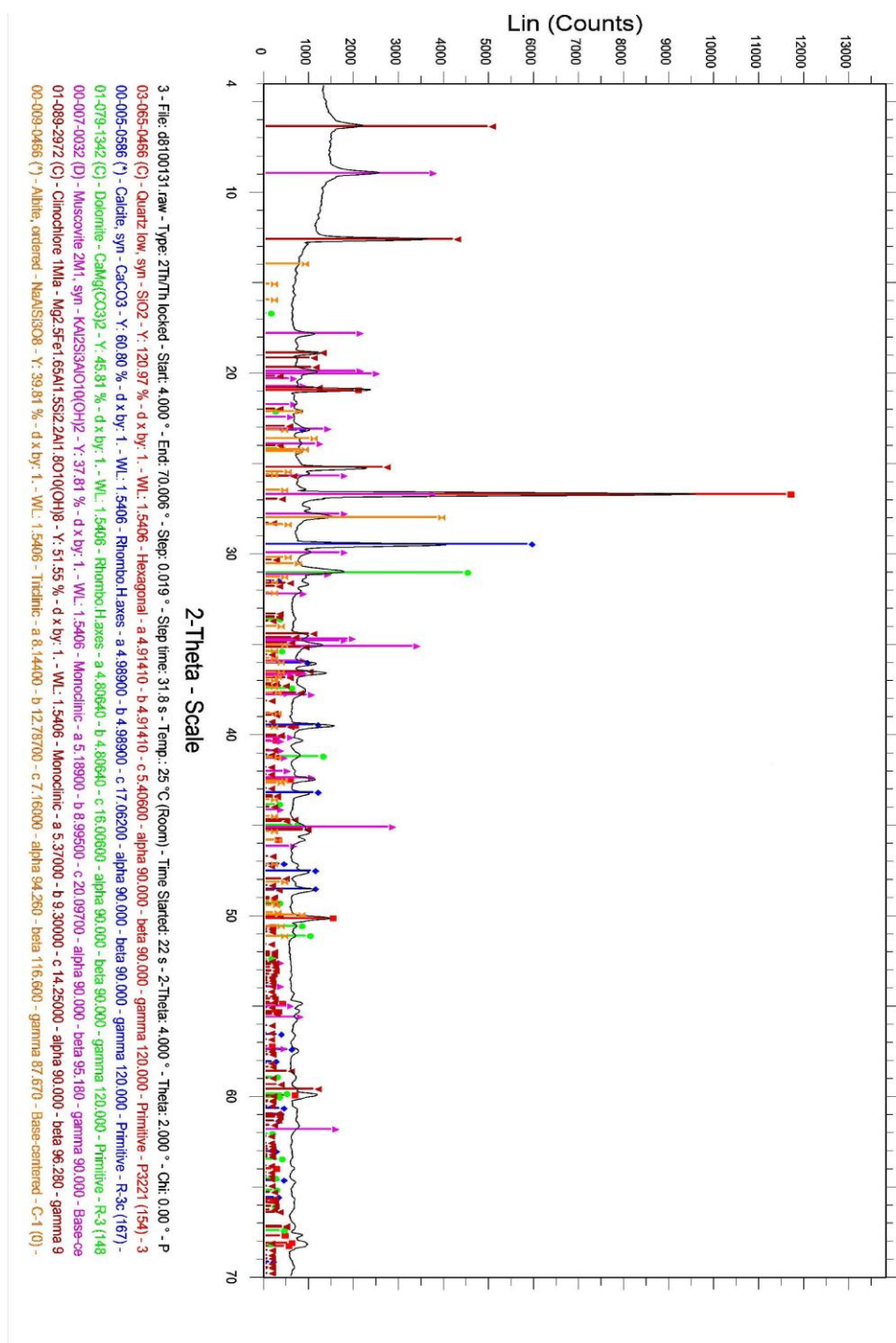
- ΦΕΚ 1572. Εφημερίς της κυβέρνησεως (τεύχος δεύτερο), 20637,2645.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

