



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ
ΤΟ ΜΑΝΔΥΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ ΦΥΛΛΙΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΑΠΗΤΑ ΣΕ Χ.Υ.Τ.Α.»**

ΚΟΦΦΑ Κ. ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ – ΛΕΚΤΟΡΑΣ)

ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ

(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΜΙΧΑΗΛ ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ

(ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτέλεσε για μένα, ένα ευχάριστο και άκρως ενδιαφέρον και διδακτικό πεδίο, στο οποίο σημαντικά συνέβαλλαν όλοι εκείνοι που με βοήθησαν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά και περισσότερο από όλους τον Επιβλέποντα κ. Στειακάκη που με την δική του καθοδήγηση κατάφερα να επιλέξω και να φέρω εις πέρας το συγκεκριμένο θέμα. Εκτός, από τις πολύτιμες συμβουλές του και την εποικοδομητική συζήτηση που είχαμε σε κάθε συνάντηση, μου έμαθε να σκέφτομαι πολύπλευρα στην αντιμετώπιση τυχόν δυσκολιών.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη, που συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή και αφιέρωσαν τον χρόνο τους για να τελειοποιηθεί αυτή η εργασία έτσι ώστε, να αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος και μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Αλεβίζο Γεώργιο, την Λέκτορα κα. Πεντάρη Δέσποινα, τον Αν. Καθηγητή κ. Πασαδάκη Νίκο, την κα. Παντελάκη Όλγα, τον κ. Τριανταφύλλου Γιώργο, την κα. Κατσιμίχα Δέσποινα, τον κ. Στρατάκη Αντώνιο και τον Θωμαΐδη Ευστράτιο για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την διεξαγωγή και διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ για την υπομονή και καθοδήγηση, καθ' όλη την διάρκεια των εργασιών, οφείλω στον κ. Βαβαδάκη Διονύση, συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας. Η βοήθεια του ήταν καθοριστική για την διεξαγωγή και περάτωση της εργασίας μου.

Ευχαριστώ, ακόμα, όλους τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για την ενασχόληση τους και τις συμβολές τους.

Κάπου εδώ θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, εκείνους που μαζί τους πέρασα τα πιο όμορφα φοιτητικά χρόνια, μου συμπαραστάθηκαν και έγιναν η αφορμή να πιστεύω αυτό που είπε ο Άγγλος πρίγκιπας George Clarence, «Κανένας άνθρωπος δεν είναι αποτυχημένος όταν έχει φίλους».

Τελειώνοντας, να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένεια μου που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Θέλω να τους ευχαριστήσω για όλα όσα έχουν κάνει για μένα, για την υπομονή τους και το κουράγιο που μου έδιναν πάντα για να συνεχίσω. Τέλος, την αδερφή μου που πάντα ήταν δίπλα μου!

Σας ευχαριστώ όλους,

Κόφφα Χρύσα

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή, είχε ως σκοπό τη διερεύνηση της καταλληλότητας γεωυλικού από τον μανδύα αποσάθρωσης του συστήματος φυλλιτών – χαλαζιτών για την κατασκευή γεωλογικού φραγμού (τάπητα) σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Προσδιορίστηκε η ορυκτολογική σύσταση, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων η συγκέντρωση σε ανθρακικό ασβέστιο και σε οργανικό άνθρακα του γεωυλικού. Διερευνήθηκε, η κοκκομετρική του διαβάθμιση και προσδιορίστηκαν τα όρια Atteberg (υδαρότητας, πλαστικότητας, συρρίκνωσης) και η τάση διόγκωσής του.

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η βέλτιστη υγρασία κατά Proctor και συμπυκνώθηκαν δοκίμια σε υγρασία 2% πλέον της βέλτιστης. Στα δοκίμια αυτά, μετρήθηκε η υδροπερατότητα και εκτιμήθηκε η αντοχή σε άμεση διάτμηση.

Επιδιώκοντας τη μείωση της υδροπερατότητάς του, το εδαφικό δείγμα αναμείχθηκε με ιπτάμενη τέφρα 20% κατά βάρος. Στο μίγμα αυτό επαναλήφθηκαν δοκιμές για την αξιολόγησή του ως υλικό κατασκευής γεωλογικού φραγμού.

Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν και στα δύο υλικά συγκρίθηκαν με τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές για την κατασκευή τάπητα σε ΧΥΤΑ.

ABSTRACT

In this thesis, laboratory tests were conducted in samples taken from the erosion mantle of phyllite – quartzite series, in order to investigate the suitability of this formation to be used for the liner construction at a landfill site.

During these laboratory studies, the mineralogical composition, the cation exchange capacity, the calcium carbonate and organic carbon concentrations were determined. Moreover, the particle-size distribution of the sample, the Atterberg limits (liquid, plastic, and shrinkage limit) and the free swell tendency were determined.

Then, the optimum moisture content was estimated based on the Proctor test results. Next, specimens were prepared by compaction of the samples with moisture content 2% higher than the optimum. In these specimens, the hydraulic conductivity, and the shear strength were determined.

In order to reduce the hydraulic conductivity of the sample, this was mixed with fly ash 20% by weight. Various tests were carried out in the mixture in order to evaluate its suitability for landfill liner construction.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	x
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΧΥΤΑ.....	3
2.1. Κριτήρια επιλογής θέσης κατασκευής ΧΥΤΑ.....	6
2.2. Διαμόρφωση κυττάρων	10
2.3. Σύστημα συλλογής και επεξεργασίας στραγγισμάτων	11
2.4. Σύστημα συλλογής, μεταφοράς και διάθεσης βιοαερίου	13
2.5. Μόνωση του ΧΥΤΑ	14
2.5.1. Αργιλική μόνωση	15
2.5.2. Μόνωση με συνδυασμό ορυκτών υλικών και γεωμεμβράνες.....	22
2.7. Τελική κάλυψη – αποκατάσταση.....	24
3. ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ.....	29
3.1. Γεωλογία περιοχής.....	29
4. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	32
4.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD).....	32
4.1.1. Πειραματική διαδικασία	33
4.1.2. Αποτελέσματα	33
4.2. Προσδιορισμός οργανικού άνθρακα (TOC).....	35
4.2.1. Πειραματική διαδικασία	36
4.2.2. Αποτελέσματα	36
4.3. Εκτίμηση ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ)	37
4.3.1. Πειραματικός υπολογισμός – αποτελέσματα.....	38
4.3.2. Εμπειρικός υπολογισμός – αποτελέσματα	39
4.4. Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου.....	40
4.4.1. Πειραματική διαδικασία	40
4.4.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα.....	41

5. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	43
5.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	43
5.1.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση με κόσκινα.....	45
5.1.2. Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση αραιομέτρου.....	47
5.1.3. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης.....	48
5.2. Όρια Atterberg και ενεργότητα.....	51
5.2.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας.....	52
5.2.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας.....	53
5.2.3. Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης.....	55
5.2.4. Προσδιορισμός ενεργότητας.....	56
5.2.5. Αποτελέσματα.....	57
5.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση του γεωυλικού.....	59
5.4. Προσδιορισμός ελεύθερης διόγκωσης.....	61
5.4.1. Πειραματική διαδικασία.....	61
5.4.2. Αποτελέσματα.....	62
6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ.....	63
6.1. Πειραματική διαδικασία.....	65
6.2. Αποτελέσματα.....	66
7. ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....	68
7.1. Πειραματική διαδικασία.....	72
7.2. Αποτελέσματα.....	73
8. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ.....	74
8.1. Ταχεία δοκιμή μη στερεοποιημένου εδάφους.....	76
8.2. Αποτελέσματα.....	78
9. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΕ ΜΙΞΗ ΜΕ ΠΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ.....	80
9.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD).....	82
9.2. Γεωτεχνικές παράμετροι.....	84
9.2.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση δειγμάτων.....	84
9.2.2. Όρια Atterberg.....	84
▪ Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης.....	86

9.2.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση μίγματος.....	87
9.2.4. Προσδιορισμός ελεύθερης διόγκωσης	88
9.3. Δοκιμές συμπίκνωσης.....	89
9.4. Υπολογισμός υδροπερατότητας.....	91
9.5. Δοκιμές άμεσης διάτμησης	91
10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	93
10.1. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.....	93
10.2. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	95
Βιβλιογραφία.....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	iii
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	v
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	vii
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	xvi
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....	xviii

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1: ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΧΩΡΟΥ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΚΑΒΒΑΔΑΣ 2007)	5
ΣΧΗΜΑ 2.2: ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ Χ.Υ.Τ.Α.	10
ΣΧΗΜΑ 2.3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ	13
ΣΧΗΜΑ 2. 4: ΤΥΠΙΚΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΕΝΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	17
ΣΧΗΜΑ 2.5: ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΕΙΕΣ ΤΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (Α) ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΚΑΙ (Β) ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ	19
ΣΧΗΜΑ 2.6: ΑΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΓΕΩΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	24
ΣΧΗΜΑ 2.7: ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΜΕ (Α) ΑΠΛΗ ΚΑΙ (Β) ΔΙΠΛΗ ΣΤΡΩΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (ΟΔΗΓΙΑ ΤΗΣ ΕΕ)	26
 ΣΧΗΜΑ 3.1: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ. ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΧΑΡΤΗ, ΚΛΙΜΑΚΑΣ 1:50.000	29
 ΣΧΗΜΑ 4.1: ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Α	34
 ΣΧΗΜΑ 5.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ	44
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ	50
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ	57
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ CASAGRANDE	60
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	60
 ΣΧΗΜΑ 7.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	70
 ΣΧΗΜΑ 8.1: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ - ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	78
ΣΧΗΜΑ 8.2: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ – ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	79
ΣΧΗΜΑ 8.3: ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ – ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	79
 ΣΧΗΜΑ 9.1: ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟΥ	83
ΣΧΗΜΑ 9.2: ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΙΓΜΟΣ	84
ΣΧΗΜΑ 9.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ	85
ΣΧΗΜΑ 9.4: ΘΕΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CASAGRANDE	87
ΣΧΗΜΑ 9.5: ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ PROCTOR, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΟΡΙΑ ATTERBERG	89
ΣΧΗΜΑ 9.6: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	90
ΣΧΗΜΑ 9.7: ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ – ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	92
 ΣΧΗΜΑ Α.1: ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Β	III
ΣΧΗΜΑ Α.2: ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Γ	IV

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΜΒΡΑΝΩΝ.....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΜΙΠΟΣΟΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ).....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΛΙΚΟ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΙΑΚ ΓΙΑ $p_H = 7$	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΚΟΣΚΙΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΡΑΙΟΜΕΤΡΟ.....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΟΡΥΚΤΩΝ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ.....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: ΤΙΜΕΣ ΟΡΙΩΝ ATTERBERG, ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΓΕΩΛΥΚΟΥ.....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΥΠΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1: ΤΥΠΙΚΑ ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ (MOLLAMAHMOTOGLU 2001).....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2: ΗΜΙΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ.....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΘΗΚΑΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΑΠΗΤΑ ΣΕ ΧΥΤΑ.....	93
ΠΙΝΑΚΑΣ Β.1: ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗ ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ (ΔΕΙΓΜΑ Α).....	V
ΠΙΝΑΚΑΣ Β.2: ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗ ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ (ΔΕΙΓΜΑ Β).....	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.1: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,04kN)	VII
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.2: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,12kN)	IX
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.3: ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,24kN)	XI
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.4: ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,32kN)	XIII
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.1: ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΓΜΑ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,04kN).....	XVIII
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.2: ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΓΜΑ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,12kN).....	XIX
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.3: ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΓΜΑ ΥΠΟ ΟΡΘΟ ΦΟΡΤΙΟ (0,24kN).....	XX

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

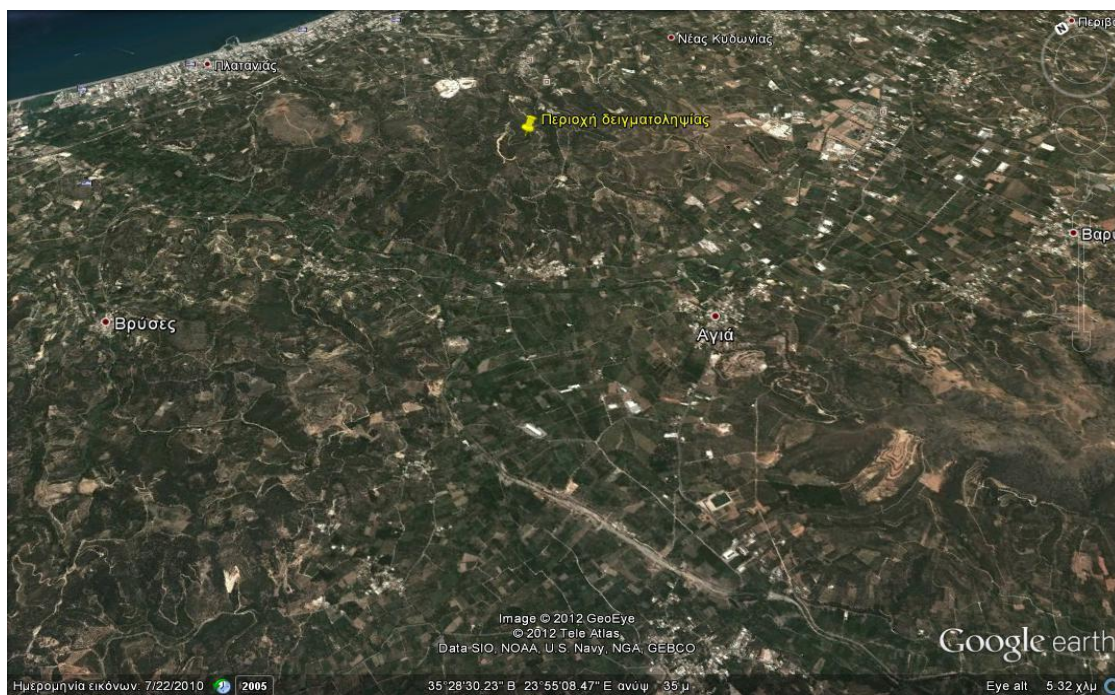
<i>ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΟ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ ΤΥΠΟΥ D8-ADVANCE ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ BRUCKER AXS ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ</i>	<i>32</i>
<i>ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΌΡΙΟ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ</i>	<i>55</i>
<i>ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ</i>	<i>62</i>
<i>ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ</i>	<i>66</i>
<i>ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ</i>	<i>70</i>
<i>ΕΙΚΟΝΑ 8.1: ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</i>	<i>75</i>

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων, αποτελεί μια διαδικασία σημαντική για την προστασία του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα προστατεύεται και η δημόσια υγεία.

Η ανάγκη κατασκευής συστημάτων μόνωσης του ΧΥΤΑ, οδήγησαν στην διερεύνηση της καταλληλότητας του γεωυλικού από το σύστημα φυλλιτών χαλαζιτών που εμφανίζεται σε μεγάλη έκταση δυτικά των Χανίων.

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



Σχήμα 1.1: Θέση δειγματοληψίας .Δορυφορική εικόνα από Google Earth.

Άποψη από ΝΔ

Στις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής περιλαμβάνεται και ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης (XRD), ο προσδιορισμός του οργανικού άνθρακα (TOC), η εκτίμηση της ικανότητας

ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ), ο προσδιορισμός του ανθρακικού ασβεστίου, η κοκκομετρική διαβάθμιση του γεωυλικού και ο προσδιορισμός των ορίων Atterberg. Επίσης εκτιμήθηκε η τάση διόγκωσής του, έγιναν δοκιμές συμπίκνωσης, δοκιμές για την εκτίμηση της υδροπερατότητας και δοκιμές άμεσης διάτμησης.

Ακόμη, διενεργήθηκε περαιτέρω εργαστηριακή έρευνα με μίγμα που αποτελείται από 20% ιπτάμενη τέφρα και 80% γεωυλικό από την φυλλιτική χαλαζιτική σειρά, με σκοπό την βελτίωση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την καταλληλότητα του γεωυλικού για χρήση στην κατασκευή τάπητα σε ΧΥΤΑ. Εκτελέστηκαν επιπλέον εργαστηριακές δοκιμές όπου κρίθηκε ότι οι παράμετροι του μίγματος διαφοροποιούνται από αυτές του αρχικού γεωυλικού.

Οι δοκιμές που εκτελέσθηκαν για το μίγμα περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης (XRD), την κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος, τον προσδιορισμό ορίων Atterberg και την εκτίμηση της τάσης διόγκωσης του. Ακόμα, έγιναν δοκιμές συμπίκνωσης, δοκιμές για την εκτίμηση της υδροπερατότητας και δοκιμές άμεσης διάτμησης.

Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΧΥΤΑ

Ο όρος «υγειονομική ταφή» για τα απορρίμματα, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1930, στην Καλιφόρνια, για να περιγράψει μια απλή δραστηριότητα διάστρωσης, συμπίεσης και κάλυψης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) με εδαφικό υλικό σε ημερήσια βάση. Τα κύρια γνωρίσματα, που διαφοροποιούσαν τη διαδικασία αυτή από τις μέχρι τότε συνήθειες διαδικασίες απόρριψης στο έδαφος, ήταν η συμπίεση και η ημερήσια κάλυψη (Παναγιωτακόπουλος 2007).

Το σύνολο σχεδόν των στερεών αποβλήτων, μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1950, αποτίθενται σε «χωματερές» χωρίς ιδιαίτερα μέτρα προστασίας για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους. Ως θέσεις «χωματερών» συνήθως επιλέγονταν φυσικές κοιλότητες σε θέσεις σχετικά απομακρυσμένες από αστικές περιοχές, εγκαταλειμμένα ορυχεία, λατομεία κλπ. Από άγνοια ή ελλιπή αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων από τη ρύπανση του υπεδάφους, δεν λαμβάνονταν τεχνικά μέτρα σφράγισης του πυθμένα των «χωματερών».

Η εξερεύνηση των πλέον κατάλληλων περιοχών (από γεωτεχνικής απόψεως) και η βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής των χώρων διάθεσης στερεών αποβλήτων αποτελούν κάποιους από τους κυριότερους σκοπούς της Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το 70% των αστικών αποβλήτων και το 35% των βιομηχανικών αποβλήτων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατέληγαν σε χώρους ταφής, η διαχείριση απορριμμάτων με τη μέθοδο της ταφής δεν πρόκειται να εκλείψει (Καββαδάς 2007).

Κατά συνέπεια, η βελτίωση της τεχνολογίας και οι νομοθετικές απαιτήσεις που αφορούν την κατασκευή των χώρων απόθεσης στερεών αποβλήτων έχουν σημαντικές οικονομικές συνέπειες. Όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, αλλά κυρίως με τη βαθμιαία ευαισθητοποίηση των κοινωνικών ομάδων σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος, άρχισε να επιβάλλεται η κατασκευή σύγχρονων

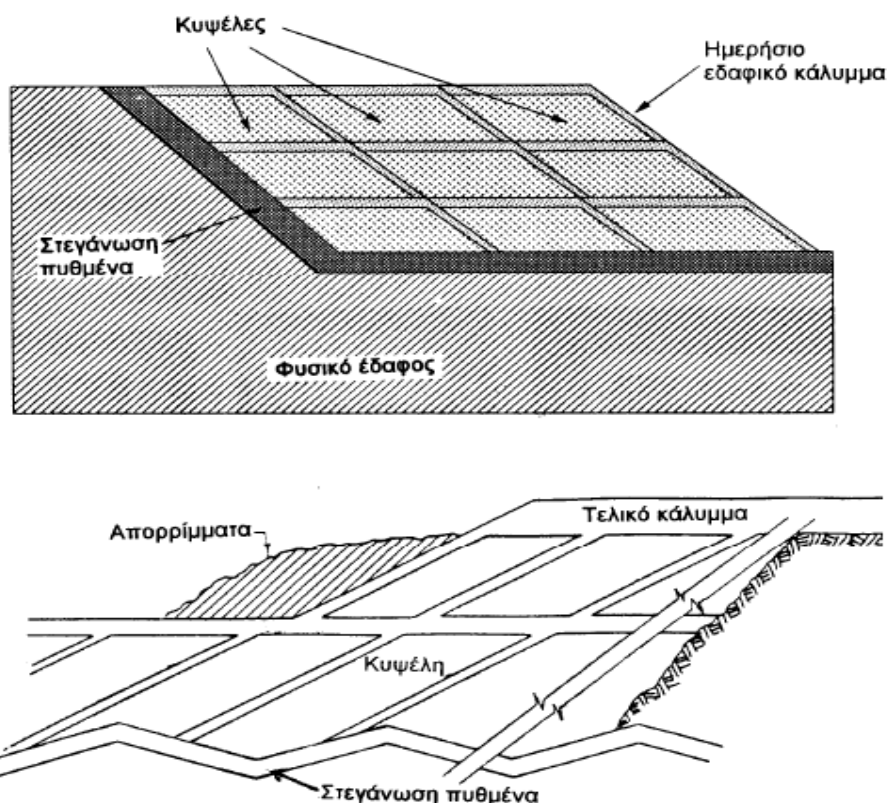
υγειονομικών αποδεκτών στερεών αποβλήτων (sanitary landfills) που συχνά ονομάζονται και Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Ο ΧΥΤΑ είναι ένας χώρος υπεδάφιος ή υπερεδάφιος κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να αποτίθενται σε αυτόν στερεά απόβλητα και να ελέγχονται τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους μέχρις ότου αυτά καταστούν μη επικίνδυνα για το περιβάλλον και την υγεία.

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

Ο πυθμένας και οι πλευρές της υπεδάφιας διαμόρφωσης «στεγανοποιούνται» με φυσικά ή συνθετικά υλικά που όμως είναι χαμηλής περατότητας για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους και σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης των ρυπογόνων υγρών στραγγισμάτων των απορριμμάτων και του παραγόμενου βιοαερίου. Μια τυπική διάταξη ενός υγειονομικού αποδέκτη στερεών αποβλήτων φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**.

Σημειώνεται ότι η χρήση αδιαπέρατων μεμβρανών στον πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων άρχισε να εφαρμόζεται και στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του 1980, ενώ οι πρώτοι χώροι υγειονομικής ταφής με σύγχρονα συστήματα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος και του βιοαερίου κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα μετά το 1990 (Καβαδάς 2007).



Σχήμα 2.1: Τυπική διάταξη χώρου υγειονομικής διάθεσης στερεών αποβλήτων (Καββαδάς 2007)

Η εναπόθεση γίνεται με διάστρωση των αποβλήτων σε στρώσεις, συμπίεσή τους σε προκαθορισμένο βαθμό και κάλυψή τους με εδαφικό ή άλλο υλικό σε περιοδική βάση (συνήθως καθημερινή). Μετά την πλήρωση του διαθέσιμου χώρου εντός του επιτρεπόμενου ανάγλυφου, ο χώρος καλύπτεται με κάλυμμα ελεγχόμενης διαπερατότητας επί του οποίου αναπτύσσεται βλάστηση. Ο διαχειριστής του ΧΥΤΑ υποχρεούται να μεριμνήσει για απόδοση του χώρου για μελλοντική χρήση συμβατή με τις χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή.

Ένας ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμος (survivable) ή αιφόρος (sustainable) αν, εντός μιας γενιάς (30 ετών) από την απόθεση των ΑΣΑ (Αστικών Στερεών Αποβλήτων), επιτυγχάνεται πραγματικά κατάσταση οριστικής τελικής διάθεσης με την έννοια ότι όσο η εναπομείνασα μάζα στο σώμα του ΧΥΤΑ όσο και οι κάθε είδους εκροές και εκπομπές απ' αυτόν είναι περιβαλλοντικά αποδεκτές χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

Η επίτευξη του στόχου αυτού επιδιώκεται με συνδυασμό προεπεξεργασίας των αποβλήτων και ελέγχου του ρυθμού βιοαποδόμησής τους στο σώμα του ΧΥΤΑ. Με τις σημερινές τεχνολογίες, νοοτροπίες και πρακτικές, στη χώρα μας, η πλήρης επίτευξη του στόχου της βιωσιμότητας είναι περίπου αδύνατη. Εν τούτοις, η υγειονομική ταφή δεν μπορεί να αποκλειστεί ως μια κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας και διάθεσης.

2.1. Κριτήρια επιλογής θέσης κατασκευής ΧΥΤΑ

Είναι γνωστές οι δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι εκάστοτε Τοπικές Αυτοδιοικήσεις στην εξεύρεση χώρων διάθεσης των στερεών αποβλήτων. Αυτό οφείλεται στο σχετικά μικρό διαθέσιμο χώρο της κάθε περιοχής, στην μη ορθολογική διάθεση των αποβλήτων μέχρι σήμερα, στην αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση των κατοίκων και στο ότι δεν υπάρχει σωστός σχεδιασμός για αυτό τόσο σοβαρό θέμα.

Σήμερα είναι επιτακτική η ανάγκη να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα και να επιλέγονται οι χώροι διάθεσης των στερεών αποβλήτων με αντικειμενικά κριτήρια. Η συλλογή και αξιολόγηση των στοιχείων είναι από τα πλέον βασικά πράγματα για την εξεύρεση και επιλογή των χώρων διάθεσης (Σκορδίλης 2001).

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία απαιτείται:

- I. Ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης
 - a) Δημογραφικά στοιχεία
 - b) Ποσότητες και σύνθεση των αποβλήτων
 - c) Υπάρχον σύστημα συλλογής, μεταφοράς και διάθεσης των αποβλήτων
- II. Χάρτες, μελέτες και σχέδια
 - a) Γενικός χάρτης προς εξέταση περιοχής 1: 250.000
 - b) Αεροφωτογραφίες 1: 5.000

- c) Τοπογραφικός χάρτης 1: 50.000
- d) Γεωλογικός χάρτης 1: 50.000
- e) Υδρογεωλογικές μελέτες
- f) Ρυθμιστικό σχέδιο και σχέδιο ανάπτυξης της περιοχής

Μετά την συλλογή και αξιολόγηση των παραπάνω στοιχείων εντοπίζονται οι χώροι που κρίνονται καταρχήν κατάλληλοι για την διάθεση των στερεών αποβλήτων. Κατά την προεπιλογή αποκλείονται οι χώροι που βρίσκονται στις παρακάτω περιοχές (Σκορδίλης 2001):

1. Περιοχές αρχαιολογικού πολιτιστικού ενδιαφέροντος, δηλαδή κηρυγμένοι αρχαιολογικοί χώροι.
2. Παραδοσιακοί οικισμοί.
3. Θεσμοθετημένες περιοχές προστασίας και μεμονωμένα στοιχεία της φύσης και του τοπίου, εκτός εάν η συγκεκριμένη χρήση έχει προβλεφθεί από άλλο διαχειριστικό σχέδιο ή άλλη νομοθετική ρύθμιση.
4. Οικιστικές περιοχές.
5. Περιοχές εντός ορίων σχεδίου πόλης και εντός ορίων οικισμών με πληθυσμό κάτω των 2000 κατοίκων.
6. Περιοχές εντός ορίων Οικοδομικών Συνεταιρισμών Α ή Β κατοικίας.
7. Περιοχές ιδιωτικής πολεοδόμησης για οικιστική χρήση.
8. Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε αεροδρόμια όπως αναφέρεται στη σχετική Νομοθεσία.
9. Περιοχές για τις οποίες ισχύει ειδική ή γενική απαγορευτική διάταξη, που αφορά και σε θέματα Εθνικής Άμυνας και ασφάλειας.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ελάχιστων αποστάσεων ενός χώρου αστικών απορριμμάτων, είναι οι παρακάτω (Καββαδάς, 2007):

1. Ελάχιστη απόσταση 300 μέτρων από λίμνες.
2. Ελάχιστη απόσταση 100 μέτρων από ποταμούς.
3. Απαγόρευση κατασκευής ΧΥΤΑ σε περιοχές που υπάρχει πιθανότητα να πλημμυρίζουν.