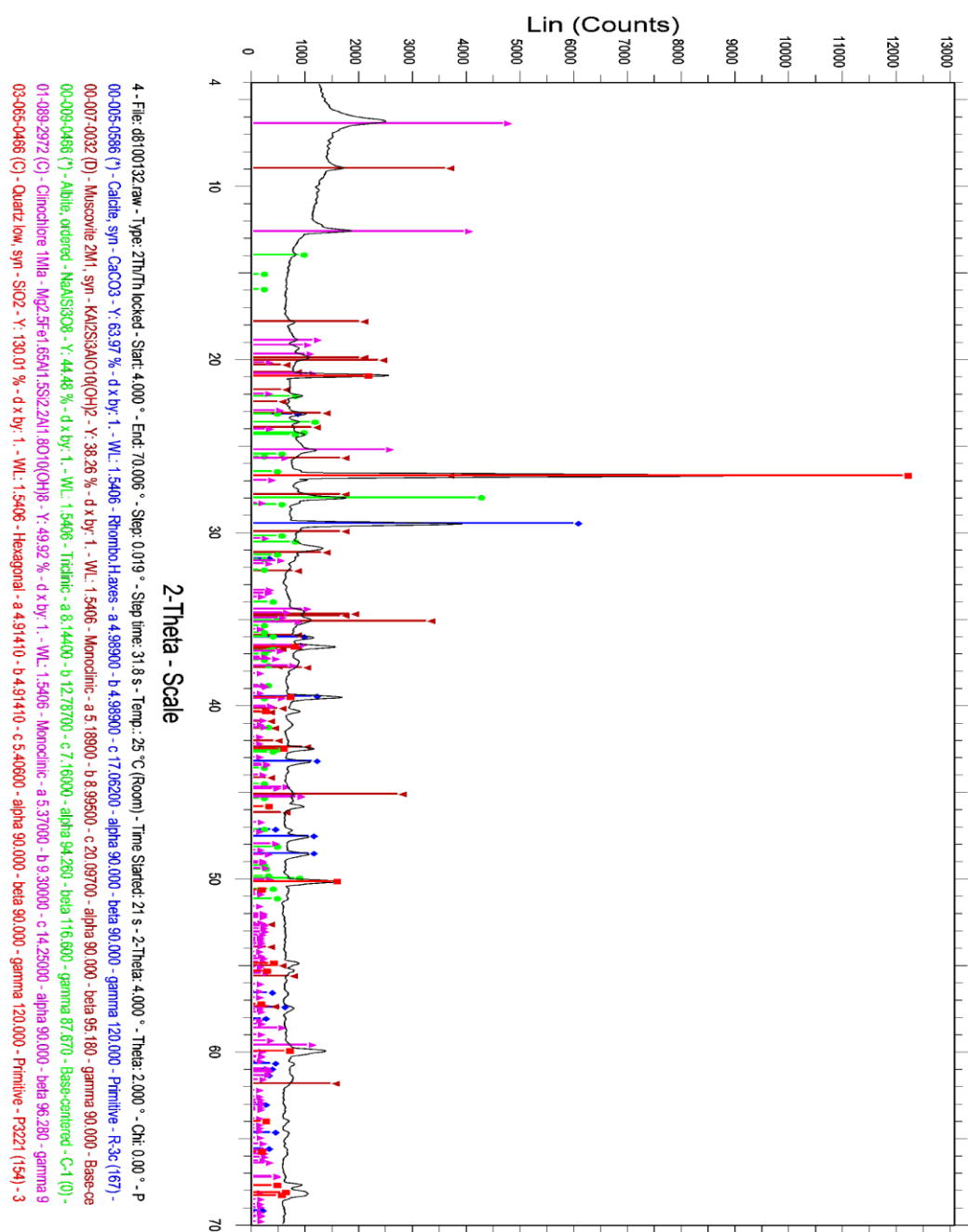
Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχήματα 1-3.



Σχήμα 1: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου του δείγματος 2.



Σχήμα 2: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου του δείγματος 3.



Σχήμα 3: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου του δείγματος 4.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 1).