4. Ελάχιστη απόσταση 300 μέτρων από εθνικές οδούς, εθνικά πάρκα κλπ.
5. Απαγόρευση κατασκευής χώρων ταφής απορριμμάτων σε προστατευόμενους βιοτόπους και υδροβιότοπους.
6. Ελάχιστη απόσταση 3.000 μέτρων από αεροδρόμια που χρησιμοποιούνται από αεριωθούμενα αεροσκάφη και 1.500 μέτρα από αεροδρόμια που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από ελικοφόρα αεροσκάφη.
7. Ελάχιστη απόσταση 400 μέτρων από πηγάδια υδρεύσεως.
8. Ελάχιστη απόσταση 60 μέτρων από τεκτονικά ρήγματα τα οποία εκτιμάται ότι έχουν ενεργοποιηθεί κατά το Ολόκαινο.

Παρακάτω, αναπτύσσονται τα κριτήρια και οι απαιτήσεις για την δημιουργία ενός χώρου διάθεσης αποβλήτων, ωστόσο αυτά πρέπει να επανεκτιμούνται και να αξιολογούνται από τους εκάστοτε υπεύθυνους φορείς.

Αναλυτικά τα κριτήρια είναι τα εξής (Σκορδίλης 2001):

1. Γεωλογικά – Υδρογεωλογικά και Υδρολογικά
 - Μορφολογία εδάφους(σύνθεση ποιότητας εδάφους, διάβρωση, ανάγλυφο)
 - Υδροπερατότητα
 - Τεκτονικά χαρακτηριστικά
 - Σεισμικότητα
 - Υπόγεια νερά
 - Επιφανειακά νερά
2. Περιβαλλοντικά
 - Αλλοίωση της εικόνας του φυσικού τοπίου
 - Επιπτώσεις στα ζώα και φυτά
 - Επιπτώσεις στα νερά
 - Επιπτώσεις στον αέρα
 - Επιπτώσεις στο έδαφος

- Αισθητική κατάσταση

3. Χωροταξικά

- Απόσταση από κατοικημένες περιοχές
- Απόσταση από περιοχές ιδιαίτερου κάλους και προστασίας (αρχαιολογικοί χώροι, βιότοποι, κλπ.)
- Απόσταση από τουριστικές περιοχές
- Απόσταση από περιοχές με ειδικές καλλιέργειες
- Απόσταση από ευαίσθητες βιομηχανίες – βιοτεχνίες (τροφίμων, φαρμάκων)
- Απόσταση από αεροδρόμια
- Απόσταση από το οδικό ή/και το σιδηροδρομικό δίκτυο
- Δυνατότητα πρόσβασης

4. Γενικά

- Δυνατότητα καλύτερης κοινωνικής αποδοχής
- Βροχοπτώσεις – κατακρημνήσεις
- Άνεμοι
- Θερμοκρασίες
- Επιφάνεια και όγκος του χώρου
- Ιδιοκτησιακό καθεστώς
- Υλικό επικάλυψης

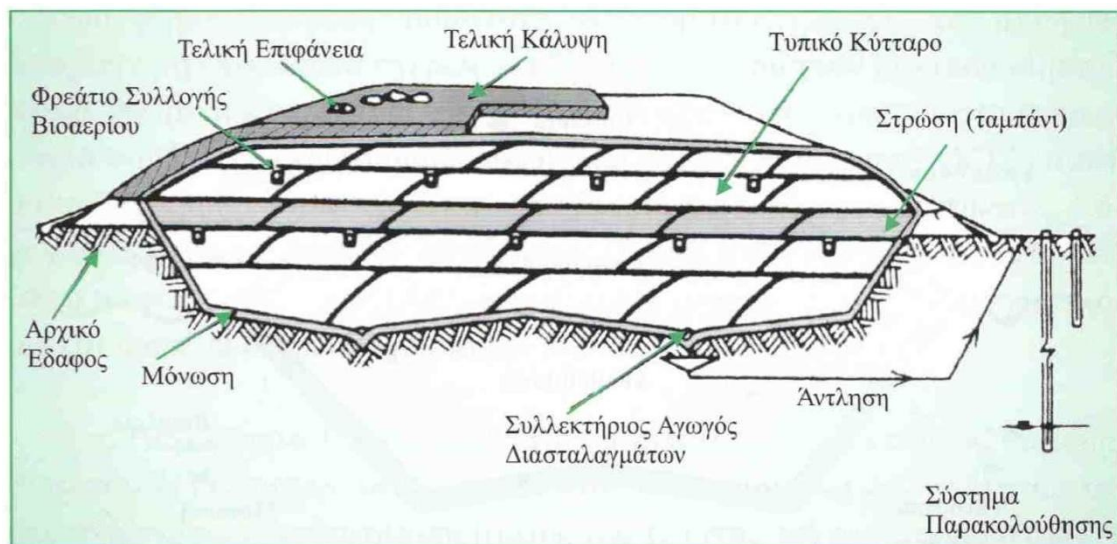
5. Οικονομικά

- Απόκτηση σε έργο υποδομής
- Αξία γης
- Κόστος συλλογής – μεταφοράς

2.2. Διαμόρφωση κυττάρων

Το βασικό δομικό στοιχείο και χαρακτηριστικό της υγειονομικής ταφής είναι το κύτταρο. Αποτελείται από τα απόβλητα μιας επαναλαμβανόμενης χρονικής περιόδου (συνήθως μιας ημέρας), συμπιεσμένα και καλυμμένα με λεπτή στρώση εδαφικού ή άλλου κατάλληλου υλικού συγκεκριμένων προδιαγραφών. Μια οριζόντια σειρά από κύτταρα, όλα του ίδιου ύψους ονομάζεται στρώση ή ταμπάνι.

Ο κυρίως ΧΥΤΑ αποτελείται από ένα αριθμό τέτοιων πλήρων στρώσεων όπως δείχνει και το **Σχήμα 2.2** (Παναγιωτακόπουλος 2007)



Σχήμα 2.2: Δομή και Κύρια χαρακτηριστικά ενός Χ.Υ.Τ.Α.
(Παναγιωτακόπουλος 2007)

Τα «φρέσκα» απορρίμματα διαστρώνονται με χαμηλές κλίσεις πάνω στη ανοιχτή πλευρά του ενεργού κυττάρου και στη συνέχεια συμπιέζονται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το ύψος του κυττάρου.

Η ημερήσια κάλυψη (πάχους περίπου 15 – 20cm) του κυττάρου υποτίθεται ότι παραμένει εκτεθειμένη όχι περισσότερο από μία εβδομάδα, πριν τοποθετηθούν πάνω της νέα απόβλητα. Στόχοι της ημερήσιας κάλυψης είναι ο έλεγχος των οσμών, της διασποράς ελαφρών υλικών με τον αέρα, των πυρκαγιών, των πουλιών και των τρωκτικών. Η οριζόντια κάλυψη του κυττάρου, εφόσον είναι

κάλυψη της στρώσης και παραμένει εκτεθειμένη για μερικούς μήνες, έχει μεγαλύτερο πάχος περίπου 20 – 30cm.

Οι διαστάσεις των κυττάρων καθορίζονται από τον όγκο των συμπιεσμένων αστικών αποβλήτων ανά περίοδο. Η τελική πυκνότητα κυμαίνεται από 300 – 1.200 kg/m³, ανάλογα με το σύστημα συμπίεσης και τη σύνθεση.

Δεδομένων του ύψους του κυττάρου, του πλάτους του μετώπου εργασίας και το μήκος του κυττάρου προσδιορίζεται από την εισερχόμενη ημερήσια παραγωγή και το βαθμό συμπίεσης. Όταν οι ημερήσιες ποσότητες είναι μεγάλες, τότε για αποφυγή υπερβολικά μεγάλων κυττάρων, μπορούμε να έχουμε δύο ή και περισσότερα ενεργά κύτταρα, σε διαφορετικά σημεία, εντός του ευρύτερου χώρου του ΧΥΤΑ (Παναγιωτακόπουλος 2007).

2.3. Σύστημα συλλογής και επεξεργασίας στραγγισμάτων

Το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων αποτελεί παράγοντα σπουδαίας σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος σε ένα χώρο ελεγχόμενης εναπόθεσης στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων.

Το υλικό (χαλίκι) πρέπει να είναι στρογγυλεμένο (τουλάχιστον κατά 75%) και ξεπλυμένο. Απαιτείται να είναι χημικώς και μηχανικώς σταθερό και η περιεκτικότητά του σε ασβέστιο να μην ξεπερνά κατά βάρος το 20%. Ο συντελεστής υδροπερατότητας της ζώνης αποστράγγισης κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10⁻² m/sec και η κλίση της ζώνης να μην ξεπερνά το 2%.

Η ζώνη αποστράγγισης τοποθετείται πάνω από τη μόνωση και κάτω από τα στερεά απόβλητα. Το πάχος της ζώνης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,50 m και για την κατασκευή της χρησιμοποιείται υλικό διαμέτρου 6/32.

Η τοποθέτηση της ζώνης αποστράγγισης πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκληθούν βλάβες παραμόρφωσης στη ζώνη προστασίας και κατά

συνέπεια στη μεμβράνη. Παράλληλα όμως να διευκολύνεται η συλλογή των στραγγισμάτων.

Ο έλεγχος της ζώνης αποστράγγισης μπορεί να γίνει σε δύο φάσεις. Πρώτα έλεγχος του υλικού πριν την τοποθέτησή του και επιτόπιος δειγματοληπτικός έλεγχος της ζώνης αποστράγγισης.

Το υλικό εξετάζεται ως προς την κοκκομετρία του (DIN 18123), την περιεκτικότητά του σε ανθρακικό ασβέστιο (DIN 18129), τη μορφή του (DIN 52144) και την αντοχή του (DIN 52115). Ως προς τον επιτόπιο δειγματοληπτικό έλεγχο του υλικού λαμβάνεται δείγμα ανά 5000 m², ενώ ελέγχεται το πάχος της στρώσης ανά 1000 m².

Μεταξύ της ζώνης αποστράγγισης και της ζώνης προστασίας της μεμβράνης μπορεί να τοποθετηθεί γεώφασμα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ανάμειξη των δύο υλικών (Obrike, Osadebe and Omoniye, 2009).

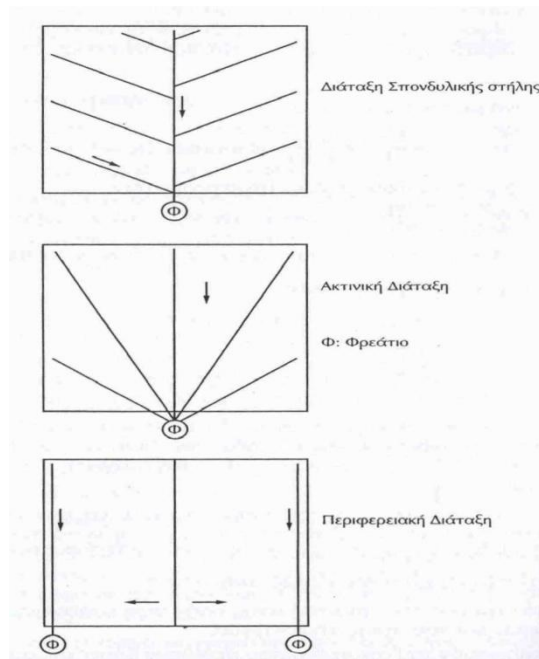
Η συλλογή και μεταφορά των στραγγισμάτων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα στραγγίσματα χωρίς δυσκολία να οδηγούνται στα φρεάτια και κατόπιν στη μονάδα επεξεργασίας. Οι αγωγοί πρέπει να έχουν κυκλική διατομή, να είναι ανθεκτικοί σε χημικές ουσίες, σταθεροί και υδραυλικά αποδοτικοί.

Οι οπές ή σχισμές των αγωγών καλύπτουν τα 2/3 της επιφάνειάς τους και η ελάχιστη εσωτερική τους διάμετρος να είναι 150 mm. Η κλίση των αγωγών πρέπει να είναι τουλάχιστον 2,5%.

Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 40 m, ενώ ανά διαστήματα (τουλάχιστον 300 m), πρέπει να κατασκευάζεται φρεάτιο ελέγχου. Η διάταξη των αγωγών μπορεί να είναι σε σχήμα σπονδυλικής στήλης ή ακτινική ή περιφερειακή (βλέπε **Σχήμα 2.3**) (Σκορδύλης, 2001).

Η επεξεργασία στραγγισμάτων επιτυγχάνεται με φυσικές, χημικές και βιολογικές μεθόδους. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου πρέπει να βασίζεται σε μια σειρά περιβαλλοντικών, οικονομικών και τεχνικών κριτηρίων. Αναφορικά οι

κυριότερες από αυτές είναι η βιολογική επεξεργασία, η προσρόφηση με ενεργό άνθρακα, η φωτοκαταλυτική οξείδωση και ο συνδυασμός χημικής – φυσικής και βιολογικής επεξεργασίας.



Σχήμα 2.3: Τεχνικές διατάξεις σωληνώσεων αποστράγγισης
(Σκορδίλης 2007)

2.4. Σύστημα συλλογής, μεταφοράς και διάθεσης βιοαερίου

Ο πρωταρχικός στόχος των συστημάτων συλλογής των αερίων είναι η μείωση των εκπομπών επικίνδυνων ουσιών, οι οποίες βρίσκονται στο βιοαέριο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου πρέπει το σύστημα να πληρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις. Αυτές είναι ο μεγάλος βαθμός συλλογής αερίου, η μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, η αντοχή στις συνθήκες λειτουργίας, η αποφυγή της δημιουργίας εκρηκτικού μίγματος αέρα/αερίου και η καλή δυνατότητα ρύθμισης των συλλεκτών.

Σήμερα υπάρχουν δύο συστήματα συλλογής – μεταφοράς του βιοαερίου, το παθητικό και το ενεργητικό σύστημα. Το παθητικό σύστημα απαερίωσης, κατά το οποίο η συλλογή και μεταφορά του βιοαερίου διεξάγεται με την δική του πίεση,

εφαρμόζεται σε παλαιούς χώρους εναπόθεσης στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων. Στο ενεργητικό σύστημα η απαερίωση σε εγκαταστάσεις οι οποίες λειτουργούν με υποπίεση. Σε ένα ενεργητικό σύστημα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αποτελεσματική υποπίεση σε όλο τον χώρο, στην ελαχιστοποίηση της άντλησης αέρα, το σύστημα να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να αντέχει όχι μόνο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του χώρου αλλά και κατά την μετέπειτα φροντίδα και τέλος, η δυναμικότητα του να ανταποκρίνεται στην παραγωγή του βιοαερίου (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

2.5. Μόνωση του ΧΥΤΑ

Το σύστημα μόνωσης των χώρων ελεγχόμενης εναπόθεσης ΣΜΕΑ (Στερεά Μη Επικίνδυνα Απόβλητα) αποτελεί βασικό παράγοντα σωστής λειτουργίας και προϋπόθεση για τις όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον (Σκορδίλης, 2001).

Ένα σύστημα μόνωσης μιας εγκατάστασης αποτελείται από τρία μέρη:

- A) τη μόνωση της βάσης
- B) τη μόνωση της επιφάνειας και
- Γ) τη μόνωση των πρανών ή τοιχείων.

Μια μόνωση πρέπει να πληρεί τις εξής προϋποθέσεις:

- 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 τοποθετείται σωστά.
- Να μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη λειτουργία.

- Να μπορεί εύκολα να επιδιορθωθεί και τέλος
- Να μην κοστίζει υπερβολικά.

Η μόνωση της βάσης με ορυκτά είναι αρκετά διαδεδομένη αρκεί η υδροπερατότητα (K) να κυμαίνεται από 10^{-8} έως 10^{-10} m/s. Η μόνωση με ορυκτά υλικά αποτελείται από άργιλο ή μπετονίτη, ή συνδυασμό ενός, δύο ή τριών υλικών (αργίλου, μπετονίτη, ιπτάμενης τέφρας, θηραϊκής γης, ή υδρυάλου ή ασφάλτου).

2.5.1. Αργιλική μόνωση

Προϋποθέσεις και συμπεριφορά

Η άργιλος χρησιμοποιείται συνήθως ως γεωλογικός φραγμός σε χώρους υγειονομικής ταφής εξαιτίας της χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητάς του. Σε γενικές γραμμές, στους χώρους υγειονομικής ταφής τα καλύμματα ελαχιστοποιούν την διήθηση του νερού στα θαμμένα απόβλητα και τον έλεγχο των στραγγισμάτων από τα απόβλητα (Al-Rawas, και συν., 2006).

Η αργιλική μόνωση πρέπει να έχει συντελεστή υδροπερατότητας (k) τουλάχιστον 1×10^{-9} m/s. Μερικές προϋποθέσεις ως προς την σύνθεση της αργιλικής μόνωσης είναι (Παναγιωτακόπουλος 2007):

1. Το ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό (2 μ m) να είναι τουλάχιστον 20%.
2. Ο οργανικός άνθρακας (TOC) στο σύνολο του να μην υπερβαίνει το 5% κατά βάρος και η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο το 20% κατά βάρος.
3. Όρια Atterberg
 - a) Η υδαρότητα της αργίλου να μην ξεπερνά το 40% κατά βάρος.
 - b) Ο δείκτης πλαστικότητας (PL) να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25%. Σε περίπτωση που ο δείκτης πλαστικότητας υπερβαίνει το 30% το υλικό δεν δουλεύεται εύκολα.

4. Ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού με διάμετρο κόκκων κάτω από $2\mu\text{m}$ δηλαδή $\geq 20\%$ κατά μάζα
5. Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου $\leq 20\%$
6. Ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού (διάμετρος $\leq 32\text{ mm}$) $\leq 40\%$ επί του ολικού όγκου.

Η ροή των υγρών μέσα στην αργιλική στρώση περιγράφεται από το νόμο του Darcy. Προϋπόθεση όμως για την αξιολόγηση της αργιλικής μόνωσης είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υγρών και του μονωτικού υλικού (απορρόφηση, προσρόφηση, ιονοανταλλαγή, φαινόμενα καθίζησης καθώς και φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες).

Οι δείκτες του μονωτικού υλικού που μπορούν να επηρεάσουν την λειτουργία της μόνωσης είναι:

- Η υδροπερατότητα
- Η χωροταξική κατανομή των σωματιδίων
- Η προσροφητικότητα και απορροφητικότητα των επικίνδυνων ουσιών
- Η καταλυτική αντίδραση των οργανικών στο υλικό.

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

Τεχνικές προδιαγραφές αργιλικής μονωτικής στρώσης

Κατ' αρχήν, για την διαμόρφωση του εδάφους η φυσική επιφάνειά του καθαρίζεται, εξομαλύνεται και συμπιέζεται. Ο βαθμός συμπίκνωσης όλης της επιφάνειας εξομάλυνσης πρέπει να είναι $D_{Pr} = 0,95$.

Σε καμία περίπτωση η αργλική μόνωση δεν πρέπει να τοποθετηθεί, αν η απόσταση της επιφάνειας εξομάλυνσης από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρότερη από 1 m.

Οι σπουδαιότεροι παράμετροι στην κατασκευή της αργλικής μόνωσης είναι οι παράγοντες της συμπίεσης: περιεκτικότητα σε νερό, ο τρόπος συμπίκνωσης, το μέγεθος των κόκκων και η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων (τοποθέτηση μίας στρώσης πάνω στην άλλη) (Σκορδίλης 2001).

Όταν η άργιλος δεν έχει την κατάλληλη υγρασία σχηματίζει σβώλους αποτελεσμα κατά την συμπίκνωση ένα μέρος από αυτούς να μην σπάσει και να δημιουργηθούν κενά στο στρώμα της μόνωσης.

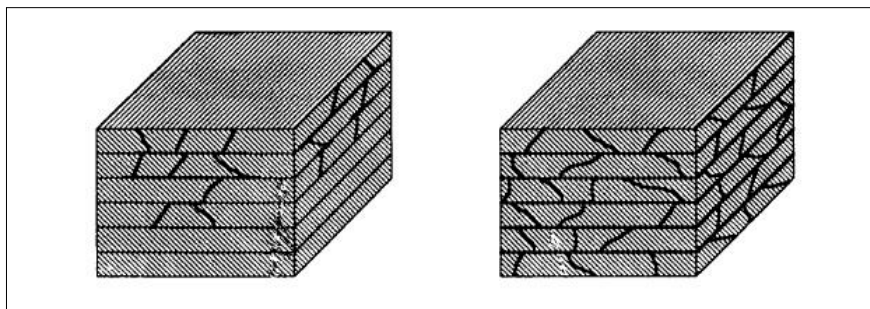
Η περιεκτικότητα σε υγρασία (W) κατά την τοποθέτηση πρέπει να είναι κατά 2% υψηλότερη από την βέλτιστη υγρασία του υλικού κατά Proctor (W_{pr}) δηλαδή:

$$W_{pr} \leq W \leq W_{0.95 Pr} \quad [2.1]$$

όπου, $W_{0.95 Pr}$: περιεκτικότητα υγρασίας σε 0,95 Pr .

Το ύψος της μονωτικής στρώσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,5 m και τοποθετείται στον πυθμένα σε τουλάχιστον 2 οριζόντιες στρώσεις. Για την αποφυγή της περατότητας μεταξύ μιας ζώνης με την επόμενη πρέπει η επιφάνεια της κάτω στρώσης να μην είναι λεία.

Η τελική επιφάνεια της συμπυκνωμένης αργλικής στρώσης θα πρέπει να καλύπτεται ταχέως, ώστε να αποφεύγεται η ξήρανση και η ως εκ τούτου



Σχήμα 2. 4: Τυπική ξήρανση των επάλληλων στρώσεων συμπυκνωμένης αργλικής μεμβράνης

ρωγμάτωσή της όπως στο Σχήμα 2.4 (Καββαδάς 2007).

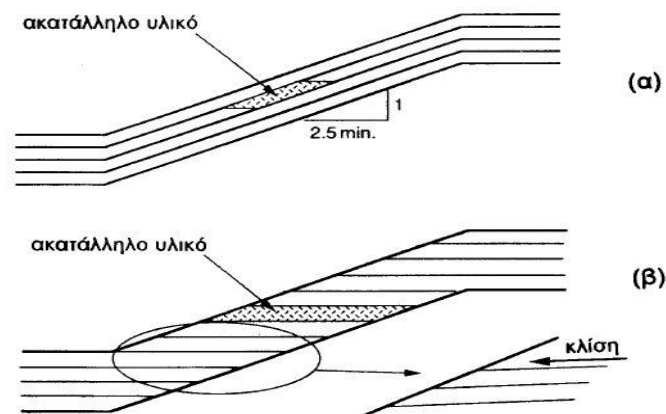
Αν δεν διατίθενται κατάλληλα αργιλικά υλικά, μπορεί να γίνει ανάμειξη των διαθέσιμων υλικών με μπετονίτη, ή άλλα επεξεργασμένα υλικά, ή/και να χρησιμοποιηθούν συνθετικά και να κατασκευαστεί η μονωτική στρώση.

Σε κάθε περίπτωση, η στρώση πρέπει να έχει συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας μικρότερο του 1×10^{-9} m/sec, και ισοδυναμία ως προς το πάχος, όπως θα αποδεικνύεται από επαρκή αριθμό δοκιμών που γίνονται από αναγνωρισμένα εργαστήρια.

Ο εργαστηριακός έλεγχος της καταλληλότητας υλικών της αργιλικής στρώσης περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον τα εξής:

- Κατάταξη υλικού (κοκκομετρική διαβάθμιση, υγρασία, ποσοστά αργιλικού και οργανικού υλικού, όρια πλαστικότητας)
- Διατμητική αντοχή
- Πυκνότητα κατά Proctor
- Υδροπερατότητα

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά τη συμπύκνωση της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στις παρειές του αποδέκτη στερεών αποβλήτων (Σχήμα 2.5). Η συμπύκνωση σε οριζόντιες στρώσεις δεν συνιστάται, επειδή γενικώς 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 δίδεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η διεπιφάνεια μεταξύ των επάλληλων στρώσεων να έχει κλίση προς το εσωτερικό του αποδέκτη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι διαφυγές του υγρού στραγγίσματος εκτός του αποδέκτη.



Σχήμα 2.5: Συμπύκνωση αργιλικής μεμβράνης στις παρειές του αποδέκτη αποβλήτων (α) παράλληλα με την κλίση του πρανούς και (β) σε οριζόντιες στρώσεις

Ισχύουσα νομοθεσία για την αργιλική μονωτική στρώση

Σύμφωνα με την εφημερίδα της κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας στα πλαίσια των προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, εμπεριέχονται οι κοινώς αποδεκτές τιμές για τα συστήματα μόνωσης των ΧΥΤΑ και ειδικότερα για την αργιλική μονωτική στρώση (ΦΕΚ 1016, 1997).

Ο συντελεστής υδροπερατότητας τόσο στον πυθμένα όσο και στα περιμετρικά πρανή πρέπει να είναι μικρότερος από $1 \cdot 10^{-9}$ m/s και να ελέγχεται, πριν την κατασκευή, με επαρκή αριθμό δοκιμών.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις ως προς τα εδαφικά υλικά προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω συντελεστής υδροπερατότητας είναι:

- Το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού να αντιστοιχεί στο 20% κατά μάζα κατ' ελάχιστον. Το ποσοστό του οργανικού υλικού δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 5% κατά βάρος και του ανθρακικού ασβεστίου το 20%.
- Η αργιλική μονωτική στρώση πρέπει να έχει χαμηλά όρια Atterberg με σκοπό τον κατά δυνατόν περιορισμό της ρωγμάτωσης. Το όριο υδαρότητας της αργίλου να μην ξεπερνά το 40% και ο δείκτης πλαστικότητας να κυμαίνεται μεταξύ 10 – 25%.

- Το ποσοστό του χονδρόκοκκου υλικού της στρώσης, η διάμετρος του οποίου δεν θα ξεπερνά τα 32mm, πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με 40% επί του ολικού όγκου.

Όσον αφορά την κατασκευή της αργιλικής μονωτικής στρώσης τα ΦΕΚ ορίζουν ότι:

- Επί της υποκείμενης επιφάνειας εξομάλυνσης τοποθετείται συμπυκνωμένη η αργιλική μονωτική στρώση, σε δυο επάλληλες οριζόντιες στρώσεις των 0.25 μέτρων.
- Η διάστρωση πραγματοποιείται μόνο όταν το επιτρέπουν οι καιρικές συνθήκες.
- Προκειμένου να κατασκευαστεί η νέα στρώση πρέπει η προηγούμενη να είναι σχετικά τραχεία.
- Η επιφάνεια της τεχνητής μόνωσης πρέπει να είναι ομοιογενής και ομοιόμορφη.
- Το υλικό μόνωσης πυθμένα και περιμετρικών πρανών συμπυκνώνεται επιτόπου με κατάλληλους στατικούς ή δονητικούς συμπίεστρες.
- Κατά τη συμπίκνωση το αργιλικό υλικό η φυσική υγρασία του είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη βέλτιστη (κατά 2-3%), που κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το πάχος και την έκταση της στρώσης.
- Ο δείκτης συμπίκνωσης της αργιλικής στρώσης να είναι τουλάχιστον 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας Proctor.
- Η συμπίκνωση των επάλληλων στρώσεων γίνεται εντός μικρού χρονικού διαστήματος, ώστε να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεση της επιφάνειας της μόνωσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Για την αποφυγή της ρηγμάτωσης η τελική ή ενδιάμεση επιφάνεια της στρώσης διαβρέχεται

περιοδικά. Δεν επιτρέπονται εργασίες συμπύκνωσης μετά από παγετό ή έντονη βροχόπτωση.

- Η συμπύκνωση της αργιλικής μονωτικής στρώσης στα πρανή του ΧΥΤΑ γίνεται σε τρώσεις οριζόντιες ή παράλληλες προς το πρανές και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες οι ελάχιστες απαιτήσεις είναι (Καββαδάς, 2007):

- Γαλλία: Για αποδέκτες αστικών μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων οι περιορισμοί είναι λιγότερο αυστηροί και περιλαμβάνουν:

1. Υπόβαση του πυθμένα από γαιώδη υλικά πάχους τουλάχιστον 5 m με υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη από 10^{-6} m/s.

2. Τελική κάλυψη της επιφάνειας με υλικό μικρής διαπερατότητας.

- Γερμανία: Σύνθετη στεγανωτική στρώση στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή του αποδέκτη, η οποία να αποτελείται από:

- (α) μια συνθετική γεωμεμβράνη από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE)

- (β) μια στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους 0.75 m με συντελεστή διαπερατότητας μικρότερο από 5×10^{-10} m/s.

Επίσης προβλέπεται η κατασκευή στρώσης συλλογής και απαγωγής του υγρού στραγγίσματος και του βιοαερίου και η τελική κάλυψη του αποδέκτη μετά την πλήρωσή του.

- Βρετανία: Στη Βρετανία δεν υπάρχουν συγκεκριμένες ελάχιστες απαιτήσεις των κανονισμών για τους αποδέκτες στερεών αποβλήτων, αλλά το κάθε συγκεκριμένο έργο σχεδιάζεται με βάση το είδος των αποβλήτων που πρόκειται να δεχθεί τις τοπικές γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, την πιθανότητα ρύπανσης του

περιβάλλοντος και τις πιθανές επιπτώσεις από την ενδεχόμενη ρύπανση (δηλαδή την απόσταση από εκμεταλλεύσιμους υδροφορείς, κατοικημένες περιοχές κλπ). Πάντως, συνήθως, η στεγάνωση του πυθμένα των αποδεκτών αστικών απορριμμάτων γίνεται μέσω σύνθετης γεωμεμβράνης που αποτελείται από συνθετική μεμβράνη πολυαιθυλενίου (HDPE) πάχους 1-2 mm και στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους ενός μέτρου ($k < 10^{-9}$ m/s). Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, πάνω από τη στεγανωτική μεμβράνη κατασκευάζεται στρώση αποστράγγισης και σύστημα συλλογής και απαγωγής του στραγγίσματος.

2.5.2. Μόνωση με συνδυασμό ορυκτών υλικών και γεωμεμβράνες

Η μόνωση της βάσης με συνδυασμό ορυκτών υλικών είναι αρκετά διαδεδομένη.

Η περατότητα (k) πρέπει να κυμαίνεται από 10^{-8} έως 10^{-10} m/s.

Η ορυκτή μόνωση μπορεί να κατασκευαστεί από συνδυασμό αργίλου ή άμμου με μπετονίτη ή/και άλλα υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα, η θηραϊκή γη ή υδρύαλος. (Σχήμα 2.6)

Για μόνωση με γεωμεμβράνες πρέπει, αυτές να είναι κατασκευασμένες από πολυμερή με υψηλό μοριακό βάρος όπως: θερμοπλαστικά (PVC), υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE), χλωριωμένο πολυαιθυλένιο (CPE) και ελαστομερή.

Οι συνθήκες κατασκευής, η χημική ανεκτικότητα, τα χαρακτηριστικά της αντοχής, η διάρκεια ζωής και η περατότητα είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνητής μόνωσης.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης περιγράφονται στον **Πίνακα 2.1** (Σκορδύλης, 2001).

Πίνακας 2.1: Μηχανικές και άλλες ιδιότητες των γεωμεμβρανών

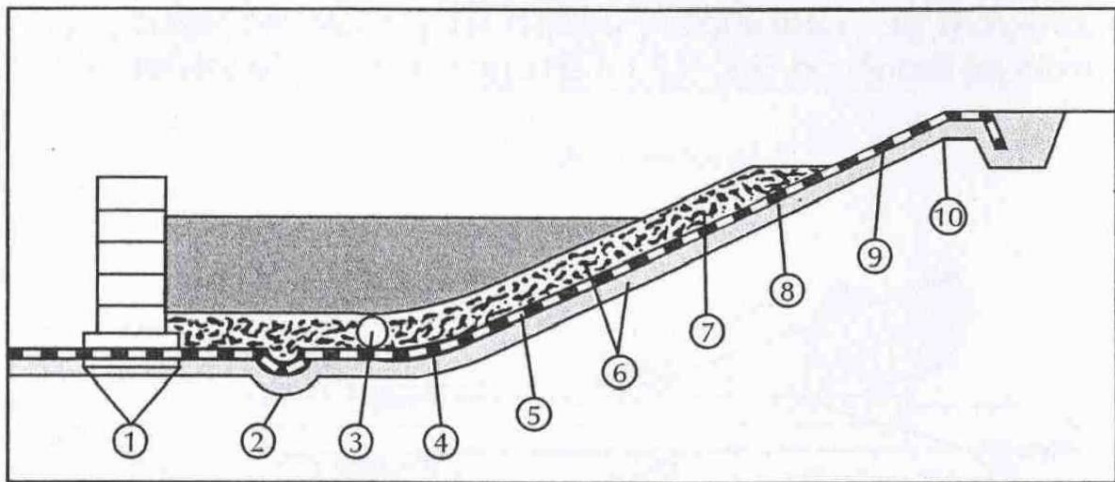
Παράμετρος	Τιμή	DIN Τρόπος	ASTM Εξέτασης
Εξωτερική μορφή	Ξένες προσμίξεις	Οπτικός έλεγχος	
Πάχος	1,5 mm >10%	53370	D 1593
Συμπεριφορά στη θερμοκρασία (ως προς την ύλη)(ως προς τα εξωτερικά χαρακτηριστικά)	± 2% Καμία αλλαγή	53377 Οπτικός έλεγχος	D 746
Συμπεριφορά στο νερό (αλλαγή βάρους)	< 1,0%	53494	
Εφελκυστική αντοχή θραύσης	> 24 N/mm ²	53455	D638
Εφελκυστική αντοχή διαρροής	> 15 N/mm ²	53455	D638
Επιμήκυνση στη θραύση	> 600%		D638
Επιμήκυνση σε διαρροή	0,80%		D638
Αντοχή σε σχίσιμο	> 500 N/mm ²	53457	FTMS 101cm
Αντοχή σε διάτρηση	> 300 N/mm ²	16726	2065
Αντοχή σε εφελκυσμό κατά την θραύση	> 120 N/mm ²	53515	D 3038
Όριο σχισίματος	> 500 N	DIN 53363	
Πολυαξονική επιμήκυνση σε θραύση	> 15%	DIN 53861	

Τα ρολά των γεωμεμβρανών απαιτείται να έχουν μήκος τουλάχιστον 150 m, πλάτος 5 m και πάχος 1,5 mm και να φυλάσσονται σε αποθηκευτικούς χώρους για την προστασία τους. Ιδιαίτερα η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί γήρανση της γεωμεμβράνης.

Πριν την τοποθέτηση της γεωμεμβράνης η επιφάνεια της ορυκτής μόνωσης ή του εδάφους πρέπει να είναι απαλλαγμένη από πέτρες ή άλλα υλικά και η συμπίεση της μόνωσης ή του εδάφους να είναι 95% του οργάνου Proctor.

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση (άνοιγμα του ρολό) ώστε να μην εκδηλωθεί γλίστρημα της γεωμεμβράνης. Οι συγκολλήσεις των μεμβρανών πρέπει να διεξάγονται την ημέρα τοποθέτησης της μεμβράνης. Πριν την συγκόλληση πρέπει να ελέγχεται αν η μεμβράνη είναι καθαρή.

Τα αδύνατα σημεία της γεωμεμβράνης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.6**.



**Σχήμα 2.6: Αδύνατα σημεία γεωμεμβράνης
(Σκορδίλης, 2001)**

- Σημείο 1: Κίνδυνος στην ένωση των φύλλων, στα φρεάτια των στραγγισμάτων και των αερίων (κακή κατασκευή).
Σημείο 2: Υπερβολικό τέντωμα από κακή διαμόρφωση του εδάφους.
Σημείο 3: Κίνδυνος από φορτίο.
Σημείο 4: Κίνδυνος από κακή τοποθέτηση των συστημάτων συλλογής.
Σημείο 5: Δύσκολη συγκόλληση στην κλίση.
Σημείο 6: Σημείο μέγιστης πίεσης των στερεών αποβλήτων.
Σημείο 7: Κίνδυνος από κακή τοποθέτηση του στρώματος φίλτρου των συστημάτων.
Σημείο 8: Ενδεχόμενη απομάκρυνση του στρώματος φίλτρου των συστημάτων συλλογής των στραγγισμάτων.
Σημείο 9: Κίνδυνος από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.
Σημείο 10: Κίνδυνος από το βάρος τους και ενδεχόμενο τράβηγμα των φύλλων.

2.7. Τελική κάλυψη - αποκατάσταση

Σκοπός του συστήματος της τελικής κάλυψης είναι η αποτροπή οποιοδήποτε αρνητικών επιπτώσεων από στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα μιας ελεγχόμενης εναπόθεσης.

Ως προς τις μηχανικές, χημικές και βιολογικές προϋποθέσεις της επιφανειακής μόνωσης ισχύει ότι και για την μόνωση της βάσης. Βέβαια στην επιφανειακή μόνωση πρέπει να λάβει κανείς υπόψη του τις καθιζήσεις που είναι μεγαλύτερες από τη βάση καθώς και το σύστημα συλλογής του βιοαερίου.

Η τελική κάλυψη πρέπει να εξασφαλίζει (Σκορδίλης 2001):

1. Την ελαχιστοποίηση της εισροής ομβρίων στο χώρο
2. Την ικανοποιητική απορροή των βροχοπτώσεων
3. Την αποτροπή κατείσδυσης των κατακρημνίσεων στο εσωτερικό του χώρου
4. Την αποτροπή πλευροδιηθήσεων στα πρανή
5. Την αποτροπή εκπομπών βιοαερίου εκτός του χώρου.

Ένα σύστημα τελικής κάλυψης αποτελείται από:

- a) ένα επιφανειακό στρώμα από χώμα κατάλληλο για φυτεύσεις,
- b) τη ζώνη προστασίας,
- c) τη ζώνη αποστράγγισης,
- d) τη μόνωση, και
- e) τη ζώνη συλλογής του βιοαερίου.

Το πάχος της ζώνης συλλογής βιοαερίου είναι 0,3 m και κατασκευάζεται από υλικό διαμέτρου 4/16 mm, με μέγιστη περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο 10% ανά βάρος.

Η ορυκτή μόνωση (0,5 m) αποτελείται από άργιλο τουλάχιστον κατά 50%. Το λεπτόκοκκο υλικό ($<0,075\mu\text{m}$) πρέπει να είναι πάνω από 20%, η περιεκτικότητα

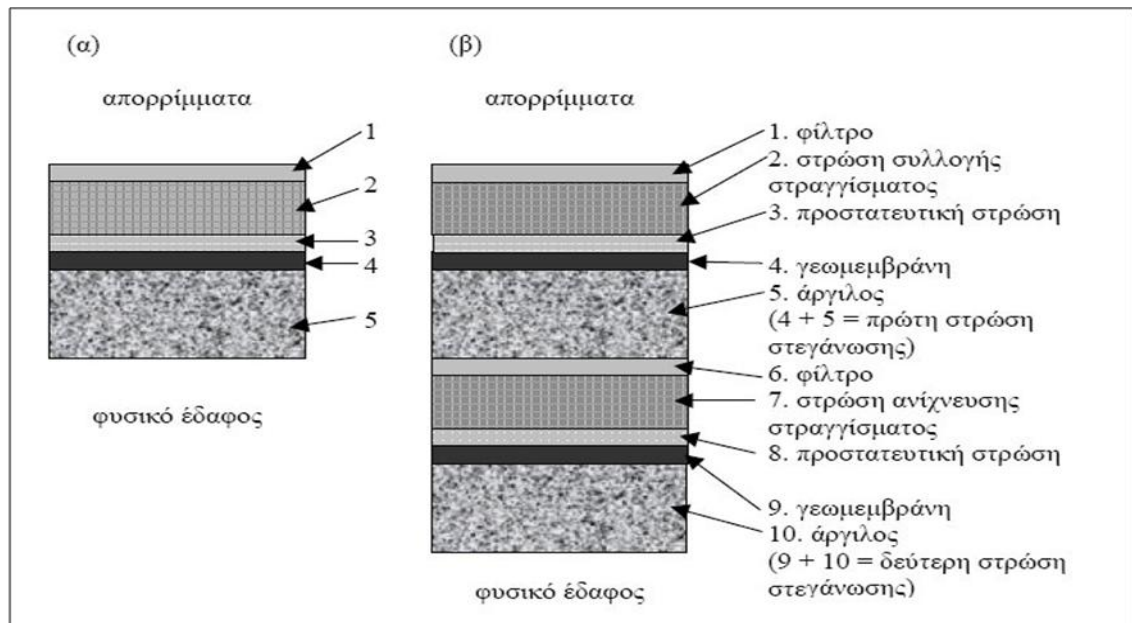
σε ανθρακικό ασβέστιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% και ο οργανικός άνθρακας να αντιστοιχεί σε 10% ανά βάρος.

Η ορυκτή μόνωση πρέπει ακόμα, να είναι ομογενής, η διάμετρος των σβόλων να μην ξεπερνά τα 32 mm και να παρουσιάζει μία πλαστικότητα. Η τοποθέτησή της πρέπει να γίνεται σε δύο φάσεις (ανά 0,25 m).

Ο βαθμός συμπίεσης κατά Proctor πρέπει να είναι $> 95\%$ και ο συντελεστής περατότητας $k = 10^{-9}$ m/s.

Η ορυκτή μόνωση δεν τοποθετείται όταν υπάρχουν βροχοπτώσεις ή υψηλές θερμοκρασίες. Για την ομογενοποίησή της χρησιμοποιούνται ειδικοί αναμίκτες ή φρέζες.

Η επιφάνεια της ορυκτής μόνωσης δεν πρέπει να έχει ανωμαλίες ή παραμορφώσεις και η διάμετρος των υλικών να μην ξεπερνά τα 10 mm. Η απόκλιση στην επίπεδη επιφάνεια δεν πρέπει να ξεπερνά τα ± 2 cm για μήκος 4 m.



Σχήμα 2.7: Διατομή πυθμένα με (α) απλή και (β) διπλή στρώση προστασίας (Οδηγία της ΕΕ)

Από τη διεθνή εμπειρία για την αποκατάσταση και αξιοποίηση των χώρων υγιεινής ταφής και με βάση τα μέχρι σήμερα εφαρμοσμένα μέτρα ανάκτησης, έχουν προκύψει τα παρακάτω πέντε βασικά συστήματα (Σκορδίλης 2001):

1. *Καλυμμένη επιφάνεια*: σε αυτό το σύστημα υπάρχει η δυνατότητα για άμεση δεντροφύτευση μετά την επικάλυψη, με αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας των στραγγισμάτων. Έχει όμως ως μειονέκτημα τα υψηλά έξοδα επικάλυψης και απαερίωσης.
2. *Κυκλικό ανάχωμα*: σε αυτό το σύστημα η συνολική κάλυψη του εδάφους γίνεται σε μορφή αναχωμάτων που κάθε φορά κατασκευάζονται πριν την επίστρωση νέου στρώματος αποβλήτων. Η δημιουργία πράσινου ακολουθεί σταδιακά και άμεσα την επίστρωση ώστε να επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση των αποβλήτων. Το πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει οπτικό τείχος προστασίας, ενώ τα μειονεκτήματα είναι ίδια με το πρώτο μοντέλο και επιπλέον υπάρχει κίνδυνος πτώσης των αναχωμάτων προς το εσωτερικό.
3. *Εγκατάσταση ελεγχόμενης εναπόθεσης με μόνωση στο τελικό στρώμα*: διαφέρει από τα προηγούμενα στην επικάλυψη του τελικού στρώματος. Το τελικό στρώμα μονώνεται με κάλυμμα πηλού ή πλαστικών φύλλων. Η δεντροφύτευση μπορεί να αρχίσει αμέσως μετά την επικάλυψη. Τα έξοδα για τα έργα υποδομής των στραγγισμάτων ελαχιστοποιούνται. Τα μειονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι ο αποκλεισμός της κατασκευής περιφερειακών αναχωμάτων και έτσι η δεντροφύτευση είναι δυνατή μόνο μετά το τέλος της λειτουργίας εγκατάστασης. Τα έξοδα εγκαταστάσεων είναι υψηλότερα από τις τεχνικές 1 και 2.
4. *Ανοιχτή εγκατάσταση ελεγχόμενης εναπόθεσης*: όπως και στην τεχνική 1, κατασκευάζεται ένα «οπτικό τοίχος» από δέντρα. Το τελικό στρώμα αποβλήτων μένει ασυμπίεστο και δεν καλύπτεται με χώμα. Δεν χρειάζονται μέτρα απαερίωσης σε αυτή την τεχνική ενώ τα έξοδα διαμόρφωσης της

επιφάνειας είναι ελάχιστα. Επίσης, δεν υπάρχουν κίνδυνοι διάβρωσης ή πτώσης αναχωμάτων από ανέμους. Τα μειονεκτήματα είναι ότι περιορίζονται οι δυνατότητες αξιοποίησης, όπως για παράδειγμα γεωργικών καλλιεργειών.

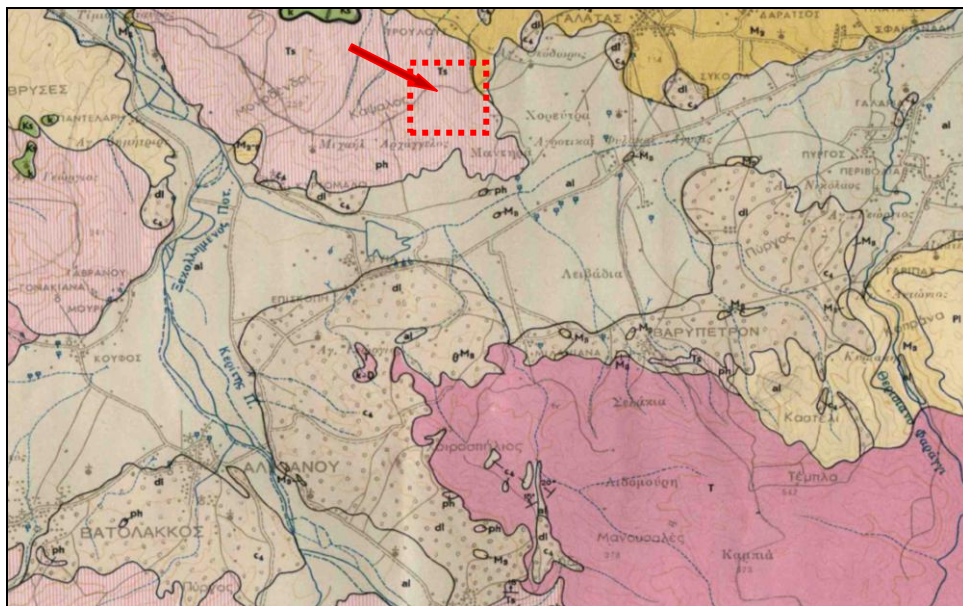
5. *Ημιανοιχτές εγκαταστάσεις ελεγχόμενης εναπόθεσης:* όπως και στην τεχνική 2 κατασκευάζεται ανάχωμα μόνο κάθε δεύτερο στρώμα αποβλήτων, ενώ για τα υπόλοιπα στρώματα αποβλήτων ισχύει ότι και για την 4 τεχνική. Τα έξοδα και η απώλεια όγκου για κάλυψη είναι χαμηλότερα από ότι στην τεχνική 2, αλλά τα στραγγίσματα είναι περισσότερα. Δεν υπάρχουν ακόμα ακριβείς γνώσεις για την βέλτιστη τιμή μεταξύ καλυμμένης επιφάνειας και ανοιχτής επιφάνειας.

Τέλος, η σωστή αποκατάσταση ενός χώρου ελεγχόμενης εναπόθεσης μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα είδη βλάστης . η επιλογή των κατάλληλων ειδών γίνεται από μία σειρά παραμέτρων όπως την δυνατότητα ανάπτυξης των φυτών, την αποφυγή αλλοίωσης των χλωρίδας της περιοχής κ.ά. (Σκορδύλης 2001).

3. ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

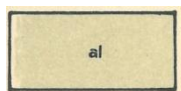
3.1. Γεωλογία περιοχής

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής δειγματοληψίας φαίνεται στον γεωλογικό χάρτη στο **Σχήμα 3.2**.

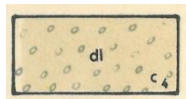


Σχήμα 3.1: Γεωλογία περιοχής ενδιαφέροντος. Απόσπασμα από γεωλογικό χάρτη, κλίμακας 1:50.000 (Τάταρης και Χριστοδούλου 1969)

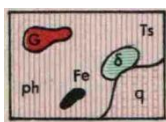
Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2, στην ευρύτερη περιοχή απαντώνται οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί (Τάταρης και Χριστοδούλου 1969):



Σύγχρονες αποθέσεις (al): παράκτιοι ή εντός χειμάρρων καθώς και προσχώσεις.



Ερυθροί σχηματισμοί (di-c4): χειμαρρώδους προελεύσεως από ψαμμιτικές μάργες, πηλούς, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή επικείμενοι των προηγούμενων αποθέσεων. Έχουν σημαντικό πάχος που φτάνει μέχρι το ύψος των 350 και πλέον μέτρων.



Φυλλίτες (ph), γραφιτικοί, χλωριτικοί, ενίοτε αιματιτικοί κ.α. Συνιστούν, κυρίως τα μεσαία έως τα ανώτερα μέλη της σειράς. Σε αυτούς παρεμβάλλονται, ενίοτε αργιλικοί σχιστόλιθοι και ψαμμίτες, καθώς επίσης σημαντικές ενστρώσεις χαλαζιτών (q) και λεπτοστρωματωδών έως απολιθωματοφόρων ανωτριάδικης ηλικίας ασβεστολίθων, ίδια όπως στους μεσαίους και ανώτερους ορίζοντες των φυλλιτών. Περιλαμβάνουν, γύψους (G), καθώς και σώματα βασικών εκρηξιγενών, διαβάσεων κ.α. (δ) (Χωρίον Λάκκοι κ.α.), με τα οποία συνδέονται, ενδεχομένως, οι εμφανίσεις λειμονίτη (Fe) (περιοχή χωριού Κουστογέρακα), ακόμα μικρές εμφανίσεις ολιγίστου.



Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (Ts k-D), σε μεγάλους όγκους, συχνά κυψελώδους υφής, παρεμβάλλονται στους φυλλίτες και γειτονικά παρατηρούνται εμφανίσεις λειμονίτη (Fe).

Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες ανήκουν στην ενότητα Τρυπαλίου. Είναι σχηματισμός επωθήμενος στους πλακώδεις ασβεστόλιθους ή στον μεταφλύσχη. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους παχυστρωματώδεις ή άστρωτους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες με ελάχιστες κερατολιθικές παρεμβολές, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, ραουβάκες και ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή. Η μεγαλύτερη ανάπτυξή του παρατηρείται στα Λευκά Όρη (Νομός Χανίων).

Η ενότητα φυλλιτών – χαλαζιτών είναι επωθημένη στην ενότητα Τρυπαλίου, και αποτελείται από επάλληλους ορίζοντες φυλλιτών, μεταψαμμιτών, χαλαζιτών και σχιστόλιθων, κροκαλοπαγών, φυλλιτικών ασβεστόλιθων, δολομιτών και γύψου. Αναπτύσσεται σε όλη την Κρήτη (Φυτρολάκης, 1980).

Οι πρώτοι που χρησιμοποιούν τον όρο «ενότητα φυλλιτών – χαλαζιτών» είναι οι Creutzburg και Seide (1975). Οι μελετητές αυτοί αναφέρουν ότι με τον όρο «ενότητα φυλλιτών – χαλαζιτών» θέλουν να τονίσουν ιδιαίτερα τον ανεξάρτητο χαρακτήρα της εν λόγω σειράς και δεν εννοούν το σύνολο των στρωμάτων φυλλιτών – χαλαζιτών – αργιλικών σχιστολίθων, τα οποία παρεμβάλλονται, μεταξύ των «πλακωδών ασβεστολίθων της ενότητας Κρήτης – Μάνης και των ασβεστολίθων Τριπόλεως, αλλά την επωθημένη σειρά φυλλιτών – χαλαζιτών, η

οποία βρίσκεται επί πλακωδών ασβεστολίθων, είτε επί του μεταφλύσχη, είτε επί της ενότητας Τρυπαλίου (επί των ασβεστόλιθων ή των υπερκείμενων φυλλιτών).

Τα νεογενή και πλειο-πλειστοκαινικά ιζήματα αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις και το πάχος τους είναι πολλές φορές αρκετά μεγάλο. Αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, λιμναίας, ποτάμιας και θαλάσσιας φάσης.

Τα τεταρτογενή ιζήματα. Είναι τοποθετημένα πάνω σε 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.

Το γεωυλικό του οποίου διερευνήθηκε η καταλληλότητα για κατασκευή τάπητα σε ΧΥΤΑ προέρχεται από την σειρά φυλλιτών – χαλαζιτών, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι επωθημένη είτε απευθείας επί της ενότητας Τρυπαλίου, είτε επί των κατώτερων στρωματογραφικά στρωμάτων (πλακώδεις ασβεστόλιθοι ή μεταφλύσχης) της ενότητας Κρήτης – Μάνης.

Έγινε προσπάθεια εντοπισμού φυλλιτών σε μεγάλη ανάπτυξη μέσα στην ενότητα φυλλιτών χαλαζιτών που αναπτύσσεται δυτικά των Χανίων, δεδομένου ότι ο φυλλίτης είναι ο πλέον κατάλληλος γεωλογικός σχηματισμός της περιοχής για χρήση του στην κατασκευή αργιλικού τάπητα σε Χ.Υ.Τ.Α. και πολλές φορές εκδηλώνεται η διάθεση τοπικών φορέων να χρησιμοποιήσουν το σχηματισμό αυτό σε ανάλογες χρήσεις.