Αρχικό ύψος δοκιμίου, $l_0 = 75,45 \text{ mm}$			
Διάμετρος δοκιμίου, $\delta = 37,6 \text{ mm}$			
Συντελεστής μετατροπής δυν. δακτυλίου, $\alpha = 2,015 \text{ N} / 0,002 \text{ mm}$			
Υγρασία, $w = 16,2\%$			
Αξονική παραμόρφωση, $\Delta l \text{ (mm)}$	Ανηγγμένη παραμόρφωση, $\varepsilon = \Delta l / l_0$	Παραμόρφωση δυν. δακτυλίου, $x \text{ (mm)}$	Αξονική δύναμη, $F \text{ (N)} = \alpha \cdot x$
0,000	0,000	0,000	0,000
0,046	0,001	0,012	12,090
0,139	0,002	0,024	24,180
0,279	0,004	0,035	35,263
0,360	0,005	0,047	47,353
0,488	0,006	0,059	59,443
0,511	0,007	0,071	71,533
0,616	0,008	0,082	82,615
0,744	0,010	0,094	94,705
0,779	0,010	0,106	106,795
0,883	0,012	0,117	117,878
1,023	0,014	0,129	129,968
1,116	0,015	0,141	142,058
1,209	0,016	0,153	154,148
1,395	0,018	0,164	165,230
1,569	0,021	0,176	177,320
1,860	0,025	0,188	189,410
3,139	0,042	0,176	177,320
3,325	0,044	0,164	165,230
3,627	0,048	0,153	154,148
3,814	0,051	0,141	142,058
3,953	0,052	0,129	129,968
4,093	0,054	0,117	117,878
4,093	0,054	0,106	106,795

Πίνακας 2: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 2).

Αρχικό ύψος δοκιμίου, $l_0 = 75,30 \text{ mm}$			
Διάμετρος δοκιμίου, $\delta = 36,4 \text{ mm}$			
Συντελεστής μετατροπής δυν. δακτυλίου, $\alpha = 2,015 \text{ N} / 0,002 \text{ mm}$			
Υγρασία, $w = 16,8\%$			
Αξονική παραμόρφωση, $\Delta l \text{ (mm)}$	Ανηγμένη παραμόρφωση, $\varepsilon = \Delta l / l_0$	Παραμόρφωση δυν. δακτυλίου, $x \text{ (mm)}$	Αξονική δύναμη, $F \text{ (N)} = \alpha \cdot x$
0,000	0,000	0,000	0,000
0,093	0,001	0,012	12,090
0,210	0,003	0,023	23,173
0,349	0,005	0,035	35,263
0,442	0,006	0,047	47,353
0,535	0,007	0,059	59,443
0,617	0,008	0,070	70,525
0,698	0,009	0,082	82,615
0,814	0,011	0,094	94,705
0,896	0,012	0,105	105,788
0,989	0,013	0,117	117,878
1,117	0,015	0,129	129,968
1,245	0,016	0,141	142,058
1,291	0,017	0,152	153,140
1,454	0,019	0,164	165,230
1,570	0,021	0,176	177,320
1,686	0,022	0,187	188,403
1,849	0,024	0,199	200,493
1,931	0,026	0,211	212,583
2,059	0,027	0,223	224,673
2,280	0,030	0,234	235,755
2,547	0,034	0,246	247,845
2,768	0,037	0,258	259,935
3,628	0,048	0,246	247,845
4,186	0,055	0,234	235,755

4,454	0,059	0,223	224,673
4,605	0,061	0,211	212,583
4,721	0,063	0,199	200,493
4,768	0,063	0,187	188,403

Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 3).