Ο εντοπισμός όμως κατά πλείστον αργιλικού υλικού, κατέστη δυσχερής, και κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η καταλληλότητα γεωυλικού από τον αποσαθρωμένο μανδύα της σειράς Φυλλιτών Χαλαζιτών που αναπτύσσεται στην περιοχή Δυτικά των Χανίων (οικισμός Μυλωνιανών) Βόρεια - Βορειανατολικά των πηγών της Αγιάς (Φυτρολάκης, 1980).

4. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τον προσδιορισμό: α) της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων, β) της συγκέντρωσης οργανικού άνθρακα, γ) της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων δ) της συγκέντρωσης του ανθρακικού ασβεστίου.

Πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της καταλληλότητας του υλικού για χρήση του ως γεωλογικό φραγμό δεδομένου, ότι οι χημικές ουσίες που περιέχονται στα υγρά στραγγίσματα μπορούν να προσβάλλουν τη συμπυκνωμένη αργιλική μόνωση και να μεταβάλουν τις ιδιότητές της, όπως για παράδειγμα να αυξήσουν τη διαπερατότητα ή να τη διαβρώσουν πλήρως (Καββαδάς, 2007).

4.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης του υπό εξέταση εδαφικού αργιλικού δείγματος πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων-X (XRD, X-RAY Diffraction Analysis) τύπου D8-advance της εταιρείας Brucker AXS του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου D8-advance της εταιρείας Brucker AXS του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης

4.1.1. Πειραματική διαδικασία

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-X πάνω στους κρυστάλλους του ορυκτού. Ο Bragg ερμήνευσε, την περίθλαση των ακτίνων-X στους κρυστάλλους σαν ανάκλαση τάξης n των ακτίνων-X, μήκους κύματος λ , οι οποίες προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία(θ) στα πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου (Κωστάκης, 1999).

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-X, καθίστανται δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκευάσμα κρυσταλλικής κόνεως (Κωστάκης, 1999). Για την προετοιμασία του δείγματος, χρειάστηκαν 20gr εδαφικού δείγματος τα οποία λειοτριβήθηκαν με την χρήση γουδιού αχάτη, έτσι ώστε να προκύψει δείγμα υπό την μορφή πούδρας.

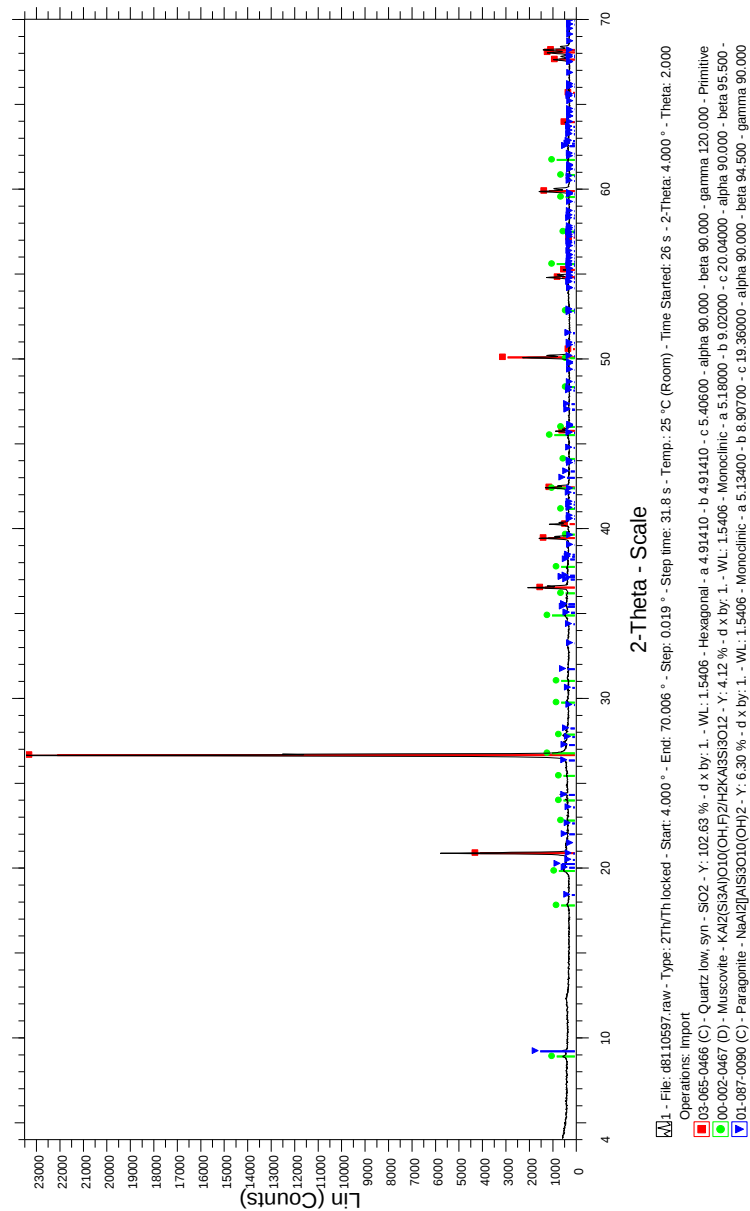
4.1.2. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ημιποσοτικού ορυκτολογικού προσδιορισμού που έγιναν σε 3 δείγματα:

Πίνακας 4.1: Ορυκτολογική ανάλυση (αποτελέσματα ημιποσοτικού προσδιορισμού)

Ορυκτολογική φάση	Ποσοστό (%) κατά βάρος			
	Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3	Μ.Ο.
Χαλαζίας (SiO_2)	91	77	81	83
Μοσχοβίτης [$\text{KAl}_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$]	9	8	10	9
Παραγονίτης [$\text{NaAl}_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$]	0	15	9	8

Επίσης, στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμέτρου για το Δείγμα Α, το ένα από τα τρία δείγματα που εξετάστηκαν, τα υπόλοιπα βρίσκονται στο Παράρτημα Α, **Σχήμα Α.1** και **Α.2**.



Σχήμα 4.1: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμέτρου δείγματος Α

4.2. Προσδιορισμός οργανικού άνθρακα (TOC)

Ο προσδιορισμός του ολικού άνθρακα στηρίζεται στην καύση του δείγματος από το διερχόμενο θερμό ρεύμα O_2 και την παραγωγή οξειδίων (αέρια καύσης) τα οποία οδηγούνται σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα όπου διασπώνται σε άτομα που διαχωρίζονται στη συνέχεια μέσα σε μία χρωματογραφική στήλη, η οποία στο τέλος της συνδέεται με έναν ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας

Η μέτρηση του ολικού άνθρακα έγινε με το όργανο CHNS-O Analyzer, Flash 2000 Organic Elemental Analyzer (**Εικόνα 4.2**).



***Εικόνα 4.2: Στοιχειακός αναλυτής του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας
Υδρογονανθράκων του Πολυτεχνείου Κρήτης***

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής πρότυπα δείγματα:

- Πρότυπο δείγμα: BBOT STANDARD CHNS 2G(BN/144238)
- Πρότυπα δείγματα: EDTA (Leco Cor.) με 2,06% C, 4,10% C και 6,00% C.
- Πρότυπα δείγματα αναφοράς GXR2 και GRX6 πρότυπα εδαφικά δείγματα (Standard References Soil Samples) από την Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ.

4.2.1. Πειραματική διαδικασία

- Αρχικά, τα δείγματα ξηράθηκαν στους 45 °C για 48 ώρες.
- 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 ακόμη HCl.
- Τα δείγματα ξεπλύθηκαν με H₂O μέχρις ότου το pH του διηθήματος να φτάσει σε 5,5 – 6.
- Στην συνέχεια, τα φίλτρα ξηράθηκαν στους 45 °C για 48 ώρες.
- Τέλος, προσδιορίστηκε ο περιεχόμενος ολικός άνθρακας (TOC) σε στοιχειακό αναλυτή μέσω της καύσης των δειγμάτων σε θερμοκρασία > 1000 °C, έμμεσα από την απελευθέρωση του CO₂.

4.2.2. Αποτελέσματα

Στον **Πίνακα 4.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε οργανικό άνθρακα TOC, N, C και H. Χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) δείγματα από το εξεταζόμενο γεωυλικό.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσδιορισμού περιεκτικότητας σε ολικό άνθρακα

Αριθμός δειγμάτων	Περιεκτικότητες (%)			
	N	C	H	TOC
1	0,06	0,50	2,90	0,38
2	0,06	0,20	0,50	0,15
M.O.	0,12	0,35	1,70	0,27

4.3. Εκτίμηση ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (IAK)

Όλα τα κατιόντα και τα ανιόντα, τα οποία μπορούν να ανταλλάσσονται μεταξύ στερεής και υγρής φάσης ή μεταξύ στερεής και υγρής φάσης ενός συστήματος και εφόσον αυτά βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, χαρακτηρίζονται ως ανταλλάξιμα ιόντα (Rhoades, 1982)

Τα ορυκτά της αργίλου, 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 (IAK) του εδάφους εκφράζεται σε χιλιοστοϊσοδύναμα (meq) ανά 100 g εδάφους. Τελευταία όμως εκφράζεται και σε cmol/kg εδάφους (1 meq / 100 g εδάφους ισούται με 1 cmol/kg εδάφους).

Γενικώς, η IAK θεωρείται μία από τις βασικότερες παραμέτρους καθορισμού για την κατασκευή-λειτουργία του ΧΥΤΑ, διότι σε συνάρτηση και με το είδος των απορριμμάτων που θα αποτεθούν θα πρέπει να αλλάζει και το πάχος του αργιλικού μονωτικού στρώματος. Σύμφωνα με την German State Regulation το πάχος της αργιλικής μόνωσης προτείνεται να είναι 3 m, εφόσον η IAK είναι μεγαλύτερη των 10 meq/100g.

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

Κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων IAK (σε meq / 100 g) διαφόρων αργιλικών ορυκτών δίνονται στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικές τιμές ΙΑΚ για pH = 7 (Carroll, 1959)

Ορυκτά	ΙΑΚ (meq / 100 g)
Καολονίτης	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
Glaucosite	11 - 20 +
Όμάδα Polygorskite	20 - 30
Allophane	~ 70

4.3.1. Πειραματικός υπολογισμός - αποτελέσματα

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής (Rhoades 1982):

- Ζυγίζονται 5 g γεωυλικού και τοποθετούνται σε πλαστικό φιαλίδιο των 50 ml. Προστίθενται 33 ml 1 N CH₃COONa.
- Πωμίζονται τα φιαλίδια και ανακινούνται μηχανικώς για 3 λεπτά στις 2500 στροφές / λεπτό, έτσι ώστε το υπερκείμενο υγρό να καταστεί διαυγές. Απομακρύνεται το υπερκείμενο διαυγές υγρό από τα φιαλίδια. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία άλλες 2 φορές.
- Στην συνέχεια προστίθενται 33 ml ισοπροπυλικής αλκοόλης. Πωμίζονται τα φιαλίδια και ανακινούνται μηχανικώς για 5 λεπτά.
- Κατόπιν, φυγοκεντρούνται τα δείγματα για 3 λεπτά στις 2500 στροφές / λεπτό, έτσι ώστε το υπερκείμενο υγρό να καταστεί διαυγές. Απομακρύνεται το υπερκείμενο διαυγές υγρό από τα φιαλίδια. Η παραπάνω διαδικασία γίνεται για την απομάκρυνση της περίσσιας οξικών ή χλωριούχων αλάτων του Na και επαναλαμβάνεται άλλες 2 φορές.

- Κατόπιν, στο δείγμα προστίθενται 33 ml 1N CH₃COONH₄. Πωμίζονται τα φιαλίδια και ανακινούνται μηχανικώς για 5 λεπτά και έπειτα τοποθετούνται στην φυγόκεντρο για 3 λεπτά στις 2500 στροφές /λεπτό, όπως έγινε η διαδικασία και στα προηγούμενα 2 αντιδραστήρια. Αυτή τη φορά όμως το υπερκείμενο διαυγές υγρό συλλέγεται σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές.
- Τέλος, συμπληρώνεται η ογκομετρική φιάλη με οξικό αμμώνιο 1N μέχρι την κατάλληλη χαραγή (100 ml).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής έδωσαν ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων ίση με 87 meq / 100 g δείγματος.

Η τιμή αυτή κρίθηκε υπερβολικά υψηλή, δεδομένης της ορυκτολογικής σύστασης του γεωυλικού. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετα εμπειρικός υπολογισμός της IAK.

4.3.2. Εμπειρικός υπολογισμός – αποτελέσματα

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (σε meq / 100 g δείγματος), εκτός από πειραματικά, προσδιορίστηκε και με τον παρακάτω εμπειρικό τύπο (Breenwsma et al.1984):

$$IAK = 0,7 \cdot f_i + 3,5 \cdot C \quad [4.2]$$

όπου, f_i : ποσοστό (%) του αργιλικού κλάσματος του δείγματος και C : συνολικό ποσοστό (%) του οργανικού άνθρακα του δείγματος.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση [4.2], προκύπτει ότι:

$$IAK = 4,02 \text{ meq / 100 g εδάφους}$$

Η τιμή αυτή κρίθηκε λογική συγκρινόμενη με τις βιβλιογραφικά αναφερόμενες σε ανάλογους ορυκτολογικά σχηματισμούς και ήταν τελικά αυτή που υιοθετήθηκε για το συγκεκριμένο γεωυλικό.

4.4. Προσδιορισμός ανθρακικού ασβεστίου

Ο προσδιορισμός του ασβεστίτη (CaCO_3) έγινε με το ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Frunhling και τις τεχνικές προδιαγραφές κατά ASTM D4373-84. Πρόκειται για σταθμικό προσδιορισμό που πρακτικά σημαίνει ότι στηρίζεται στην επίδραση ενός αντιδραστηρίου σε γνωστή ποσότητα του δείγματος.

Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός του ασβεστίτη στηρίζεται στη μέτρηση του όγκου του CO_2 που εκλύεται από την επίδραση διαλύματος υδροχλωρικού οξέος στο δείγμα, σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν:

- Ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Frühling.
- HCl οξύ 1:3.
- Πρότυπο δείγμα ασβεστόλιθου.

4.4.1. Πειραματική διαδικασία

- Ποσότητα από το δείγμα 0,6 – 0,7 g μεταφέρεται στην κωνική φιάλη του ασβεστίμετρου μαζί με δοκιμαστικό κυλινδρικό σωλήνα που περιέχει διάλυμα HCl 1:3.
- Η φιάλη κλείνει με το πώμα του οργάνου και προτού ανακινηθεί κλείνει και η στρόφιγγα ώστε να παρεμποδιστεί η διαφυγή του εκλυόμενου αερίου στην ατμόσφαιρα. Η φιάλη ανακινείται έως ότου ολοκληρωθεί η αντίδραση του οξέος με το δείγμα.
- Το αέριο που εκλύεται εκτοπίζει τη στήλη του κόκκινου διαλύματος (ελαφρά οξινισμένο διάλυμα νερού με μερικές σταγόνες HCl και την προσθήκη δείκτη ερυθρού του μεθυλίου).

- Αφού εξισορροπηθεί η πίεση μέσα στη στήλη με την ατμοσφαιρική, καταγράφεται η ένδειξη από τη βαθμονομημένη κλίμακα του οργάνου, που αντιστοιχεί στον όγκο (σε ml) του αέριου που εκλύθηκε κατά την αντίδραση.
- Παράλληλα με τα άγνωστα δείγματα, μετράται πρότυπο δείγμα ασβεστόλιθου, στην προκειμένη περίπτωση περιεκτικότητας 99,01% σε CaCO_3 (43,56% CO_2), για να υπολογιστεί ένας συντελεστής διόρθωσης (για τη βαθμονόμηση του οργάνου), ενώ επίσης καταγράφονται η πίεση και η θερμοκρασία κατά την διάρκεια του πειράματος για την αναγωγή του εκλυόμενου όγκου CO_2 σε Κ.Σ.
- Τελικά, από το ποσοστό επί τοις εκατό σε CO_2 που προσδιορίζεται, μετά τις απαραίτητες διορθώσεις ως προς τα πρότυπα και τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος, υπολογίζεται στοιχειομετρικά η περιεκτικότητα του δείγματος σε CaCO_3 .

4.4.2. Υπολογισμοί – Αποτελέσματα

Υπολογίζεται το ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος του CO_2 που εκλύεται από κάθε δείγμα, για να αναχθεί στη συνέχεια σε ποσοστό επί τοις εκατό σε ανθρακικό ασβέστιο στο δείγμα.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Μετατροπή του όγκου του CO_2 σε κανονικές συνθήκες ($V(\text{CO}_2)_{\text{ΚΣ}}$):

$$V(\text{CO}_2)_{\text{ΚΣ}} = \frac{273 \cdot \text{ένδειξη} \cdot [P(\text{CO}_2) - P(\text{H}_2\text{O})]}{760 \cdot (273 + \theta)} \quad [4.4]$$

- Η περιεκτικότητα $\Pi\%$ του προτύπου σε CO_2 είναι:

$$\Pi(\%) = \frac{\text{ένδειξη}}{0,196 \cdot m} \quad [4.5]$$

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

- Ο συντελεστής διόρθωσης (ΣΔ) είναι:

$$\Sigma\Delta = \frac{43,56}{\Pi(\%)} \quad [4.6]$$

- Στην περίπτωση που υπεισέρχονται περισσότερα από 1 πρότυπα θα πρέπει να προσδιοριστεί η μέση τιμή των προτύπων και βάσει αυτής να γίνει διόρθωση των αντίστοιχων τιμών για τα άγνωστα δείγματα.
- Από τις διορθωμένες περιεκτικότητες του δείγματος σε CO₂ και τα αντίστοιχα μοριακά βάρη, υπολογίζεται η περιεκτικότητα σε CaCO₃. Δεδομένου ότι 1 g CO₂ αντιστοιχεί σε 2,273 g CaCO₃, το ποσοστό του περιεχόμενου ασβεστίτη είναι:

$$\text{Ασβεστίτης (\%)} = \frac{0,196 \cdot V(\text{CO}_2) \cdot \Sigma\Delta}{m} \quad [4.7]$$

Συνεπώς το ποσοστό του ασβεστίτη (CaCO₃) είναι:

$$(\text{CaCO}_3) = [(\text{CO}_2) \cdot \text{MB}(\text{CaCO}_3)] / [\text{MB}(\text{CO}_2)] \quad [4.8]$$

Και τελικά, εφόσον Μοριακό Βάρος(CaCO₃)=100 και Μοριακό Βάρος(CO₂)=44:

$$(\text{CaCO}_3) = 2.273 \cdot (\text{CO}_2) \quad [4.9]$$

Σύμφωνα λοιπόν με τους παραπάνω υπολογισμούς, η περιεκτικότητα του ασβεστίτη στο υπό εξέταση γεωυλικό βρέθηκε ίση με **0%**.

5. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Για την ταξινόμηση του εξεταζόμενου γεωυλικού, διερευνήθηκε η κοκκομετρική του διαβάθμισή του και στη συνέχεια προσδιορίσθηκαν τα όρια Atterberg. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, το γεωυλικό ταξινομήθηκε με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS).

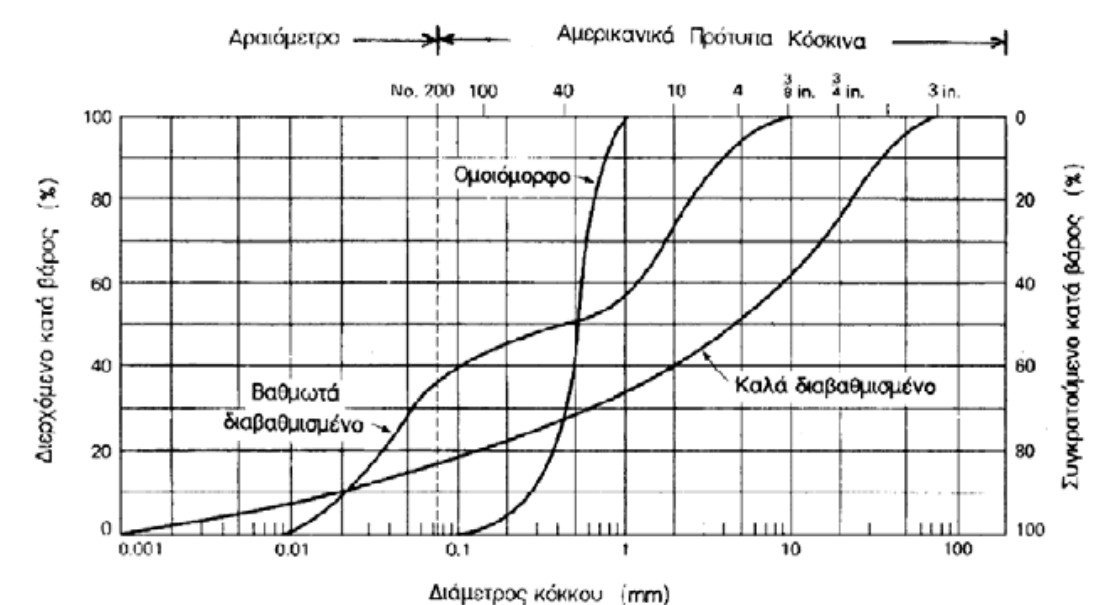
5.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μια μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησης του. Ακόμη, είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της αντοχής, της παραμορφωσιμότητας και η δυνατότητα κίνησης του υπόγειου νερού μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων.

Στο εργαστήριο ο προσδιορισμός της κατανομής των κόκκων των εδαφικών υλικών γίνεται με (Στειακάκης, 2010):

- (1) την μηχανική μέθοδο (χρήση κοσκίνων) για εδάφη με κόκκους $> 0,075 \text{ mm}$
- (2) την υδρομετρική μέθοδο (καθίζηση σε υγρό περιβάλλον) για εδάφη με κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No. 200 ($< 0.0075 \text{ mm}$) και μέχρι διαμέτρου $0,001 \text{ mm}$ περίπου.

Από την κοκκομετρική καμπύλη προσδιορίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους. Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται οι τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες ενός εδάφους με ομοιόμορφους κόκκους και ενός καλά διαβαθμισμένου (με ποικιλία κόκκων). Όσο πιο απότομη είναι η καμπύλη τόσο ομοιόμορφο είναι το έδαφος.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των εδαφών μπορεί να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό των παρακάτω μεγεθών ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

- *ενεργό μέγεθος των κόκκων (d_{10}):* ορίζεται σαν η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων και το μέγεθος της συνδέεται με την διαπερατότητα του εδάφους. Μια μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους υποδεικνύει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων.
- *συντελεστής ομοιομορφίας (C_u):* Ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων (d_{60}) προς το ενεργό μέγεθος (d_{10}).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [5.1]$$

- *συντελεστής κυρτότητας (C_c):* ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 30% κατά βάρος εδαφικών κόκκων στο τετράγωνο προς το ενεργό μέγεθος επί τον λόγο της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad [5.2]$$

Μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας υποδεικνύει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο μέγεθος και υποδεικνύει το μέγιστο μέγεθος κόκκων. Εδάφη με συντελεστή $C_u < 5$ είναι «ομοιόμορφα», ενώ, εάν $C_u > 10$ καλούνται «καλά διαβαθμισμένα» (Στειακάκης, 2010).

5.1.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση με κόσκινα

Η μέθοδος αφορά στον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των κόκκων σε λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη με τη χρήση κοσκίνων τετραγωνικών ή κυκλικών οπών. Ξηρό δείγμα εδάφους (μετά από πλύση) κοσκινίζεται μέσα από μια σειρά κοσκίνων και καταγράφεται το βάρος του υλικού που συγκρατείται ή διέρχεται από το κάθε κόσκινο.

Η ανάλυση με κόσκινα γίνεται με τη μηχανική δόνηση αντιπροσωπευτικού δείγματος του εδάφους το οποίο διέρχεται διαμέσου σειράς κοσκίνων 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	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.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται ως εξής:

1. Το δείγμα θερμαίνεται στους 105 °C για τουλάχιστον 24 ώρες και αφού ξηραθεί ζυγίζεται με ζυγό ακριβείας.
2. Ζυγίζονται τα κόσκινα.
3. Τοποθετούνται τα κόσκινα στη συσκευή με το μέγεθος βρογχίδας να αυξάνει από κάτω προς τα πάνω. Το τελευταίο κόσκινο (No. 200) συγκρατεί το πιο λεπτομερές κλάσμα του υλικού.
4. Τοποθετείται το δείγμα στο κόσκινο με τη μεγαλύτερο διάμετρο.
5. Το δείγμα κοσκινίζεται, ενεργοποιώντας το δονητή της συσκευής, για 5 έως 10 λεπτά.
6. Αφαιρούνται τα κόσκινα και ζυγίζονται μαζί με την ποσότητα εδάφους που έχουν συγκρατήσει.

7. Υπολογίζεται το ποσοστό του συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο διαιρώντας το βάρος του συγκρατούμενου με το συνολικό βάρος του δείγματος, καθώς και το ποσοστό του διερχόμενου υλικού αφαιρώντας σταδιακά το ποσοστό του συγκρατούμενου σε κάθε κόσκινο.

5.1.2. Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση αραιομέτρου

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών (ιλύων και αργίλων) γίνεται με την μέθοδο του αραιομέτρου.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον 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. Το αραιόμετρο μετράει την πυκνότητα του εν αιωρήσει στερεού υλικού μέσα σε ένα υγρό μέσο και προκύπτει η ταχύτητα καθίζησής (cm/s) του με βάση την εξίσωση:

$$u = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{1800 \cdot \eta} \quad [5.3]$$

όπου, d: διάμετρος εδαφικών κόκκων (mm), ρ_s : πυκνότητα εδαφικών κόκκων (g/cm^3), ρ_f : πυκνότητα υγρού μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η καθίζηση (g/cm^3), η : ιξώδες του ρευστού ($\text{g}\cdot\text{s/cm}^2$).

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

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το αραιόμετρο ASTM 152H της εταιρίας Eijelkamp. Ο τρόπος εργασίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατά ASTM D422/72 είναι ο ακόλουθος (Στειακάκης, 2010):

- 40 g 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% κατά

βάρος. Το δείγμα ανακατεύεται καλά και αφήνεται τουλάχιστον 16 ώρες να διαποτιστεί.

- Στη συνέχεια, μεταφέρεται σε δοχείο και αναμιγνύεται για περίπου 1 λεπτό.
- Το δείγμα μεταφέρεται σε ογκομετρικό κύλινδρο των 1000 ml, ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό. Αφού σφραγιστεί το στόμιο του κυλίνδρου με καπάκι, αναταράσσεται και αμέσως μετά τοποθετείται μέσα στο υδρόλουτρο, το οποίο έχει ήδη τεθεί σε λειτουργία στους 20 °C.
- Μόλις το δείγμα αποκτήσει ομοιογενή και κοινή θερμοκρασία με αυτήν του υδρόλουτρου ο κύλινδρος αφαιρείται, αναταράσσεται και επανατοποθετείται. Αμέσως αρχίζει καθίζηση των εδαφικών κόκκων.
- Το υδρόμετρο τοποθετείται στο δοχείο με το διάλυμα και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετά τα δύο πρώτα λεπτά γίνεται στους χρόνους, 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8 και 24 h. Το αραιόμετρο θα πρέπει να τοποθετείται στο διάλυμα τουλάχιστον 20 s πριν την μέτρηση.

Σημειώνεται, ότι οι ενδείξεις του αραιομέτρου διορθώνονται με κατάλληλους συντελεστές, όσον αφορά τον μηνίσκο που παρατηρείται στα τοιχώματα του οργάνου, τη θερμοκρασία και το αντικροκιδωτικό που χρησιμοποιήθηκε, και η ταχύτητα καθίζησης υπολογίζεται από την ένδειξη του αραιομέτρου, θεωρώντας ότι είναι γραμμική.

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.

5.1.3. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης με χρήση κοσκίνων, παρατίθενται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 5.2** ενώ στον **Πίνακα 5.3** παρατίθενται τα αποτελέσματα με βάση την υδρομετρική μέθοδο.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα

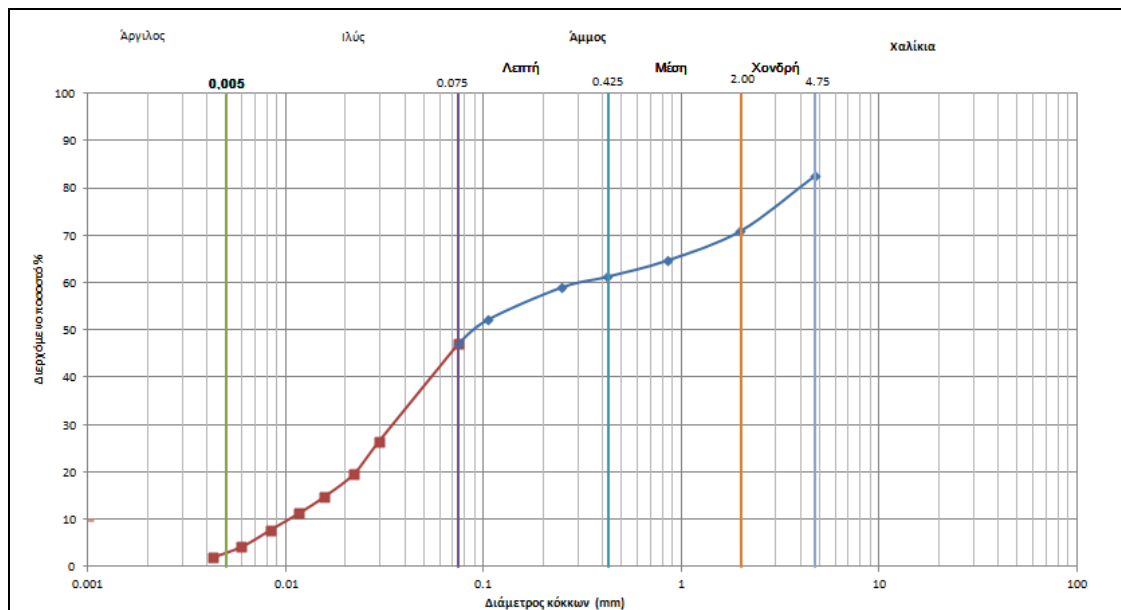
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος κοσκίνου (mm)	Βάρος καθαρού κοσκίνου (g)	Βάρος κοσκίνου με συγκρατο ύμενο δείγμα (g)	Συγκρατο ύμενο δείγμα (g)	Συγκρατο ύμενο ποσοστό (%)	Διερχόμεν ο ποσοστό (%)
4	4,75	468,55	579,28	84,80	17,39	82,61
10	2	428,78	526,94	56,91	11,67	70,94
20	0,85	381,4	471,53	30,55	6,26	64,68
40	0,425	345,14	406,44	16,69	3,42	61,26
60	0,250	321,52	355,31	11,06	2,27	58,99
140	0,106	310,55	366,3	33,15	6,80	52,19
200	0,075	296,52	320,54	24,95	5,12	47,07
Συλλέκτης	-	283,36	309,47	229,58	47,07	-
Άθροισμα	-	-	-	487,69	100,00	-

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο

Χρόν. (min)	Αναγ. υδρομ. R (gr)	Θερμ. T (°C)	Ιξώδες (η) (g·sec/cm ²)	Διορθ. ανάγ. υδρομέτρο υ R'' (gr)	Διάμ. κόκκων d (mm)	Ποσ. κόκκων εν αιωρήσει (%)	Ποσ. επί του συνόλου του δείγ. (%)
1	31	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	28,6	0,0750	100,00	47,07
2	25	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	22,6	0,0298	56,30	26,50
4	20	27,6	$8,66 \times 10^{-6}$	16,8	0,0223	41,78	19,67
8	15	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	12,6	0,0157	31,41	14,79
15	12	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	9,6	0,0117	23,95	11,27
30	9	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	6,6	0,0084	16,48	7,76
60	6	30,3	$8,18 \times 10^{-6}$	3,6	0,0060	9,02	4,24
120	4	30,5	$8,14 \times 10^{-6}$	1,7	0,0043	4,19	1,97

Σημειώνεται ότι, η πυκνότητα εδαφικών κόκκων θεωρήθηκε ίση με $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$, η πυκνότητα του απιονισμένου νερού $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ και ο συντελεστής διόρθωσης ειδικού βάρους εδαφικών κόκκων ίσος με 0,995.

Τα αποτελέσματα, τοποθετήθηκαν σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα και σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη του **Σχήματος 5.2**.



Σχήμα 5.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση δείγματος φυλλιτικής χαλαζιτικής σειράς

Σύμφωνα, με την κοκκομετρική καμπύλη, το μίγμα αποτελείται από άργιλο 3%, ιλύ 45%, λεπτή άμμο 13% μέση άμμο 9%, χονδρή άμμο 12% και χαλίκια 18%.

Με βάση την καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης του εδάφους προσδιορίστηκαν οι παράμετροι: ενεργό μέγεθος (d_{10}), συντελεστής ομοιομορφίας (C_u) και συντελεστής κυρτότητας (C_c) (βλέπε **Πίνακα 5.4**).

Πίνακας 5.4: Παράμετροι κοκκομετρικής διαβάθμισης

d_{10}	0,01 mm
C_u	0,41
C_c	30,00

Η μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους υποδεικνύει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων και η μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας ($C_u > 10$) υποδεικνύει ότι τα μεγέθη κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από το μικρότερο στο μεγαλύτερο μέγεθος και χαρακτηρίζονται καλά διαβαθμισμένα.

5.2. Όρια Atterberg και ενεργότητα

Η γνώση των ορίων Atterberg για την διερεύνηση της καταλληλότητας του γεωυλικού μας ως τάπητα σε ΧΥΤΑ είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι εδάφη με PI >30-40% παρουσιάζουν προβλήματα εργασιμότητας (Roque-Didier, 2006). Επίσης, κατά τον Daniel (1990) εδάφη με δείκτη πλαστικότητας $PI \geq 10\%$ πιθανά να επιτρέπουν την κατασκευή αργιλικού στρώματος με υδροπερατότητα μικρότερη των $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Τα όρια Atterberg που υπολογίσθηκαν είναι τα εξής (Στειακάκης 2010):

- **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 πλασιμότητα 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 ημιστερεής κατάστασης. Ο προσδιορισμός έγινε με την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο όταν πλάθονταν σε ραβδίσκους οι οποίοι θρυμματίζονταν με την μείωση της διαμέτρου τους κάτω από τα 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, μετριόταν η μείωση του μήκους του εδαφικού υλικού μας κατά την διάρκεια της φυσικής του ξήρανσης (συρρίκνωση).

Μέσω των ορίων Atteberg προσδιορίσθηκαν και οι παρακάτω δείκτες:

- 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:

$$PI = LL - PL$$

[5.4]

- 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 δραστηριότητας 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 (Παπαχαρίσης κ.ά., 2003).

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

Ορυκτό	Ενεργότητα
Καολινίτης	0,4
Ιλλίτης	0,9
Ασβεστούχος μοντμοριλλονίτης	1,5
Μπεντονίτης	7,0

Από το εδαφικό δείγμα χρησιμοποιήθηκε ποσότητα περίπου 150 g από το υλικό που διήλθε του κόσκινου No. 40 (0,425 mm).

5.2.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας

Το όριο υδαρότητας προσδιορίσθηκε με χρήση της συσκευής Casagrande (ASTM D4318) (Στειακάκης, 2010), ως εξής:

- Λαμβάνεται δείγμα βάρους 100 g από το γεωϋλικό που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος 425 μm (No. 40).
- Το υλικό τοποθετείτε στην κάψα, προσθέτουμε μικρή ποσότητα νερού (15-20 ml) και αναμειγνύουμε καλά με την σπάτουλα μέχρις ότου δημιουργηθεί μία ομοιόμορφη (χωρίς συσσωματώματα) παχύρρευστη μάζα (πάστα).
- Η πάστα τοποθετείτε στο κύπελλο της συσκευής Casagrande έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια. Το μέγιστο πάχος του πρέπει να είναι περίπου 1 cm. Το επιπλέον έδαφος απομακρύνεται.
- Το εδαφικό δείγμα χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη σύροντας το εργαλείο χάραξης κατά το μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου. Χρησιμοποιούμε τη σπάτουλα για την απομάκρυνση τμήματος της πάστας που τυχόν προεξέχει του κυπέλλου αποφεύγοντας τη διατάραξη του εδαφικού δείγματος με οποιονδήποτε τρόπο.
- Ο χειροκίνητος στρόφαλος της συσκευής περιστρέφεται με ρυθμό 2 περιστροφών ανά δευτερόλεπτο και μετράμε τους κτύπους (πτώσεις του κυπέλλου) που απαιτούνται έως ότου οι δύο πλευρές του δείγματος ενωθούν στη βάση της χαραγής και σε μήκος 12,7 mm.
- Εάν ο αριθμός των περιστροφών-κτυπημάτων που απαιτούνται είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνεται με τη σπάτουλα 35 – 40 g από το δείγμα, από την περιοχή της επαφής (του κλειστού πλέον αυλακιού) και το τοποθετούμε σε γυάλινο υποδοχέα πραγματοποιώντας τις απαραίτητες ζυγίσεις για την εκτίμηση της υγρασίας και στη συνέχεια το τοποθετείται στο ξηραντήριο (σε θερμοκρασία 110 °C).
- Μεταβάλλεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, προσθέτοντας νερό στο δείγμα.
- Επαναλαμβάνεται τη διαδικασία μέχρις ότου προσδιοριστεί ένας αριθμός τουλάχιστον τεσσάρων (4) τιμών περιεκτικότητας σε νερό για τις οποίες ο αριθμός των πτώσεων του κυπέλλου που απαιτούνται για να κλείσει το αυλάκι είναι μεταξύ του 5 και 40.
- Μετά από 24 ώρες βγαίνουν οι υποδοχείς από το ξηραντήριο και καταγράφεται το ξηρό βάρος. Η απώλεια του βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

5.2.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας

Ο προσδιορισμός έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D4318 για την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο πλάθεται σε

λεπτούς ραβδίσκους και θρυμματίζεται όταν η διάμετρος τους μειώνεται κάτω από 3 mm (Στειακάκης, 2010):

- Λαμβάνεται δείγμα βάρους 100 g από το γεωϋλικό που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος 425 μm (No. 40).
- Τοποθετείται το υλικό στην κάψα, προσθέτεται νερό ενώ το ανακατεύεται με την σπάτουλα, ώστε να αποκτήσει πλαστιμότητα.
- Χωρίζεται η εδαφική μάζα σε τρία μέρη και για κάθε ένα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:
 1. Συμπιέζεται και μορφώνεται το δείγμα της δοκιμής σε μάζα ελλειψοειδούς σχήματος. Η μάζα κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και μιας γυάλινης πλάκας ή άλλης ομαλής επιφάνειας, με την απαιτούμενη πίεση ώστε να σχηματιστεί ραβδίσκος ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm σε όλο το μήκος του.
 2. Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωσή ραβδίσκου διαμέτρου 3 mm, το αναπλάθεται το δείγμα προσθέτοντας περισσότερο νερό και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.
 3. Εάν το έδαφος διαμορφώνει ραβδίσκο με διάμετρο μικρότερη των 3 mm, το αναπλάθουμε σε βώλο και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία κυλίνδρωσης σε ομαλή επιφάνεια που καλύπτεται με τραχείας υφής χαρτί (το χαρτί θα απορροφήσει αργά-αργά, κάποια ποσότητα νερού από το έδαφος).
 4. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, θα προσεγγίζεται τελικά μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκος κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρος του κάτω από 3 mm, θρυμματίζεται.
- Τοποθετούνται οι ραβδίσκοι και τα θρύμματα σε γυάλινο υποδοχέα, καταγράφεται το υγρό βάρος και τοποθετείται ο υποδοχέας στο ξηραντήριο σε θερμοκρασία 110 °C.
- Μετά από 24 ώρες βγαίνουν οι υποδοχείς από το ξηραντήριο και καταγράφεται το ξηρό βάρος. Η απώλεια του βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

5.2.3. Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε δίνει το ποσοστό της γραμμικής συρρίκνωσης ενός εδάφους. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εδάφη με χαμηλή πλαστικότητα συμπεριλαμβανομένου ιλύες και αργίλους (Head, 1992).

Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Καθαρίζεται και στεγνώνεται το καλούπι. Απλώνεται ένα λεπτό στρώμα από βαζελίνη στην εσωτερική επιφάνεια του καλουπιού για να προστατευτεί το δοκίμιο και να μην κολλήσει.
- Λαμβάνεται δείγμα βάρους 150 g από το γεωϋλικό που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος 425 μm (No. 40). Τοποθετείται το δείγμα στην πορσελάνινη κάψα και προσθέτεται απιονισμένο νερό έως ότου να φτάσει το όριο υδαρότητας. Στην συνέχεια ανακατεύεται καλά μέχρις ότου να δημιουργηθεί μια καλά ομογενοποιημένη μάζα.
- Τοποθετείται η εδαφική μάζα στο καλούπι, αποφεύγοντας την δημιουργία κενών, μέχρι πλήρωσης του. Χτυπάμε μαλακά το καλούπι με το δείγμα σε μία επιφάνεια έτσι ώστε να αναπληρωθούν τυχόν κενά που δημιουργήθηκαν.
- Αφήνεται το καλούπι εκτεθειμένο στον αέρα έτσι ώστε να στεγνώσει σιγά-σιγά. Όταν το εδαφικό δείγμα έχει απομακρυνθεί από τα τοιχώματα του καλουπιού τότε μπορεί να μεταφερθεί στο ξηραντήριο στους 60 – 65 °C. Όταν η συρρίκνωση σταματήσει τότε η θερμοκρασία αυξάνεται στους 105 – 110 °C για να ολοκληρωθεί η ξήρανση.
- Μέτρηση του μήκους. Αφήνεται το καλούπι να κρυώσει. Μετράται το μήκος του δοκιμίου λαμβάνοντας τρεις (3) μετρήσεις και υπολογίζεται ο μέσος όρος (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Όριο συρρίκνωσης

Τελικά, το όριο συρρίκνωσης SL (%) προσδιορίζεται ως εξής:

$$SL = \left(1 - \frac{L_D}{L_0}\right) \cdot 100 \quad [5.5]$$

όπου, L_0 : αρχικό μήκος του διαμορφωμένου δοκιμίου (mm), και L_D : τελικό μήκος του διαμορφωμένου δοκιμίου (mm).

5.2.4. Προσδιορισμός ενεργότητας

Η ενεργότητα προσδιορίζεται ως εξής:

$$\text{ενεργότητα} = \frac{\text{δείκτης πλαστικότητας (\%)}}{\text{ποσοστό των μεγεθών της αργίλου (\%)}} \quad [5.6]$$

Αργιλικά υλικά με καολινίτη θα έχουν χαμηλή ενεργότητα, ενώ εδάφη με μοντμοριλλονίτη θα έχουν υψηλή τιμή ενεργότητας.

Ακόμα και η παρουσία μικρών ποσοτήτων αργιλικών ορυκτών σε μια εδαφική μάζα μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του εδάφους.

Ο προσδιορισμός του τύπου και η ποσότητα των αργιλικών ορυκτών μπορεί να είναι αναγκαία για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους ή την ανάπτυξη μεθόδων για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών.

Μια σχετική κατάταξη δραστηριότητας παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.6**.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηρισμός των αργιλικών εδαφών με βάση την ενεργότητά τους (Παπαχαρίσης κ.ά., 2003)

Ενεργότητα	Χαρακτηρισμός εδάφους
0,75 <	Μη ενεργό
0,75 – 1,35	Κανονικό
> 1,25	Ενεργό

5.2.5. Αποτελέσματα

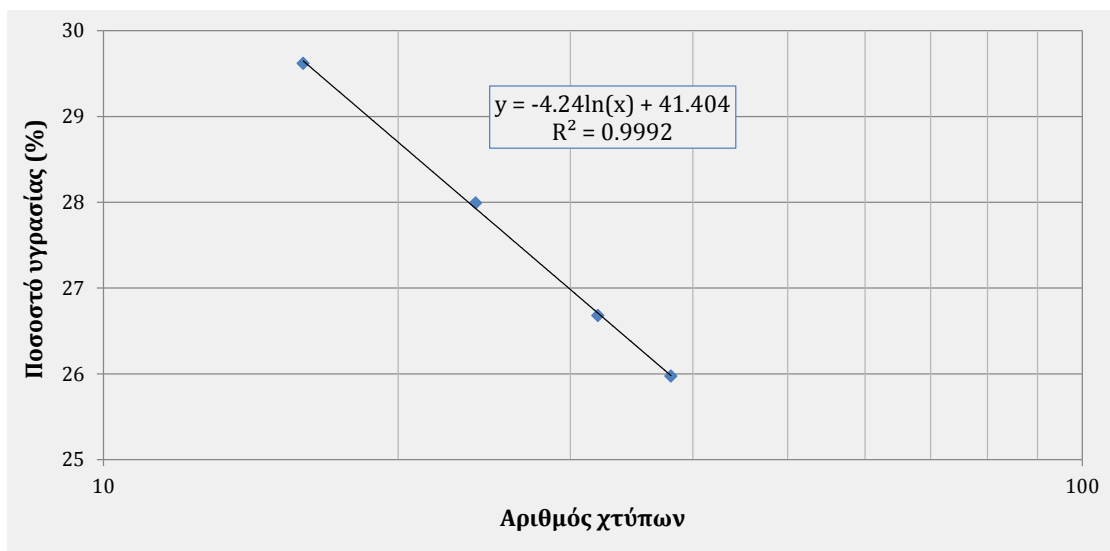
Παρακάτω, παρατίθενται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg.

- **Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας**

Αρχικά δίδονται οι μετρήσεις (Πίνακας 5.7) και το διάγραμμα (Σχήμα 5.3) που έγιναν για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Πίνακας 5.7: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός χτύπων	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
1	16	43,92	57,53	54,42	29,62
2	24	41,54	60,47	56,33	28,00
3	32	42,85	57,19	54,17	26,68
4	38	40,31	55,20	52,13	25,97



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

- **Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας**

Εν συνεχεία, δίνονται οι μετρήσεις που έγιναν για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας (Πίνακας 5.8).

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας

Αριθμός δοκιμίου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
1	42,53	48,29	47,48	98,32
2	47,86	53,03	52,35	98,72
3	43,10	46,78	46,27	98,91

- **Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης**

Παρακάτω δίνονται οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου συρρίκνωσης (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου συρρίκνωσης

Αριθμός δείγματος	L ₀ (mm)	L _D (mm)	SL (%)
1	103,98	95,63	8,03
2	94,58	88,07	6,88
3	92,00	85,17	7,43

- **Προσδιορισμός ενεργότητας**

Βάση της εξίσωσης [5.6] η ενεργότητα υπολογίστηκε 3.03 και το γεωυλικό μας χαρακτηρίστηκε ως ενεργό.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 5.10**.

Πίνακας 5.10: Τιμές ορίων Atterberg, δείκτη πλαστικότητας και ενεργότητας του εξεταζόμενου γεωυλικού

Όριο υδαρότητας (LL)	Όριο πλαστικότητας (PL)	Όριο συρρίκνωσης (SL)	Δείκτης πλαστικότητας (PI)	Ενεργότητα
28%	15%	7%	12%	3,03

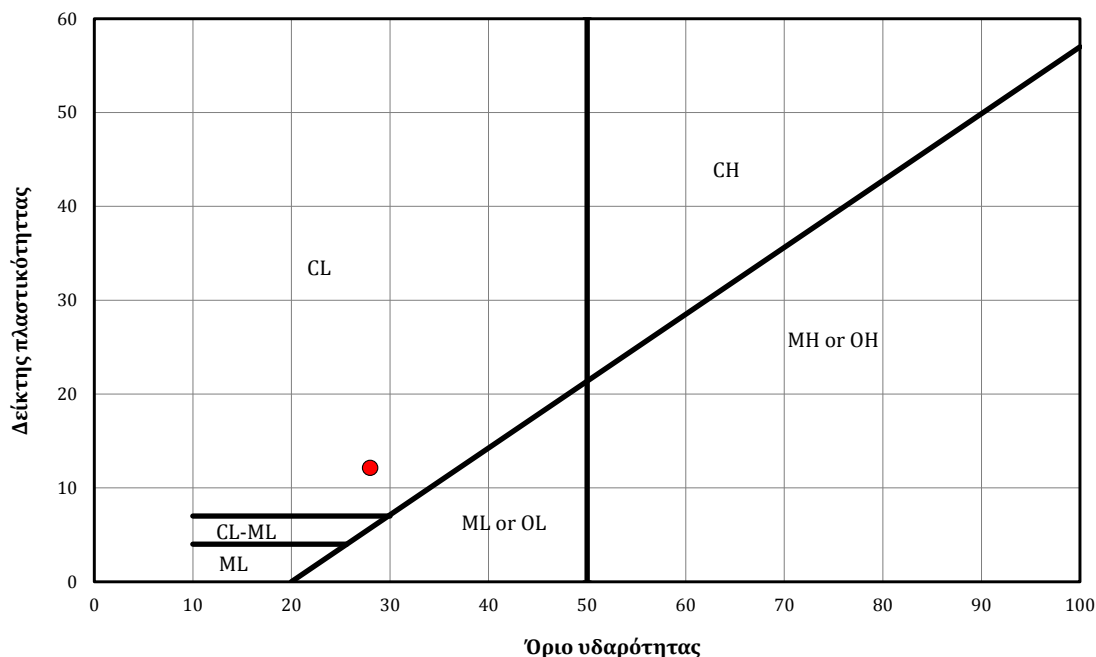
5.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση του γεωυλικού

Η ανάγκη μιας κοινής γλώσσας χαρακτηρισμού των εδαφών οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων ταξινόμησης τα οποία οδηγούν και σε μια προσεγγιστική εκτίμηση της γεωτεχνικής τους συμπεριφοράς.

Τα περισσότερα συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν σαν κριτήρια διαχωρισμού τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης και τα όρια Atterberg.

Στην Ελλάδα, για την ταξινόμηση των εδαφών χρησιμοποιείται κυρίως το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS).

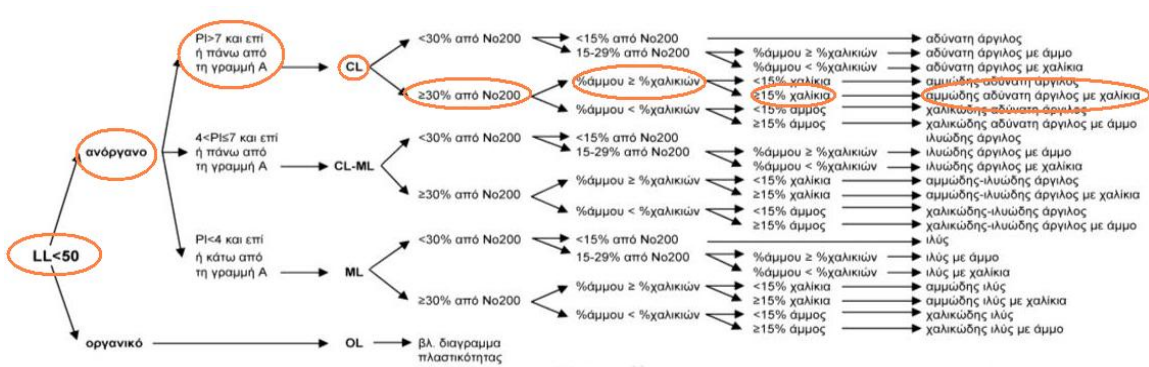
Στο **Σχήμα 5.4** διακρίνεται η θέση του δείγματος που εξετάστηκε στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande. Σύμφωνα με αυτό, το δείγμα χαρακτηρίζεται ως «**CL**».



Σχήμα 5.4: Θέση δείγματος στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande

Συνεπώς, το κλάσμα του δείγματος που διέρχεται από το κόσκινο No 200, (<0.075 mm), ταξινομείται κατά Casagrande, ως «**Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας**».

Σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα ταξινόμησης (Σχήμα 5.5) το έδαφος ταξινομείται ως «**Αμμόδης αδύνατη άργιλος με χαλίκια**».



Σχήμα 5.5: Ταξινόμηση με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών

5.4. Προσδιορισμός ελεύθερης διόγκωσης

Ως «ελεύθερη διόγκωση» (free swell, FS) ονομάζεται η αύξηση του όγκου του εδάφους που βρίσκεται σε μια χαλαρή κατάσταση υπό την μορφή σκόνης, όταν εμποτίζεται με νερό και εκφράζεται με την αναλογία του αρχικού όγκου.

Η τάση που μπορεί να έχει ένα υλικό για διόγκωση αποτελεί μια σημαντική πληροφορία για το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως αργιλικός φραγμός διότι η τυχόν διόγκωσή του (καθώς και συρρίκνωσή του) μπορούν να αυξομειώσουν και την υδροπερατότητα του γεωυλικού μας και να το καταστήσει ακατάλληλο για χρήση.

Εδάφη με μικρότερη από 50% ελεύθερη διόγκωση δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα γεωτεχνικά προβλήματα. Τιμές 100% και περισσότερο αποδίδονται σε αργιλικά ορυκτά.

Υψηλής διόγκωσης εδάφη όπως για παράδειγμα ο μπεντονίτης μπορεί να φτάσουν ποσοστό ελεύθερης διόγκωσης έως και 2.000% (Head, 1992).

5.4.1. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία προσδιορισμού της ελεύθερης διόγκωσης έχει ως εξής:

- Λαμβάνεται δείγμα βάρους 50 g από το γεωϋλικό που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος 425 μm (No. 40).
- Τοποθετείται σε στεγνό ογκομετρικό κύλινδρο των 25ml, 5ml εδαφικού υλικού. Το υλικό δεν πρέπει ούτε να πατηθεί, ούτε να καταρριφτεί.
- 25ml απιονισμένου νερού τοποθετούνται σε έναν 25ml ογκομετρικό κύλινδρο.
- Ρίχνεται το ξηρό εδαφικό υλικό αργά και σταθερά μέσα στο νερό με την βοήθεια του χωνιού. Επιτρέπεται με αυτόν τον τρόπο να καθιζάνουν οι εδαφικοί κόκκοι. Αυτό μπορεί να πάρει από μερικά λεπτά μέχρι και μισή ώρα.