Αρχικό ύψος δοκιμίου, $l_0 = 75,75 \text{ mm}$			
Διάμετρος δοκιμίου, $\delta = 37 \text{ mm}$			
Συντελεστής μετατροπής δυν. δακτυλίου, $\alpha = 2,015 \text{ N} / 0,002 \text{ mm}$			
Υγρασία, $w = 15,9\%$			
Αξονική παραμόρφωση, $\Delta l \text{ (mm)}$	Ανηγγμένη παραμόρφωση, $\varepsilon = \Delta l / l_0$	Παραμόρφωση δυν. δακτυλίου, $x \text{ (mm)}$	Αξονική δύναμη, $F \text{ (N)} = \alpha \cdot x$
0,000	0,000	0,000	0,000
0,047	0,001	0,012	12,090
0,163	0,002	0,024	24,180
0,279	0,004	0,035	35,263
0,419	0,006	0,047	47,353
0,523	0,007	0,059	59,443
0,570	0,008	0,071	71,533
0,744	0,010	0,082	82,615
0,895	0,012	0,094	94,705
0,988	0,013	0,106	106,795
1,070	0,014	0,117	117,878
1,186	0,016	0,129	129,968
1,279	0,017	0,141	142,058
1,372	0,018	0,153	154,148
1,523	0,020	0,164	165,230
1,651	0,022	0,176	177,320
1,744	0,023	0,188	189,410
1,826	0,024	0,199	200,493
1,954	0,026	0,211	212,583
2,105	0,028	0,223	224,673
2,174	0,029	0,235	236,763

2,430	0,032	0,246	247,845
2,628	0,035	0,258	259,935
2,767	0,037	0,270	272,025
3,116	0,041	0,282	284,115
3,547	0,047	0,270	272,025
3,837	0,051	0,258	259,935
4,012	0,053	0,246	247,845
4,233	0,056	0,235	236,763
4,360	0,058	0,223	224,673
4,488	0,059	0,211	212,583
4,547	0,060	0,199	200,493

Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Δοκίμιο 4).

Αρχικό ύψος δοκιμίου, $l_0 = 76,25 \text{ mm}$			
Διάμετρος δοκιμίου, $\delta = 36 \text{ mm}$			
Συντελεστής μετατροπής δυν. δακτυλίου, $\alpha = 2,015 \text{ N} / 0,002 \text{ mm}$			
Υγρασία, $w = 16,3\%$			
Αξονική παραμόρφωση, $\Delta l \text{ (mm)}$	Ανηγγμένη παραμόρφωση, $\varepsilon = \Delta l / l_0$	Παραμόρφωση δυν. δακτυλίου, $x \text{ (mm)}$	Αξονική δύναμη, $F \text{ (N)} = \alpha \cdot x$
0,000	0,000	0,000	0,000
0,128	0,002	0,012	12,090
0,175	0,002	0,023	23,173
0,291	0,004	0,035	35,263
0,338	0,004	0,047	47,353
0,442	0,006	0,059	59,443
0,535	0,007	0,070	70,525
0,686	0,009	0,082	82,615
0,791	0,010	0,094	94,705
0,896	0,012	0,105	105,788
0,989	0,013	0,117	117,878
1,070	0,014	0,129	129,968
1,175	0,015	0,141	142,058
1,384	0,018	0,152	153,140

1,442	0,019	0,164	165,230
1,582	0,021	0,176	177,320
1,779	0,023	0,187	188,403
1,977	0,026	0,199	200,493
2,163	0,028	0,211	212,583
2,558	0,034	0,199	200,493
2,814	0,037	0,187	188,403
2,942	0,039	0,176	177,320
3,047	0,040	0,164	165,230
3,163	0,041	0,152	153,140
3,303	0,043	0,141	142,058
3,442	0,045	0,129	129,968
3,512	0,046	0,117	117,878
3,570	0,047	0,105	105,788
Αρχικός λόγος κενών e_0		0,513	
Αρχικό υγρό μοναδιαίο βάρος εδάφους, γ_b		20,349 kN/m ³	
Κορεσμένο μοναδιαίο βάρος εδάφους, γ_{sat}		20,831 kN/m ³	

Πίνακας 5.10.2: Αποτελέσματα δοκιμής μονοδιάστατης συμπιεστότητας (1η φόρτιση, χωρίς νερό στην κυψέλη).

Φορτίο, W = 10 kg		
Χρόνος φόρτισης		Υποχώρηση, ΔH (mm)
t (min)	$\sqrt{t}$	
0,0010	0,03	0,000
0,0167	0,13	0,101
0,0333	0,18	0,108
0,0500	0,22	0,115
0,0667	0,26	0,121
2,0000	1,41	0,128
219,2500	14,81	0,149
1083,3833	32,91	0,155
1287,6500	35,88	0,162
Ορθή τάση, $\sigma = 48,02$ kPa		
Μέγιστη υποχώρηση, $\Delta H_{\max} = 0,162$ mm		
Μεταβολή λόγου κενών, $\Delta e = 0,012$		
Τελικός λόγος κενών, $e = 0,501$		

Πίνακας 5.10.3: Αποτελέσματα δοκιμής μονοδιάστατης συμπιεστότητας (2η φόρτιση, χωρίς νερό στην κυψέλη).