- Τέλος, καταγράφεται η ένδειξη του ογκομετρικού κυλίνδρου που αντιστοιχεί στην ανώτερη επιφάνεια του εδαφικού υλικού, ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέχρις ότου να σταματήσει η διόγκωση του δείγματος (**Εικόνα**



Εικόνα 5.2: Προσδιορισμός Διόγκωσης

5.2).

5.4.2. Αποτελέσματα

Στον **Πίνακα 5.11** παρατίθενται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ελεύθερης διόγκωσης.

Πίνακας 5.11: Μετρήσεις προσδιορισμού της ελεύθερης διόγκωσης

Δείγμα 1		Δείγμα 2		Δείγμα 3	
Ημερομηνία	Όγκος εδαφικού δείγματος (ml)	Ημερομηνία	Όγκος εδαφικού δείγματος (ml)	Ημερομηνία	Όγκος εδαφικού δείγματος (ml)
10/5/11	6,25	17/5/11	6,40	17/5/11	6,20
11/5/11	6,25	18/5/11	6,40	18/5/11	6,15
12/5/11	6,10	19/5/11	6,20	19/5/11	5,85
13/5/11	5,80	20/5/11	6,20	20/5/11	5,76
14/5/11	5,70	21/5/11	5,50	21/5/11	5,55
15/5/11	5,55	22/5/11	5,40	22/5/11	5,56
M.O.	5,94	M.O.	6,02	M.O.	5,85
Ελεύθερη διόγκωση(%)					
11		8		11,2	

Συνεπώς, η μέση ελεύθερη διόγκωση του δείγματος είναι **FS = 10 %**.

6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Με τον όρο «συμπύκνωση» εννοούμε την τεχνητή αύξηση της πυκνότητας του εδάφους με μηχανικά μέσα.

Με την συμπύκνωση του εδάφους επιτυγχάνεται (Καββαδάς 2007):

- η αύξηση της διατμητικής αντοχής και της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.
- μείωση της συμπιεστότητας και επομένως των προκαλούμενων καθιζήσεων του εδάφους, σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.
- μείωση της υδροπερατότητας του εδάφους, ιδιότητα πολύ χρήσιμη όταν πρόκειται για υλικά επίστρωσης του πυθμένα των ταμιευτήρων και για υλικά κατασκευής φραγμάτων.
- αύξηση της αντίστασης του εδάφους σε αποσάθρωση.
- Ελέγχονται οι μεταβολές του όγκου που προέρχονται από τον παγετό και μεταβολές της θερμοκρασίας.
- Οι ιδιότητες του εδάφους γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες, δηλαδή μειώνεται η ανομοιομορφία των φυσικών εδαφικών σχηματισμών.

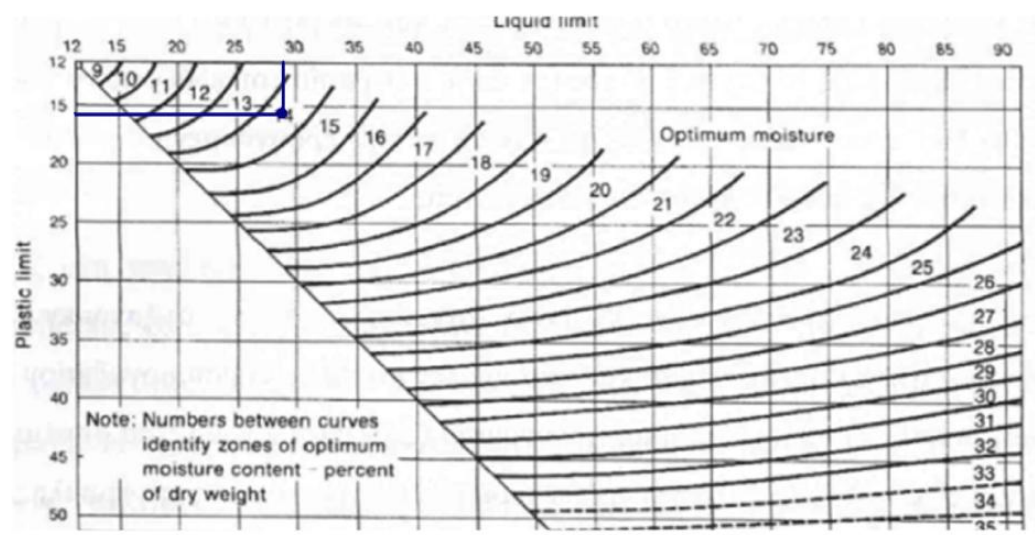
Η μέγιστη συμπύκνωση επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας νερού που βάσει της οποίας σχεδιάζεται η δοκιμή συμπύκνωσης κατά Proctor ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των κόκκων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη αναδιάταξη των κόκκων σε πυκνότερη δομή.

Εάν μεταβληθεί η περιεκτικότητα σε νερό του εδαφικού δείγματος, διατηρώντας σταθερή την ενέργεια συμπύκνωσης (βάρος σφύρας, ύψος πτώσης, αριθμός κτύπων ανά στρώση, πάχος των στρώσεων) και σχεδιαστεί το διάγραμμα μεταβολής του ξηρού μοναδιαίου βάρους σε συνάρτηση με την περιεχόμενη

υγρασία, τότε προκύπτει μια καμπύλη που παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή του ξηρού μοναδιαίου βάρους για μια ορισμένη περιεκτικότητα σε νερό. Η τιμή αυτή χαρακτηρίζεται σαν «βέλτιστη υγρασία κατά Proctor» (Στειακάκης, 2010).

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

Ο καθορισμός της εκτιμώμενης βέλτιστης υγρασίας, βάση της οποίας σχεδιάζεται η δοκιμή συμπίκνωσης κατά Proctor, έγινε με βάση το νομόγραμμα του **Σχήμα 6.2** (Στειακάκης, 2010), το οποίο υποδεικνύει την βέλτιστη υγρασία με βάση τις τιμές του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας του δείγματος.



Σχήμα 6.2: Προσεγγιστικός προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας κατά Proctor, με βάση τα όρια Atterberg (Στειακάκης, 2010)

Με βάση τα όρια Atterberg του δείγματος (**Πίνακας 5.10**) και το νομόγραμμα του Σχήματος 6.1, εκτιμάται ότι η βέλτιστη υγρασία είναι της τάξης του 14%. Με βάση την τιμή αυτή έγιναν 6 δοκιμές συμπίκνωσης με αρχικές υγρασίες ίσες με 10, 12, 14, 15, 16 και 18%.

6.1. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στις δοκιμές συμπίκνωσης έχει ως εξής (ASTM D698) (Στειακάκης, 2010).

- Κοσκινίζεται επαρκής ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος με το κόσκινο Νο. 4 (διάμετρος οπών ίση με 4,75 mm). Το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατείται απορρίπτεται.
- Από το έδαφος που προκύπτει, λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα βάρους περίπου 3 kg ή και περισσότερο, το οποίο αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού, έτσι ώστε να αποκτήσει υγρασία κατά 4 περίπου ποσοστιαίες μονάδες κάτω από την αρχικά εκτιμώμενη υγρασία (14%).
- Το έδαφος με την κατάλληλη υγρασία αφήνεται για 24 ώρες, επαρκώς καλυμμένο, ώστε να γίνει ομογενοποίηση.
- Στη συνέχεια το έδαφος συμπυκνώνεται μέσα στην επιλεγμένη μήτρα σε τρείς (3) ίσες στρώσεις για την παρασκευή συμπυκνωμένου υλικού συνολικού πάχους 127 mm. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 ομοιόμορφα κατανεμημένες πτώσεις του εμβόλου (Εικόνα 6.1).
- Μετά την συμπίκνωση, απομακρύνεται ο δακτύλιος από την μήτρα, αφαιρείται προσεκτικά το συμπυκνωμένο έδαφος μέχρι τα χείλη της μήτρας, με την ακμή του χάρακα και ζυγίζεται η μήτρα μαζί με το εδαφικό υλικό. Το υγρό μοναδιαίο βάρος (γ_b) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\gamma_b = \frac{\text{βάρος μήτρας με εδαφικό υλικό} - \text{βάρος μήτρας}}{\text{όγκος μήτρας}} \quad [6.1]$$

- Εξάγεται το δοκίμιο από την μήτρα με τον εξολκέα δείγματος και διαιρείται ως προς ένα επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα του. Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υλικού από μια από τις δύο επιφάνειες της τομής. Ζυγίζεται και ξεραίνεται σε θερμοκρασία 110 °C για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Το βάρος του υγρού δείγματος που λαμβάνεται δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100 g.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται προσθέτοντας ποσοστά υγρασίας διαδοχικά αυξανόμενα κατά 2%, ώστε τελικά να προκύψουν τα σημεία που θα καθορίσουν την καμπύλη ξηρού μοναδιαίου βάρους (ή ξηρής πυκνότητας) σε σχέση με την υγρασία.

Η παραπάνω διαδικασία αναφέρεται στην Πρότυπη μέθοδο Proctor (ASTM D1557-91), κατά την οποία τηρήθηκαν τα παρακάτω:

- Διάμετρος εμβόλου: 50,8 mm.
- Βάρος εμβόλου: 2,5 kg.
- Ύψος πτώσης εμβόλου: 30,5 cm.
- Διάμετρος μήτρας: 10,12 cm.
- Ύψος μήτρας: 10,68 cm.
- Όγκος μήτρας: 80,44 cm³.
- Βάρος μήτρας: 1733 g.



Εικόνα 6.1: Μηχανή συμπίκνωσης

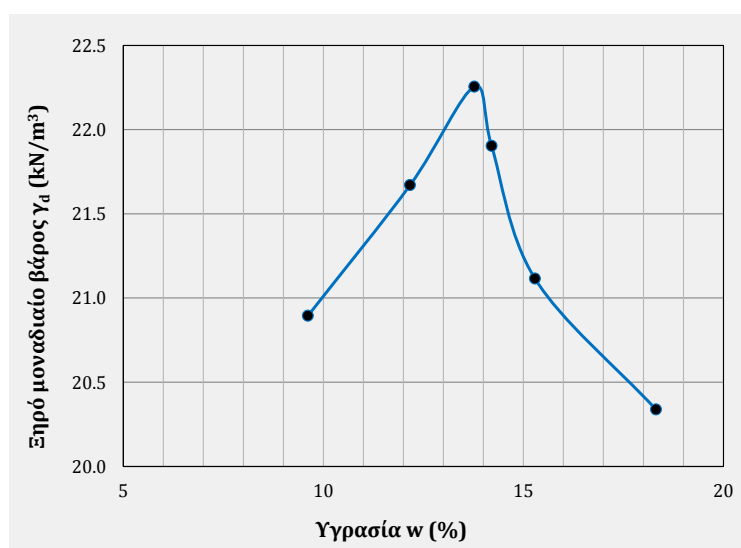
6.2. Αποτελέσματα

Στον **Πίνακα 6.1** παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το εδαφικό δείγμα.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα δοκιμών συμπύκνωσης με την πρότυπη μέθοδο Proctor

Αριθμός δείγματος	1	2	3	4	5	6
Προσδιορισμός Υγρασίας						
Βάρος υποδοχέα (g)	42,79	43,10	43,10	42,53	43,11	42,53
Βάρος υποδοχέα και υγρού δείγματος (g)	64,22	65,78	58,84	61,33	65,23	55,30
Βάρος υποδοχέα και ξηρού δείγματος (g)	62,25	63,52	56,92	58,80	62,16	53,31
Βάρος νερού (g)	21,43	22,68	15,74	18,80	22,12	12,77
Βάρος ξηρού δείγματος (g)	19,46	20,42	13,82	16,27	19,05	10,78
Περιεκτικότητα σε υγρασία, w (%)	9,61	12,17	13,77	14,21	15,29	18,31
Προσδιορισμός ξηρού μοναδιαίου βάρους						
Βάρος υγρού εδάφους και μήτρας (g)	3610	3725	3808	3783	3728	3705
Βάρος υγρού εδάφους (g)	1877	1992	2075	2050	1995	1972
Υγρό μοναδιαίο βάρος, γ_b (kN/m ³)	22,90	24,31	25,32	25,01	24,34	24,06
Ξηρό μοναδιαίο βάρος, γ_d (kN/m ³)	20,89	21,67	22,25	21,90	21,11	20,34

Στο **Σχήμα 6.3** παρουσιάζεται το διάγραμμα της υγρασίας συμπύκνωσης σε συνάρτηση με το ξηρό μοναδιαίο βάρος, για το εδαφικό δείγμα που εξετάστηκε.



Σχήμα 6.3: Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας

Με βάση τα παραπάνω, το εδαφικό δείγμα παρουσιάζει μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος $\gamma_{d-\max} = 22,33 \text{ kN/m}^3$ και βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης $\text{omc} = 13,77\%$.

7. ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Περατότητα (ή διαπερατότητα), ενός γεωλογικού σχηματισμού καλείται το μέτρο της ικανότητάς του να επιτρέπει την ροή ρευστών διαμέσου των κόκκων του.

Η ροή ενός ρευστού μέσα σε έναν σχηματισμό (έδαφος ή πέτρωμα) περιγράφεται από τον Νόμο του Darcy.

Έστω ότι σε κύλινδρο γεμάτο με πορώδες υλικό, εισέρχεται ρευστό σταθερής πυκνότητας και ιξώδους, υπό πίεση, έτσι ώστε ο κύλινδρος να παραμένει πλήρης και το υλικό κορεσμένο. Αν Q ο ρυθμός ροής (παροχή) του ρευστού τότε θα ισχύει (Κλειδοπούλου και Βαβαδάκης, 2008):

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad [7.1]$$

όπου, K : συντελεστής περατότητας του πορώδους μέσου για το συγκεκριμένο ρευστό, Δh : διαφορά του υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του σωλήνα (μήκους L), και A : εμβαδόν διατομής του σωλήνα.

Προκειμένου να ισχύει ο Νόμος του Darcy θεωρείται ότι η ροή του ρευστού είναι γραμμική και συνεχής και το υλικό είναι ομοιογενές.

Στη σχέση [7.1] ο λόγος $\Delta h/L$, δηλαδή ο λόγος της μεταβολής του υδραυλικού φορτίου (απώλεια δυναμικού) μεταξύ των πλευρών ενός εδαφικού στρώματος προς το πάχος του στρώματος μετρημένο στην κατεύθυνση ροής, ονομάζεται και υδραυλική κλίση (i). Είναι αδιάστατο μέγεθος.

Ο συντελεστής περατότητας (K) είναι μία σταθερά που εξαρτάται τόσο από τον σχηματισμό όσο και από τις ιδιότητες του ίδιου του ρευστού (πυκνότητα, ιξώδες).

Ο Νόμος του Darcy μπορεί να απλοποιηθεί για το νερό στους 20 °C ως εξής (Κλειδοπούλου και Βαβαδάκης, 2008):

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad [7.2]$$

ή

$$u = k \cdot i \quad [7.3]$$

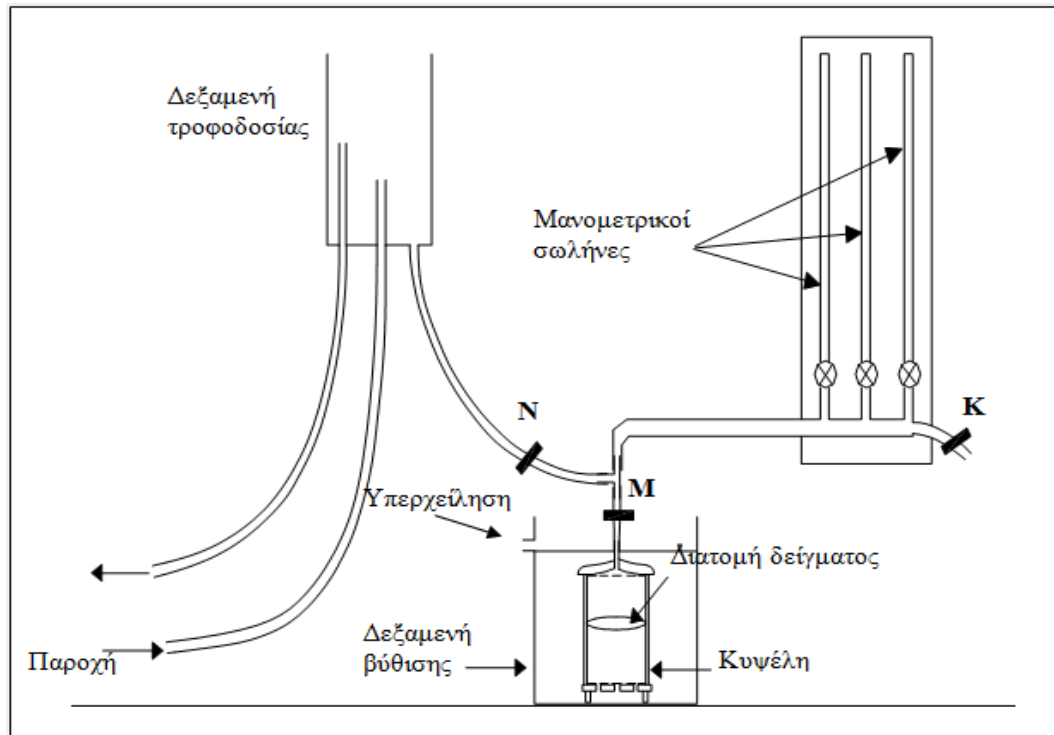
όπου, k : συντελεστής περατότητας του πορώδους μέσου για το νερό στους 20 °C,
και u : ταχύτητα ροής του νερού.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε προκειμένου να υπολογισθεί η υδροπερατότητα του εξεταζόμενου δείγματος είναι η μέθοδος πίπτοντος φορτίου.

Η μέθοδος του πίπτοντος (ή μεταβλητού) φορτίου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή υδροπερατότητας λεπτόκοκκων εδαφών (άργιλος, ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος), με αναμενόμενη τιμή $k \leq 10^{-5}$ m/s.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται ονομάζεται "περατόμετρο μεταβλητού φορτίου", σχηματική παράσταση του οποίου φαίνεται στο **Σχήμα 7.1** και στην **Εικόνα 7.1**.

Αποτελείται από μία κυψέλη-δειγματολήπτη, μέσα στην οποία τοποθετείται το εδαφικό δείγμα, μία δεξαμενή βύθισης της κυψέλης και τρεις μανομετρικούς σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων, οι οποίοι τροφοδοτούν το δείγμα (στην κυψέλη) με νερό. Επιπρόσθετα, η όλη διάταξη περιλαμβάνει και μία δεξαμενή τροφοδοσίας, προκειμένου να πληρούνται οι μανομετρικοί σωλήνες με νερό και τρεις βαλβίδες ("K", "M" και "N").



Σχήμα 7.1: Σχηματική παράσταση περατομέτρου μεταβλητού φορτίου (Κλειδοπούλου και Βαβαδάκης, 2008).



Εικόνα 7.1: Περατόμετρο μεταβλητού φορτίου

Αν λοιπόν L το μήκος του δείγματος (μήκος κυψέλης) και h_0 το ύψος υπερχειλίσσης πάνω από δεδομένο επίπεδο αναφοράς, τότε η στιγμιαία υδραυλική κλίση, για στάθμη μανομετρικού σωλήνα ίση με y , θα δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{y - h_0}{L} \quad [7.4]$$

Η μεταβολή του όγκου νερού (dV) που ρέει διαμέσου του δείγματος σε χρόνο dt θα δίνεται από τη σχέση:

$$dV = -a \cdot dy \quad [7.5]$$

όπου,

dy : μεταβολή του ύψους της στάθμης του μανομετρικού σωλήνα σε χρόνο dt .

Σύμφωνα με τον Νόμο του Darcy (σχέση [7.2]), για $Q = dV/dt$:

$$dV = A \cdot k \cdot i \cdot dt \quad [7.6]$$

όπου, A : εμβαδό διατομής του δείγματος (εσωτερική διατομή κυψέλης).

Από τις σχέσεις [7.4], [7.5] και [7.6] και ολοκληρώνοντας μεταξύ y_α (στάθμη του μανομετρικού σωλήνα πάνω από δεδομένο επίπεδο αναφοράς σε χρόνο t_α) και y_β (στάθμη του μανομετρικού σωλήνα πάνω από δεδομένο επίπεδο αναφοράς σε χρόνο t_β , μεταγενέστερο του t_α), τελικά προκύπτει (Κλειδοπούλου και Βαβαδάκης, 2008):

$$k \text{ (m/sec)} = 0,02304 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_\beta - t_\alpha)} \cdot \log \frac{y_\alpha - h_0}{y_\beta - h_0} \quad [7.7]$$

όπου, y_α, y_β, h_0 και L σε cm, a και A σε cm^2 , και t_α και t_β σε sec.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η διεξαγωγή της δοκιμής σημειώθηκαν πάνω στις κλίμακες των μανομετρικών σωλήνων δύο σταθερά σημεία αναφοράς. Τα σημεία

αυτά ("α" και "β" που αντιστοιχούν στα ύψη y_α και y_β) προέκυψαν, σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών του περατόμετρου, με τον ακόλουθο τρόπο:

Ως επίπεδο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο πάγκος εργασίας. Το ύψος από το δεδομένο επίπεδο αναφοράς μέχρι την υπερχειλίση της δεξαμενής βύθισης μετρήθηκε ίσο με $h_0 = 16,5 \text{ cm}$.

Το "σημείο α" σημειώθηκε 5 cm περίπου κάτω από το άνω άκρο των μανομέτρων και μετρήθηκε το ύψος του από το επίπεδο αναφοράς, $y_\alpha = 134,5 \text{ cm}$. Το "σημείο β" επιλέχθηκε κοντά στο κάτω άκρο των μανομέτρων, 20 cm περίπου πάνω από το επίπεδο υπερχειλίσης της δεξαμενής βύθισης. Το ύψος του σημείου αυτού από το επίπεδο αναφοράς μετρήθηκε ίσο με $y_\beta = 54,5 \text{ cm}$.

7.1. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- Αρχικά το εδαφικό δείγμα συμπυκνώθηκε 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 και τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή βύθισης του περατόμετρου μεταβλητού φορτίου, η οποία γεμίζει με νερό μέχρι το επίπεδο υπερχειλίσης. Προσοχή δόθηκε για την απελευθέρωση τυχόν παγιδευμένου αέρα κάτω από την κυψέλη, κάτι που επιτεύχθηκε με ανακίνησή της.
- Ο κορεσμός 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.
- Στην συνέχεια η κυψέλη συνδέεται με το κατάλληλο μανόμετρο στο περατόμετρο μεταβλητού φορτίου. Ανοίγοντας την βαλβίδα εισαγωγής νερού στον δειγματολήπτη νερό αρχίζει να ρέει από το μανόμετρο προς το δείγμα. Η ροή πραγματοποιείται από το ανώτερο προς το κατώτερο άκρο και μετράται ο χρόνος ($t_\beta - t_\alpha$) που χρειάζεται να μεταβληθεί η στάθμη στο μανόμετρο μεταξύ των δύο συγκεκριμένων επιπέδων (y_α και y_β).

7.2. Αποτελέσματα

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δύο δείγματα από το υπό έρευνα γεωυλικό, και από την εφαρμογή της σχέσης [7.7], προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα μετρήσεων υδροπερατότητας με περατόμετρο μεταβλητού φορτίου

Μέτρηση	Συντελεστής υδροπερατότητας (k) σε m/sec
Δείγμα Α	
1	$8,22 \times 10^{-8}$
2	$6,72 \times 10^{-8}$
Μ.Ο.	$7,47 \times 10^{-8}$
Δείγμα Β	
1	$3,02 \times 10^{-8}$
2	$2,55 \times 10^{-8}$
Μ.Ο.	$2,78 \times 10^{-8}$

Οι μετρήσεις που έγιναν όπως και οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β, Πίνακες Β.1 και Β.2.

8. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η παραμόρφωση μιας εδαφικής μάζας οφείλεται στη σχετική ολίσθηση των σωματιδίων που την αποτελούν. Κατά συνέπεια η αντίσταση του εδάφους σε διατμητική παραμόρφωση εξαρτάται από τη διατμητική αντίσταση που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων.

Η μικρότερη δύναμη που απαιτείται για τη σχετική μετακίνηση τους εκφράζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Η διατμητική αντοχή οφείλεται (Στειακάκης, 2010):

- α) στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από τους δεσμούς που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ των κόκκων (συγκόλληση) και μπορεί να λεχθεί προσδίδουν στο έδαφος διατμητική αντοχή ανάλογης φύσης με αυτή των στερεών σωμάτων. Το αίτιο αυτό εκδήλωσης της διατμητικής αντοχής ονομάζεται «συνοχή» του εδάφους.
- β) στην τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και στην αλληλο-εμπλοκή τους που οφείλεται στο σχήμα τους. Είναι προφανές ότι αυτό το εσωτερικό αίτιο, η «εσωτερική τριβή» όπως ονομάζεται οδηγεί σε διατμητική αντοχή που είναι συνάρτηση του κάθετου φορτίου στην επιφάνεια ολίσθησης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους ισούται με το άθροισμα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στη συνοχή και αυτής που οφείλεται στην εσωτερική τριβή.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους τη στιγμή της θραύσης του κατά ολίσθηση, δίδεται από τη σχέση του Coulomb (Στειακάκης, 2010):

$$\tau = c + \sigma \cdot \epsilon\phi\phi \quad [8.1]$$

όπου, τ : αντοχή του εδάφους σε διάτμηση, c : συνοχή του εδάφους, σ : κάθετη τάση στο επίπεδο διάτμησης, και φ : γωνία εσωτερική τριβής του εδάφους.

Κατά τη δοκιμή διάτμησης μετράται η διατμητική αντοχή του εδάφους σε σχέση με τη σταθερή ορθή τάση που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια της διάτμησης. Η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται σε συνεκτικά και μη συνεκτικά εδάφη (**Εικόνα 8.1**).



Εικόνα 8.1: Διάτμηση δοκιμίου

Υπάρχουν τρεις τύποι δοκιμών:

- Ταχεία δοκιμή μη στερεοποιημένου δοκιμίου.
- Ταχεία δοκιμή στερεοποιημένου δοκιμίου.
- Βραδεία δοκιμή στερεοποιημένου δοκιμίου.

Οι δύο πρώτοι τύποι της δοκιμής διάτμησης εφαρμόζονται σε γεωτεχνικά προβλήματα όπου εξετάζεται η θραύση του εδάφους λόγω επιβολής φορτίου σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων που δημιουργείται λόγω της φόρτισης. Ο τρίτος τρόπος της δοκιμής εφαρμόζεται σε γεωτεχνικά προβλήματα όπου το έδαφος οδηγείται σε θραύση αργά, ώστε να είναι δυνατή η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων.

Ο τύπος διάτμησης που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία ήταν η «ταχεία δοκιμή χωρίς στερεοποίηση του δοκιμίου».

Σε αυτόν τον τύπο δοκιμής, μετά την επιβολή της ορθής τάσης αρχίζει αμέσως η διάτμηση χωρίς να προηγηθεί στερεοποίηση του δοκιμίου. Ο ρυθμός της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης είναι της τάξης των 0,5 – 2% της διαμέτρου του δοκιμίου ανά λεπτό (Χρηστάρας, 2002).