Φορτίο, W = 20 kg		
Χρόνος φόρτισης		Υποχώρηση, ΔH (mm)
t (min)	$\sqrt{t}$	
0,0010	0,03	0,162
0,0167	0,13	0,324
0,0333	0,18	0,459
0,0500	0,22	0,473
0,0667	0,26	0,480
0,1333	0,37	0,486
0,2500	0,50	0,493

0,5000	0,71	0,500
1,0000	1,00	0,507
2,0000	1,41	0,514
4,0000	2,00	0,520
7,5833	2,75	0,568
219,2500	14,81	0,574
261,0167	16,16	0,588
1090,0167	33,02	0,595
1188,6000	34,48	0,588
1287,6500	35,88	0,595
1584,8000	39,81	0,601
1782,9000	42,22	0,608
2179,1000	46,68	0,615
2575,3000	50,75	0,622
3070,5500	55,41	0,629
3367,7000	58,03	0,635
3862,9500	62,15	0,642
4160,1000	64,50	0,649
4754,4000	68,95	0,656
5051,5500	71,07	0,662
5645,8500	75,14	0,669
5843,9500	76,45	0,669
Ορθή τάση, $\sigma = 94,04$ kPa		
Μέγιστη υποχώρηση, $\Delta H_{\max} = 0,669$ mm		
Μεταβολή λόγου κενών, $\Delta e = 0,051$		
Τελικός λόγος κενών, $e = 0,463$		

Πίνακας 5.10.4: Αποτελέσματα δοκιμής μονοδιάστατης συμπιεστότητας (3η φόρτιση, χωρίς νερό στην κυψέλη).

Φορτίο, W = 40 kg		
Χρόνος φόρτισης		Υποχώρηση, ΔΗ (mm)
t (min)	$\sqrt{t}$	
0,0010	0,03	0,669
0,1000	0,32	0,676
0,2500	0,50	0,682
0,5000	0,71	0,689
1,0000	1,00	0,696
2,0000	1,41	0,703
4,0000	2,00	0,709
7,5833	2,75	0,716
219,2500	14,81	0,743
1083,3833	32,91	0,764
1083,3833	32,91	0,770
1683,8500	41,03	0,777
1881,9500	43,38	0,784
2476,2500	49,76	0,791
3070,5500	55,41	0,797
3664,8500	60,54	0,804
4061,0500	63,73	0,811
4655,3500	68,23	0,818
5051,5500	71,07	0,824
Ορθή τάση, $\sigma = 192,09 \text{ kPa}$		
Μέγιστη υποχώρηση, $\Delta H_{\max} = 0,824 \text{ mm}$		
Μεταβολή λόγου κενών, $\Delta e = 0,062$		
Τελικός λόγος κενών, $e = 0,451$		

Πίνακας 5.10.5: Αποτελέσματα δοκιμής μονοδιάστατης συμπιεστότητας (4η φόρτιση, με νερό στην κυψέλη).

Φορτίο, $W = 40 \text{ kg}$		
Χρόνος φόρτισης		Υποχώρηση, $\Delta H \text{ (mm)}$
$t \text{ (min)}$	$\sqrt{t}$	
0,0010	0,03	0,824
0,2500	0,50	0,831
219,2500	14,81	0,858
1083,3833	32,91	0,865
3565,8000	59,71	0,872
4358,2000	66,02	0,878
6339,2000	79,62	0,885
Ορθή τάση, $\sigma = 192,09 \text{ kPa}$		
Μέγιστη υποχώρηση, $\Delta H_{\max} = 0,885 \text{ mm}$		
Μεταβολή λόγου κενών, $\Delta e = 0,067$		
Τελικός λόγος κενών, $e = 0,446$		