8.1. Ταχεία δοκιμή μη στερεοποιημένου εδάφους

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με τα πρότυπα κατά ASTM D-3080/79, ως εξής:

- Ζυγίζεται ένας δίσκος με ξηρό μη συνεκτικό έδαφος του οποίου οι εδαφοτεχνικές παράμετροι πρόκειται να προσδιοριστούν. Η ποσότητα του διαθέσιμου δείγματος θα πρέπει να είναι αρκετή για τρεις δοκιμές με δείγμα ίδιας πυκνότητας.
- Συναρμολογούνται όλα τα τμήματα του υποδοχέα και μετρούνται οι διαστάσεις του (βάθος, πλάτος/μήκος κ.λπ.) ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εγκάρσιας διατομής A και της πυκνότητας του εδαφικού δοκιμίου. Τοποθετείται στον υποδοχέα στη συσκευή διάτμησης.
- Τοποθετείται ο πορόλιθος βάσης και το έδαφος υπό μορφή στρώσεων μέχρι 5 mm από την κορυφή του υποδοχέα.
- Επιπεδώνεται η επιφάνεια του εδάφους και τοποθετείται ο πορόλιθος της κορυφής και το εξάρτημα φόρτισης (μεταλλική πλάκα).
- Σημειώνεται το εξάρτημα φόρτισης περιμετρικά, σε σχέση με τον υποδοχέα του δοκιμίου προκειμένου να καταγραφούν ενδείξεις αναφοράς του αρχικού πάχους του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η πυκνότητα του δοκιμίου που χρησιμοποιείται σε κάθε δοκιμή.
- Ζυγίζεται εκ νέου ο δίσκος με το εδαφικό δείγμα. Η διαφορά του βάρους αυτού και του προηγούμενα ζυγισθέντος παρέχει το βάρος του χρησιμοποιούμενου δείγματος.
- Μετريέται το βάρος του ζυγού φόρτισης και προσαρμόζεται επί της μεταλλικής πλάκας φόρτισης.

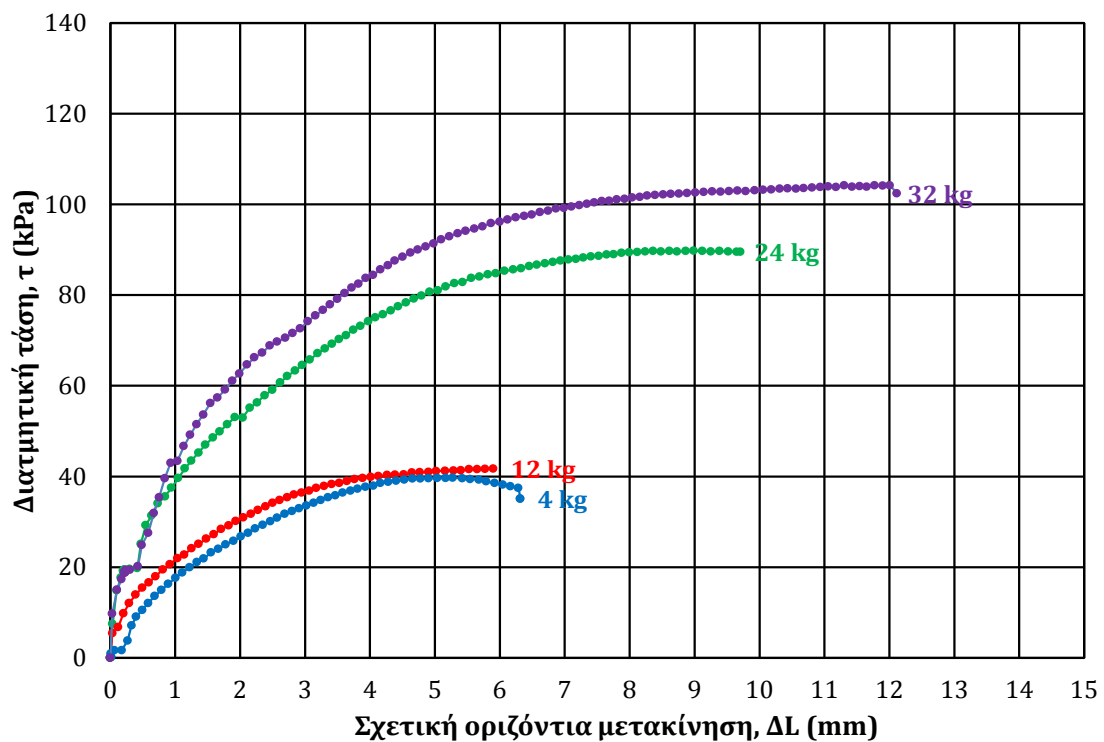
- Εφαρμόζεται βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού φόρτισης ώστε να επιβληθεί στο δοκίμιο κατακόρυφο φορτίο P_v , και να ασκηθεί η επιδιωκόμενη κατακόρυφη τάση σ_n :

$$P_v = W + \text{βάρος εξαρτ. φόρτισης} + \text{βάρος ζυγού φόρτισης} \quad [8.2]$$

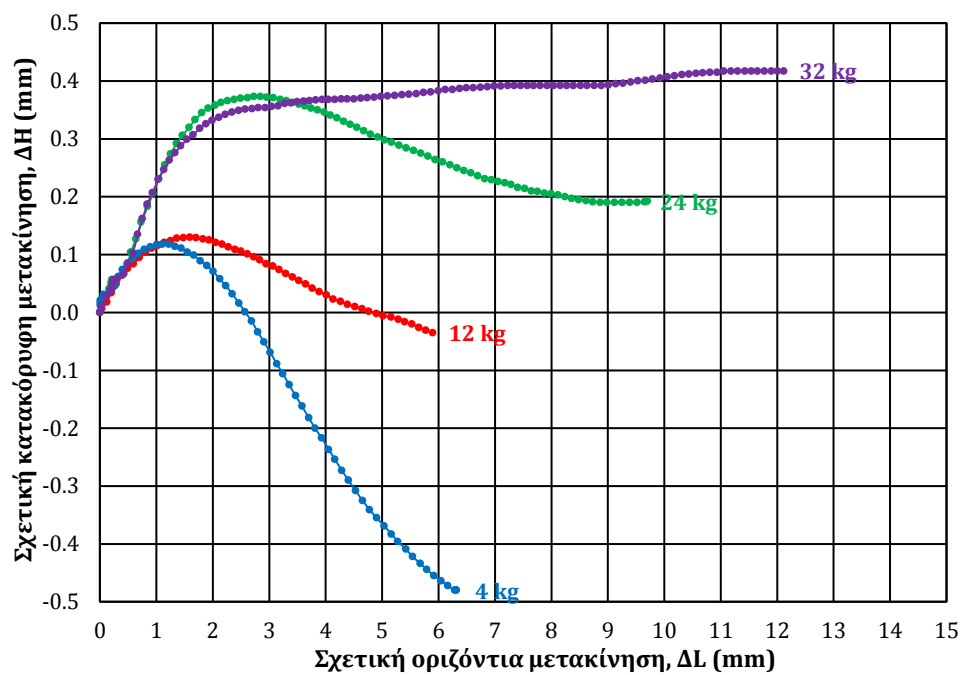
- Προσαρμόζονται τα μηκυνσιόμετρα για τη μέτρηση των διατμητικών και κατακόρυφων μετατοπίσεων. Για την μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0,002 mm ενώ για την μέτρηση των διατμητικών παραμορφώσεων, μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0,01 mm.
- Αφαιρούνται οι κατακόρυφοι κοχλίες που συγκρατούν τα δύο τμήματα του υποδοχέα και ανυψώνεται το ανώτερο πλαίσιο στρέφοντας ανάλογα τους κοχλίες απομάκρυνσης.
- Συσφίγγονται επίσης οι κατάλληλοι κοχλίες ώστε να επιτευχθεί καλή συναρμογή μεταξύ του ανώτερου πλαισίου του υποδοχέα με το οριζόντιο στέλεχος που επιβάλλει τη διατμητική δύναμη.
- Επιλέγεται η ταχύτητα της οριζόντιας μετατόπισης που θα πρέπει να είναι της τάξης των 0,5 έως 2% της διαμέτρου του δοκιμίου ανά λεπτό και η ολική διάρκεια της δοκιμής να μην ξεπερνά τα 3 – 5 λεπτά. Καταγράφονται οι αρχικές ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων (διατμητικής δύναμης, διατμητικών και κατακόρυφων παραμορφώσεων) και αρχίζει η διάτμηση η οποία συνεχίζεται μέχρις ότου η διατμητική δύναμη αποκτήσει σταθερή τιμή για αυξανόμενη διατμητική παραμόρφωση ή μέχρις ότου η διατμητική παραμόρφωση φτάσει το 10% της αρχικής διαμέτρου του δοκιμίου.
- Σε μια δοκιμή ελεγχόμενης παραμόρφωσης καταγράφονται οι ενδείξεις όλων των μηκυνσιομέτρων, ανά διαστήματα που καθορίζονται από την οριζόντια μετατόπιση. Αρχικά ανά 5 και στην συνέχεια ανά 10 ή 20 υποδιαιρέσεις του μηκυνσιομέτρου οριζόντιας μετατόπισης.
- Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, απομακρύνεται το εδαφικό δοκίμιο από τον υποδοχέα και επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 – 9 σε δύο επιπλέον δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικά κατακόρυφα φορτία P_v , διπλασιάζοντας κάθε φορά το επιβαλλόμενο βάρος W .

8.2. Αποτελέσματα

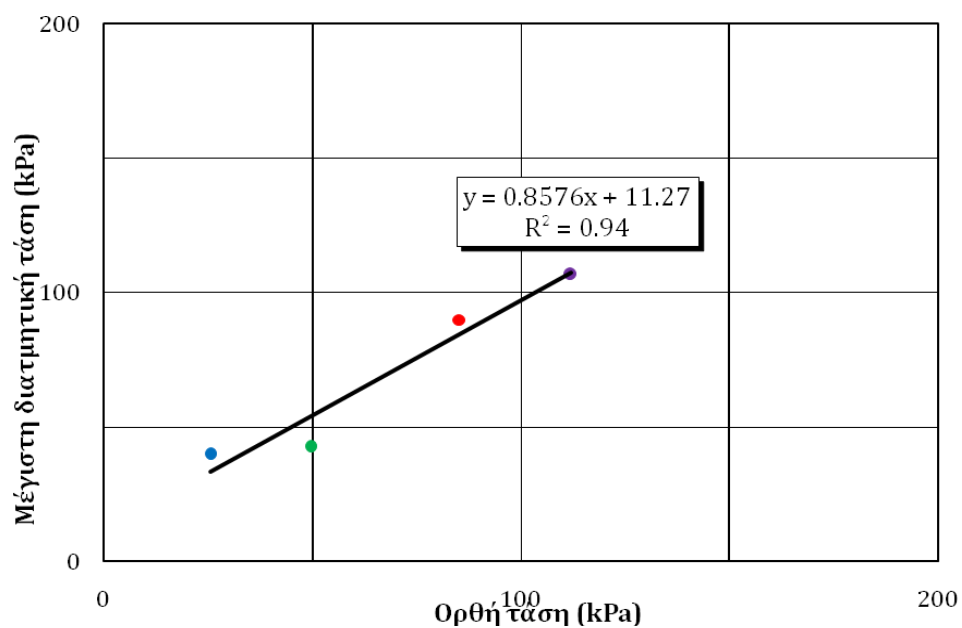
Στα **Σχήματα 8.1, 8.2 και 8.3** φαίνονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παράλληλα στο Παράρτημα Γ στους **Πίνακες Γ1, Γ2 και Γ3**, παρατίθενται οι αναλυτικοί πίνακες υπολογισμού της διάτμησης.



Σχήμα 8.1: Οριζόντια μετακίνηση - Διατμητική τάση



Σχήμα 8.2: Οριζόντια μετακίνηση - Κατακόρυφη μετακίνηση



Σχήμα 8.3: Ορθή τάση - Διατμητική τάση

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 8.3, βρέθηκε συνοχή $c = 11,3 \text{ kPa}$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 40,6^\circ$

9. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΕ ΜΙΞΗ ΜΕ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Ως «ιπτάμενη τέφρα» σύμφωνα με το πρότυπο British Standards BS EN 450-1 (2005), ορίζεται το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο από σφαιρικά κυρίως υαλώδη σωματίδια, προερχόμενα από την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα. Λαμβάνεται από τα ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα, τα οποία την δεσμεύουν από τα απαέρια των λεβήτων καύσης κονιορτοποιημένου άνθρακα. Μπορεί να είναι ασβεστολιθικής ή πυριτικής προέλευσης (Βογιατζής, 2009).

Η ιπτάμενη τέφρα επειδή παράγεται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως παραπροϊόν από την καύση του άνθρακα συνήθως, αντιμετωπίζεται ως απόβλητο και απορρίπτεται με τον ίδιο τρόπο όπως τα αστικά απόβλητα. Επομένως υπήρξε εντατική έρευνα που συνεχίζεται και επικεντρώνεται στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας, ως υλικό εφαρμοσμένης μηχανικής. Αργιλικά υλικά όπως το προς εξέταση εδαφικό δείγμα και η ανάμιξη τους με ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά υλικά με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, ως στεγανά καλύμματα ή τάπητας σε περιοχές διάθεσης αποβλήτων (Mollamahmotoglu, 2001).

Στον **Πίνακα 9.1** παρουσιάζονται τυπικές τιμές χημικής σύνθεσης ιπτάμενων τεφρών, οι οποίες προέκυψαν με στατιστική επεξεργασία από 157 δείγματα σε 98 διαφορετικούς σταθμούς στις Η.Π.Α. και στον Καναδά.

**Πίνακας 9.1: Τυπικά όρια τιμών χημική σύνθεσης ιπτάμενων τέφρων
(Mollamahmotoglu 2001)**

Οξείδιο (%)	Κατηγορία ιπτάμενης τέφρας	
	C	F
CaO	11,6 – 29,0	0,7 – 7,5
SiO ₂	23,1 – 51,,4	43,6 – 64,4
Al ₂ O ₃	13,3 – 21,3	19,6 – 30,1
Fe ₂ O ₃	3,7 – 22,5	3,8 – 23,9
MgO	1,5 – 7,5	0,7 – 1,7
Na ₂ O	0,5 – 7,3	0,3 – 2,8
K ₂ O	0,4 – 1,9	0,7 – 2,9
Απώλεια πύρωσης	0,4 – 1,9	0,4 – 7,2

Η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που παράγεται ανά kwh φτάνει τα 30 έως 300 g. Έτσι, η παραγωγή ενός σταθμού μπορεί να φθάσει στους 2000 τόνους ιπτάμενης τέφρας ανά ημέρα.

Η μεγάλη αυτή παραγωγή ιπτάμενης τέφρας, παράλληλα με οικολογικά προβλήματα που σχετίζονται με τις τρέχουσες πρακτικές απόθεσης, όπως η μόλυνση του αέρα από την επίγεια εναπόθεση ή η μόλυνση του νερού από την απελευθέρωση τοξικών μετάλλων κατά την απόθεση σε λίμνες ή ποτάμια και η οικονομική ωφέλεια που προκύπτει από τη χρήση της σε διάφορες εφαρμογές, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη εύρεσης νέων εφαρμογών για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας (Μάρκου, 1996).

Η ιπτάμενη τέφρα, επειδή παράγεται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως παραπροϊόν από την καύση του άνθρακα, συνήθως αντιμετωπίζεται ως απόβλητο και απορρίπτεται με τον ίδιο τρόπο που αυτό γίνεται για τα αστικά απόβλητα.

Για το λόγο αυτό υπάρχει εντατική έρευνα που επικεντρώνεται στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας, ως υλικό εφαρμοσμένης μηχανικής. Αργιλικά υλικά, όπως το

ως προς εξέταση φυλλιτικό υλικό, σε μίξη με ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά υλικά με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, για στεγανά καλύμματα ή τάπητες σε περιοχές διάθεσης αποβλήτων (Mollamahmotoglu, 2001).

Με βάση τα παραπάνω, στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η δυνατότητα χρήσης για τάπητα σε ΧΥΤΑ, μίγματος του γεωυλικού της φυλλιτικής χαλαζιτικής σειράς με ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 20% κατά βάρος.

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο προαναφερόμενο μίγμα, προκειμένου να διερευνηθεί η καταλληλότητά του για τάπητα σε ΧΥΤΑ. Οι δοκιμές αυτές περιγράφονται αναλυτικά, όσον αφορά στη διαδικασία τους, στα κεφάλαια 4 έως και 9.

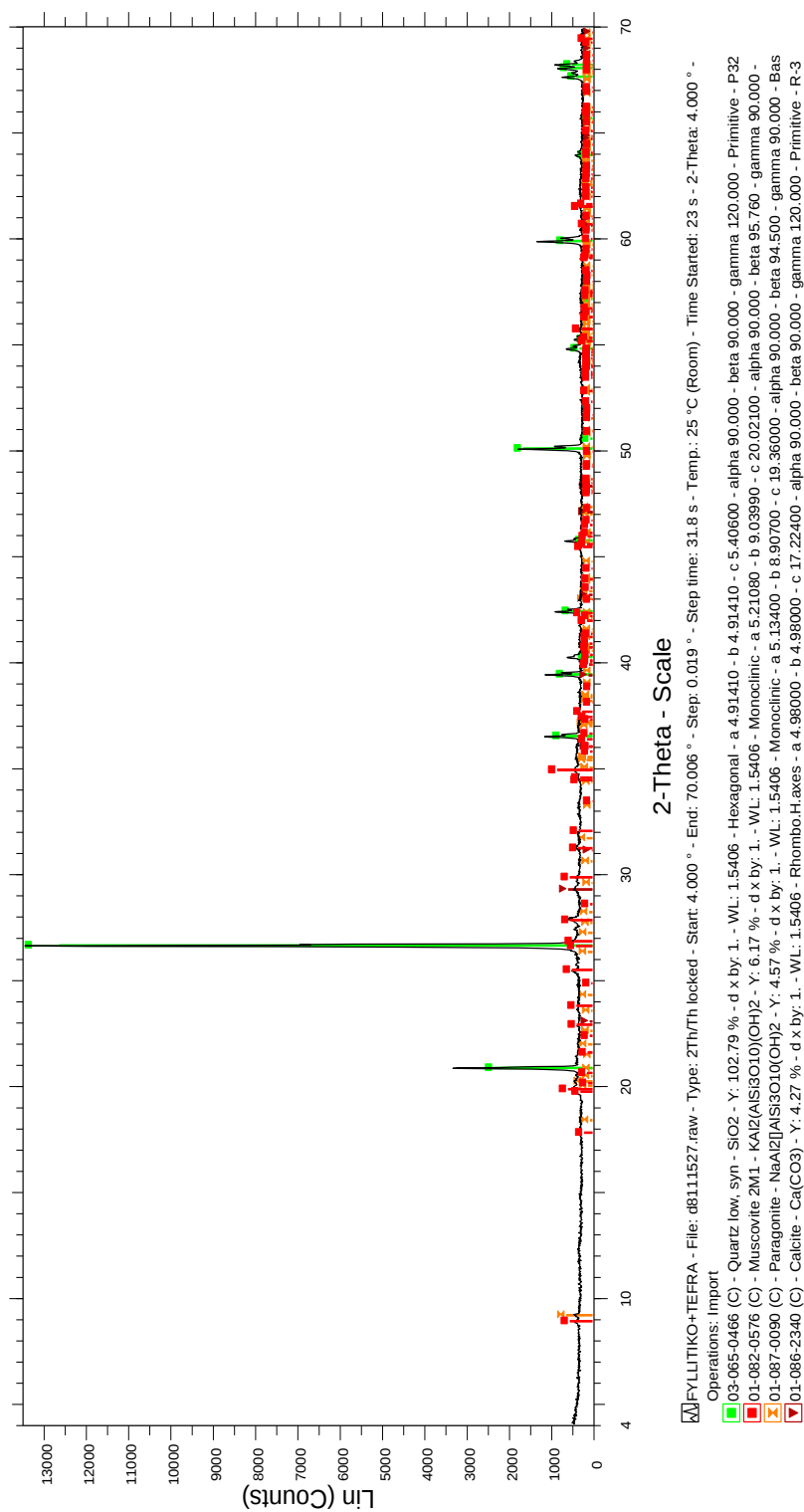
9.1. Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης (XRD)

Στον **Πίνακα 9.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων που έγιναν για το μίγμα φυλλιτικού υλικού και ιπτάμενης τέφρας.

Πίνακας 9.2: Ημιποσοτικός προσδιορισμός του δείγματος

Ορυκτολογική φάση	Ποσοστό (%) κατά βάρος
Χαλαζίας (SiO_2)	74
Μοσχοβίτης [$\text{KAl}_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$]	10
Παραγονίτης [$\text{NaAl}_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$]	14
Ασβεστίτης [CaCO_3]	2

Επίσης, στο **Σχήμα 9.1** παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου.

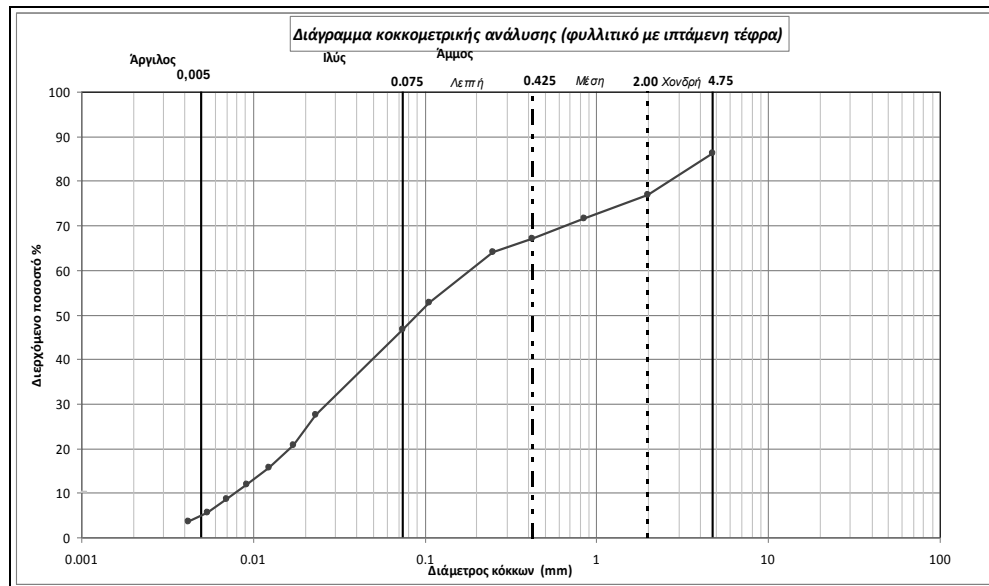


Σχήμα 9.1: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασίμετρου

9.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

9.2.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση δειγμάτων

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης, δίνεται στο **Σχήμα 9.2**.



Σχήμα 9.2: Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος

Σύμφωνα, με την κοκκομετρική καμπύλη, το μίγμα αποτελείται από άργιλο 5%, ιλύ 42%, λεπτή άμμο 20% μέση άμμο 10%, χονδρή άμμο 9% και χαλίκια 14%.

9.2.2. Όρια Atterberg

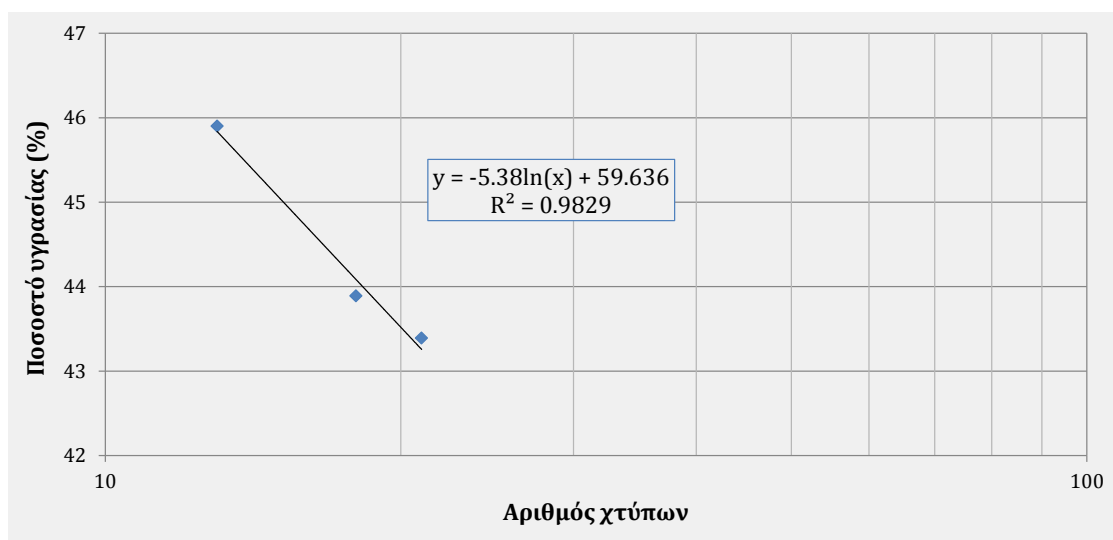
Στους πίνακες παρακάτω δίνονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, πλαστικότητας, συρρίκνωσης και η ενεργότητα.

- **Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας**

Αρχικά, δίδονται οι μετρήσεις (**Πίνακας 9.3**) και το διάγραμμα (**Σχήμα 9.3**) που έγιναν για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας.

Πίνακας 9.3: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός Χτύπων	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
1	13	43,10	48,79	47,00	45,90
3	18	41,37	51,50	48,41	43,89
5	21	40,99	47,17	45,30	43,39



Σχήμα 9.3: Διάγραμμα για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

▪ **Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας**

Στην συνέχεια, δίδονται οι μετρήσεις που έγιναν για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας (Πίνακας 9.4)

Πίνακας 9.4: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας

Αριθμός δοκιμίου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
1	39,78	43,67	42,65	35,54
2	46,55	49,49	48,70	36,74
3	46,34	48,79	48,10	39,21

▪ **Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης**

Στον **Πίνακα 9.5** δίνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ορίου συρρίκνωσης

Πίνακας 9.5: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ορίου συρρίκνωσης

Αριθμός δείγματος	L ₀ (mm)	L _D (mm)	SL (%)
1	78,88	77,65	1,56
2	82,19	80,47	2,10

Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις βρέθηκε **SL = 1,83%**.

▪ **Προσδιορισμός ενεργότητας**

Βάση της εξίσωσης [5.6] η ενεργότητα υπολογίστηκε 1.29 και το γεωϋλικό μας χαρακτηρίστηκε ως «κανονικό».

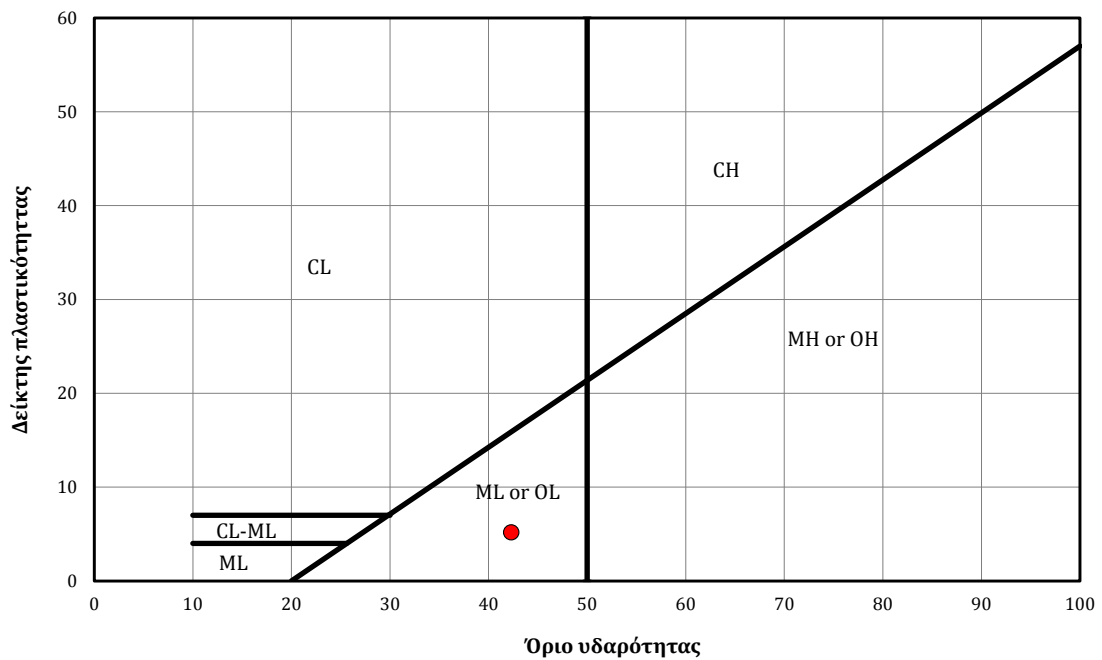
Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 9.6**.

Πίνακας 9.6: Τιμές ορίων Atterberg, δείκτη πλαστικότητας και ενεργότητας του εξεταζόμενου γεωυλικού

Όριο υδαρότητας (LL)	Όριο πλαστικότητας (PL)	Όριο συρρίκνωσης (SL)	Δείκτης πλαστικότητας (PI)	Ενεργότητα
42%	37%	2%	5%	1.29

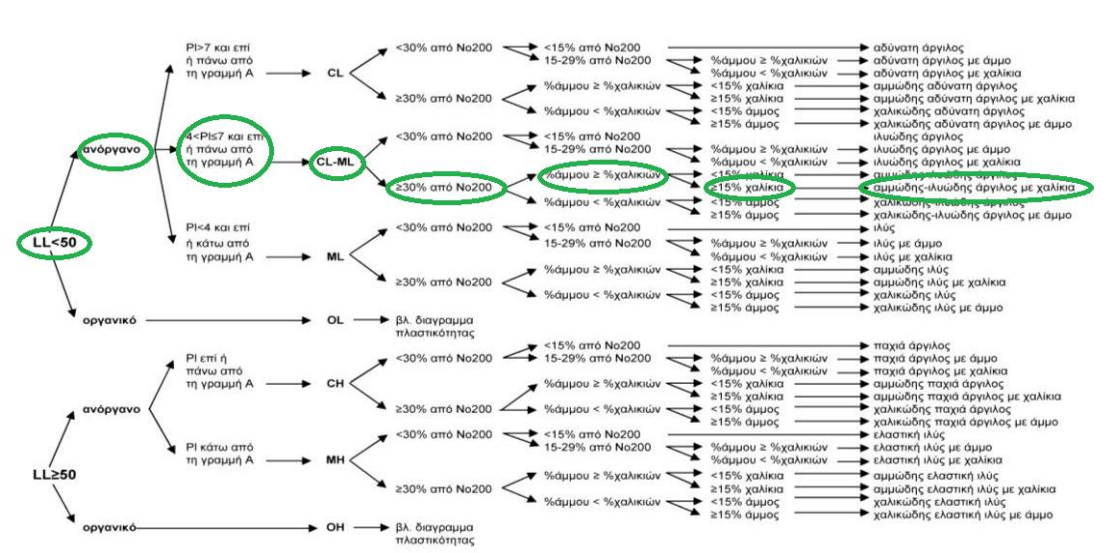
9.2.3. Γεωτεχνική ταξινόμηση μίγματος

Το μίγμα χαρακτηρίζεται βάσει της θέσης του στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande (Σχήμα 10.4) ως «ML».



Σχήμα 9.4: Θέση μίγματος στο διάγραμμα Casagrande

Με βάση τον χαρακτηρισμό αυτό και τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης, το μίγμα ταξινομείται στο Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Σχήμα 9.7) ως «Αμμώδης - ιλυώδης άργιλος με χαλίκια».



Πίνακας 9.7: Ταξινόμηση του εξεταζόμενου μίγματος με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών

9.2.4. Προσδιορισμός ελεύθερης διόγκωσης

Στον Πίνακα 9.8 παρατίθενται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ελεύθερης διόγκωσης.

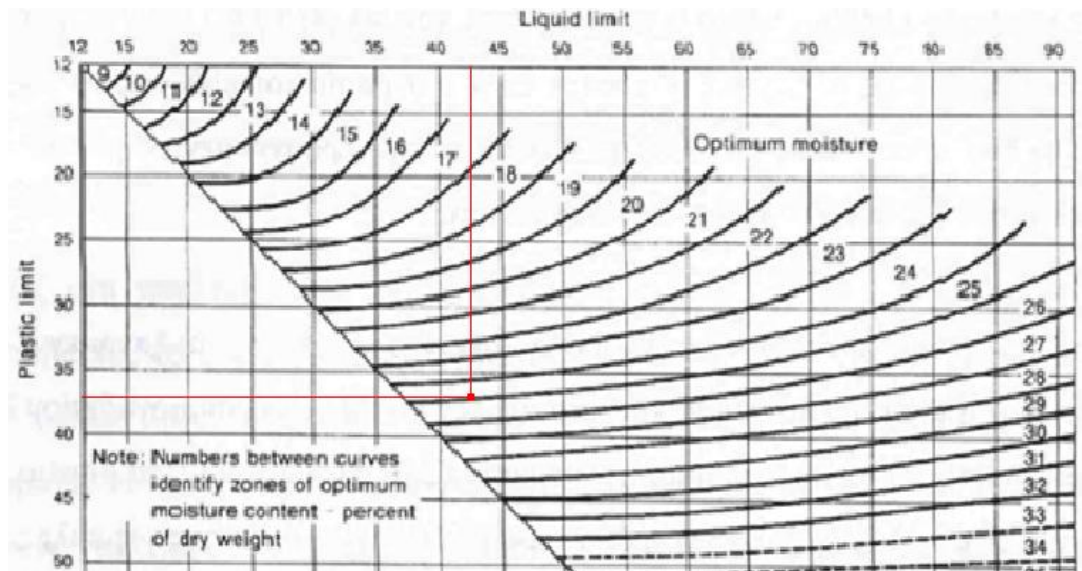
Πίνακας 9.8: Μετρήσεις προσδιορισμού της ελεύθερης διόγκωσης

Δείγμα 1		Δείγμα 2	
Ημερομηνία	Μέτρηση (ml)	Ημερομηνία	Μέτρηση (ml)
25/7/11	5,50	25/7/11	5,50
26/7/11	5,30	26/7/11	5,20
27/7/11	5,10	27/7/11	5,20
29/7/11	5,00	29/7/11	5,10
30/7/11	4,95	30/7/11	4,95
31/7/11	4,75	31/7/11	4,75
M.O.	5,10	M.O.	5,12
Ελεύθερη διόγκωση(%)			
2,00		2,33	

Συνεπώς, η μέση ελεύθερη διόγκωση του μίγματος είναι **FS = 2,17%**

9.3. Δοκιμές συμπίκνωσης

Από τα όρια Atterberg του μίγματος και το νομόγραμμα στο **Σχήμα 9.6**, εκτιμήθηκε ότι η βέλτιστη υγρασία είναι περίπου ίση με 25%.



Σχήμα 9.5: Προσεγγιστικός προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας κατά Proctor, με βάση τα όρια Atterberg (Στειακάκης, 2010 από Johnson and Sallberg, 1962)

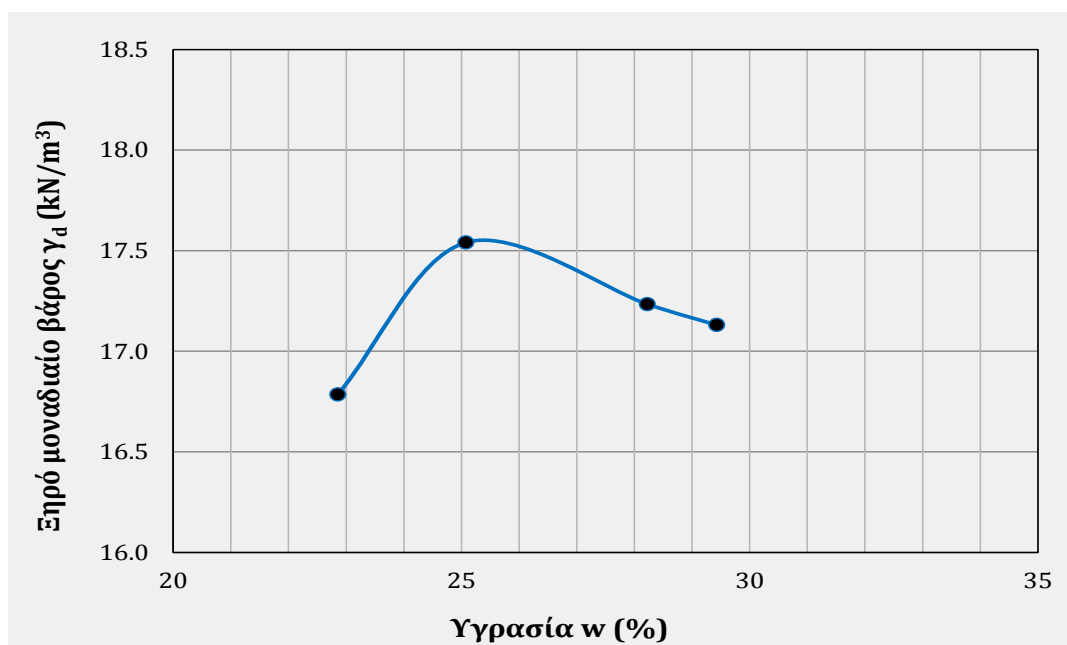
Με βάση αυτή την τιμή έγιναν 5 δοκιμές συμπίκνωσης με αρχικές υγρασίες ίσες με 21, 23, 25, 27 και 29%.

Στον **Πίνακα 9.9** παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών.

Πίνακας 9.9: Αποτελέσματα δοκιμών συμπύκνωσης με την πρότυπη μέθοδο Proctor

Αριθμός δείγματος	1	2	3	4	5
Προσδιορισμός Υγρασίας					
Βάρος υποδοχέα (g)	40,26	40,30	42,86	40,29	39,13
Βάρος υποδοχέα και υγρού δείγματος (g)	62,80	60,71	70,85	56,23	69,43
Βάρος υποδοχέα και ξηρού δείγματος (g)	58,08	56,90	65,13	52,86	62,55
Βάρος νερού (g)	21,43	20,41	27,99	15,94	30,30
Βάρος ξηρού δείγματος (g)	17,82	16,60	22,27	12,57	23,42
Περιεκτικότητα σε υγρασία, w (%)	19,24	22,86	25,08	28,23	29,43
Προσδιορισμός ξηρού μοναδιαίου βάρους					
Βάρος υγρού εδάφους και μήτρας (g)	3398	3423	3531	3544	3550
Βάρος υγρού εδάφους (g)	1665	1690	1798	1811	1817
Υγρό μοναδιαίο βάρος, γ_b (kN/m ³)	20,32	20,62	21,94	22,10	22,17
Ξηρό μοναδιαίο βάρος, γ_d (kN/m ³)	17,04	16,79	17,54	17,23	17,13

Στο **Σχήμα 9.7** δίνεται διάγραμμα της υγρασίας συμπύκνωσης σε συνάρτηση με το ξηρό μοναδιαίο βάρος, για τα τέσσερα από τα πέντε δείγματα μίγματος φυλλιτικού υλικού – ιπτάμενης τέφρας που εξετάστηκαν (οι τιμές του πρώτου δείγματος απορρίφθηκαν ως αναξιόπιστες).



Σχήμα 9.6: Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας

Συνεπώς, το μίγμα παρουσιάζει μέγιστο μοναδιαίο βάρος $\gamma_{d-max} = 17,54 \text{ kN/m}^3$, για βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης $omc = 25\%$.

9.4. Υπολογισμός υδροπερατότητας

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δύο δείγματα από το μίγμα, και από την εφαρμογή της σχέσης [7.7], προέκυψαν τα αποτελέσματα του **Πίνακα 9.10**.

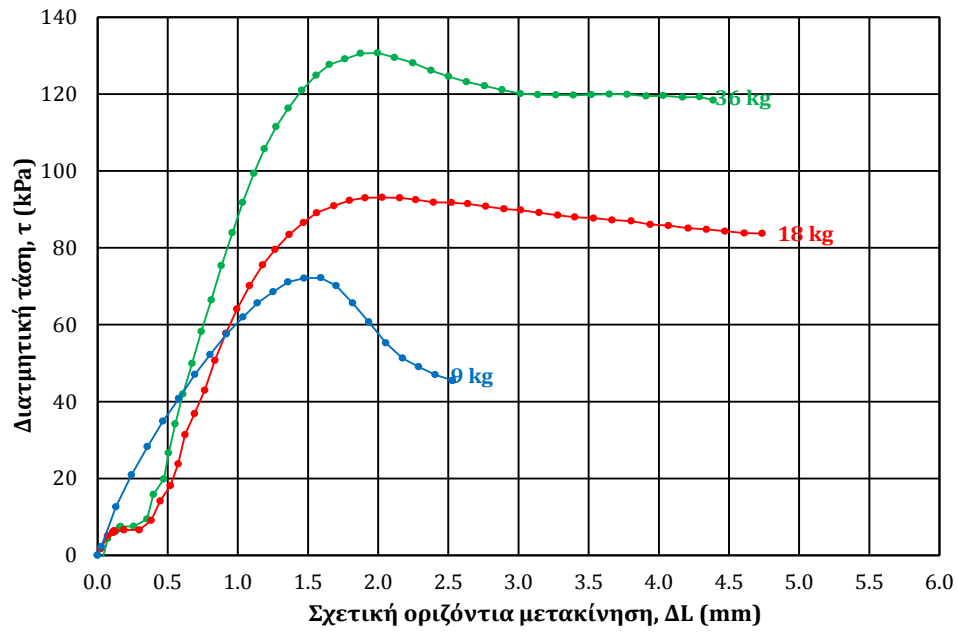
Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα μετρήσεων υδροπερατότητας με περατόμετρο μεταβλητού φορτίου

Μέτρηση	Συντελεστής υδροπερατότητας (k) σε m/sec
Δείγμα Α	
1	$9,58 \times 10^{-11}$
2	$6,87 \times 10^{-11}$
Μ.Ο.	$8,22 \times 10^{-11}$
Δείγμα Β	
1	$6,78 \times 10^{-10}$
2	$6,66 \times 10^{-10}$
Μ.Ο.	$6,72 \times 10^{-10}$

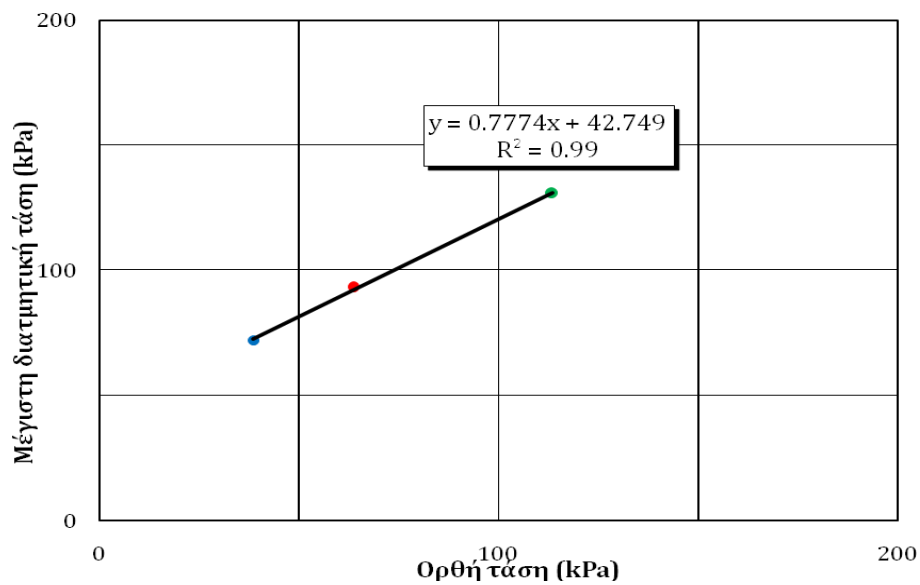
Οι μετρήσεις που έγιναν όπως και οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ, **Πίνακες Δ.1** και **Δ.2**.

9.5. Δοκιμές άμεσης διάτμησης

Στα **Σχήματα 9.7** και **9.8**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε τρία δείγματα από το εξεταζόμενο μίγμα φυλλιτικού υλικού – ιπτάμενης τέφρας ενώ, παράλληλα στο Παράρτημα Ε στους **Πίνακες Ε1, Ε2** και **Ε3**, παρατίθενται οι αναλυτικοί πίνακες υπολογισμού της διάτμησης.



Σχήμα 9.7: Οριζόντια μετακίνηση - Διατμητική τάση



Σχήμα 9.9: Ορθή τάση - Διατμητική τάση

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 9.9, βρέθηκε $c = 42,7 \text{ kPa}$ και $\varphi = 37,9^\circ$.

10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

10.1. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Στον **Πίνακα 10.1** δίνονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, τόσο για το γεωυλικό από τη Φυλλιτική χαλαζιτική σειρά, όσο και για το μίγμα υλικού από το μανδύα αποσάθρωσης φυλλιτών – χαλαζιτών (80%) και ιπτάμενη τέφρα (20% κατά βάρος). Στον Πίνακα 10.1 παρουσιάζονται επίσης οι τεχνικές προδιαγραφές των εδαφικών υλικών για χρήση ως γεωλιγικό φραγμό (τάπητα) σε ΧΥΤΑ.

Πίνακας 10.1: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών των υλικών που εξετάστηκαν σε σχέση με τις προδιαγραφές για τάπητα σε ΧΥΤΑ

Παράμετρος / Ιδιότητα	Δείγμα Φυλλιτικής Χαλαζιτικής σειράς	Δείγμα Φυλλιτικής Χαλαζιτικής σειράς -ιπτάμενης τέφρας	Αποδεκτές τιμές κατά ΦΕΚ 168/2006 και ΠΕΤΕΠ 08-05-03-02
Ορυκτολογική σύσταση	Χαλαζίας: 83%	Χαλαζίας: 74%	
	Μοσχοβίτης: 9%	Μοσχοβίτης: 10%	
	Παραγονίτης: 8%	Παραγονίτης: 14%	
		Ασβεστίτης: 2%	
Ποσοστό CaCO ₃	-	2%	< 20%
Ποσοστό TOC	0,27%	-	< 5%
Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ)	4,02meq / 100 g	-	
Κοκκομετρική διαβάθμιση	Άργιλος: 4%	Άργιλος: 3%	
	Ιλύς: 47 %	Ιλύς: 24%	
	Λεπτή Άμμος: 62%	Λεπτή Άμμος: 35%	
	Μέση Άμμος: 71%	Μέση Άμμος: 38%	
	Χονδρή Άμμος: 82%	Χονδρή Άμμος: 52%	

Περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα (d < 0,075 mm)	47%	48%	> 20% κατά βάρος
Μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων	12mm	12mm	32mm
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα (d > 0.075mm)	52%	52%	< 40% του ολικού όγκου
Συντελεστής κυρτότητας (Cc)	0,41	0,67	
Συντελεστής ομοιομορφίας (Cu)	30	20	
Όριο Υδαρότητας (LL)	28%	42%	< 40%
Όριο Πλαστικότητας (PL)	15%	37%	
Δείκτης Πλαστικότητας (PI)	12 %	5%	10 – 25%
Όριο Συρρίκνωσης (SL)	7%	2%	
Ενεργότητα	3,03	1,72	
Διόγκωση	18,69%	2,17%	
Βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (omc)	13%	25%	
Μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος	22,2 kN/m ³	17,5 kN/m ³	
Υδραυλική αγωγιμότητα (k)	7,47×10 ⁻⁸ m/sec	8,22×10 ⁻¹¹ m/sec	
	2,78×10 ⁻⁸ m/sec	6,72×10 ⁻¹⁰ m/sec	< 10 ⁻⁹ m/s
Συνοχή (c)	11,3 kPa	42,7 kPa	
Γωνία εσωτερικής τριβής (φ)	40,6 ⁰	37,9 ⁰	

10.2. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Το δείγμα από τη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά, χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Ορυκτολογικά περιέχει: Χαλαζία 83%, Μοσχοβίτη 9%, Παραγονίτη 8%

Δεν προσδιορίστηκε ανθρακικό ασβέστιο γεγονός που ικανοποιεί τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών (<40%).

- Το ποσοστό του οργανικού άνθρακα είναι 0.27%, τιμή που ικανοποιεί τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών (<5%).
- Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων προσδιορίστηκε ίση με 4,02meq / 100 g.
- Με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση το γεωυλικό συνιστάται από: Αργίλο 3%, Ιλύ 45%, Λεπτή άμμο 13%, Μεσαία άμμος 9%, Χονδρή άμμος 12% και χαλίκια 18% και χαρακτηρίζεται κατά USCS ως **«Αμμόδης αδύνατη άργιλος με χαλίκια»**.
- Η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα είναι 47% τιμή που ικανοποιεί τις προσωρινές προδιαγραφές.
- Η μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων είναι 12mm και η περιεκτικότητα χονδρόκοκκων είναι %.
- Το όριο υδαρότητας (LL) είναι 28% , το όριο πλαστικότητας (PL) 16%, το όριο συρρίκνωσης είναι 7% και ο δείκτης πλαστικότητας (PI) είναι 12%.
- Η βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης(o_{mc}) προσδιορίστηκε 13.8% με μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος 22,2 kN/m³.
- Η υδραυλική αγωγιμότητα του γεωυλικού συμπυκνωμένο +2% πλέον της o_{mc} προσδιορίστηκε με το περατόμετρο μεταβλητού φορτίου και εκτιμήθηκε ίση με $7.45 \cdot 10^{-8}$ και $2.78 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης το γεωυλικό μας κρίνεται ακατάλληλο για χρήση ως στρώση σε πυθμένα ΧΥΤΑ δεδομένου ότι απαιτείται $k < 10^{-9}$ m/s.

Το μίγμα του γεωυλικού από την φυλλιτική χαλαζιτική σειρά αναμεμιγμένο με 20% κατά βάρος ιπτάμενη τέφρα μίγμα χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω:

- Ορυκτολογικής σύστασης: Χαλαζίας 74%, Μοσχοβίτης 10%, Παραγονίτης 14% και Ασβεστίτης 2%.
- Το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου προσδιορίστηκε ίσο με 2% και ικανοποιεί τις τιμές των τεχνικών προδιαγραφών (<40%).
- Με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση το γεωυλικό συνιστάται από: Άργιλο 5%, Ιλύ 42%, Λεπτή άμμο 20%, Μεσαία άμμος 10%, Χονδρή άμμος 9% και χαλίκια 14% και χαρακτηρίζεται κατά USCS ως «Αμμόδης – ιλυώδης άργιλος με χαλίκια».
- Η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα είναι 48% ενώ για να ικανοποιούνται οι προσωρινές προδιαγραφές που απαιτούν περιεκτικότητα >15% κ.β.
- Η μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκων είναι 12mm και η περιεκτικότητα χονδρόκοκκων είναι 52%.
- Το όριο υδαρότητας (LL) για το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 200, είναι 42% , το όριο πλαστικότητας (PL) 37%, το όριο συρρίκνωσης είναι 2% και ο δείκτης πλαστικότητα (PI) είναι 5%.
- Η βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (w_{opt}) προσδιορίστηκε 25 % με μέγιστο ξηρό μοναδιαίο βάρος 17,54 kN/m³.
- Η υδραυλική αγωγιμότητα του φυλλιτικού γεωυλικού προσδιορίστηκε με το περατόμετρο μεταβλητού φορτίου σε υλικού συμπακνωμένο 2% πλέον

της οmc που η περατότητα προσδιορίστηκε ίση με $8,22 \times 10^{-11}$ και $6,72 \times 10^{-10} \text{m/s}$.

Τα προαναφερόμενα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το γεωυλικό από την φυλλιτική χαλαζιτική σειρά με την προσθήκη κατάλληλου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεωλογικός φραγμός σε ΧΥΤΑ.

Εν τούτοις, περαιτέρω διερεύνηση χρήζει η χαμηλή τιμή της ανταλλαγής κατιόντων που παρουσιάζει σε σχέση με το πάχος του γεωλογικού φραγμού και το είδος των απορριμμάτων που θα αποτεθούν στον ΧΥΤΑ.

Βιβλιογραφία

- **ASTM D422.** "Standard test methods for particle-size analysis of soils". *Annual Book of ASTM Standards*. Soil and Rock. Building Srrones ASTM, Philadelphia
- **ASTM D698.** "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort . Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Building Srrones 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)".
- **Al-Rawas, Amer A., Yahia E-A Mohamedzein, Al-Shabibi Abdulaziz S., και Salem Al-Katheiri. (2006).** «Sand-Attapulgitic clay mixtures as a landfill liner.»
- **BS 1377-1:1990.** "Methods of test for soils for civil engineering purposes. General requirements and sample preparation". British Standards Institution.
- **Carroll, D. (1959).** "Ion exchange in clays and other minerals". Geological Society of America Bulletin 70 (6), pp. 749-780.
- **Elano, G. J.** "Landfill liners and geosynthetics"

- **Head K.H. (1992).** *Manual of soil laboratory testing (vol1).*

- **Mollamahmotoglu Murat και Yilmaz, Yüksel (2005).** Potential use of fly ash and bentonite mixture as liner or cover at waste disposal areas.

- **Obrike, S.E., C.C. Osadebe, and S.S. Omoniyi (2009).** "Geotechnical analysis of two Nigerian soils for use as clay liners."

- **Βογιατζής, Δ. (2009).** *Χρήση της ιπτάμενης τέφρας και φυσικού ζεολίθου στην παρασκευή ελαφροβαρών κοονιαμάτων. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. 2009. Διδακτορική Διατριβή.*

- **Καββαδας Μ. (2007).** *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.*

- **Κλειδοπούλου Μ. και Βαβαδάκης Δ. (2008).** *Εργαστηριακές ασκήσεις μαθήματος "Υδρογεωλογία και Υδροτεχνικά έργα". Χανιά.*

- **Κούκης και Σαμπατακάκης (2000).** *Τεχνική Γεωλογία, Παπασωτηρίου.*

- **Κωστάκης Γ.(1999).** *Κεφάλαια Ακτινοσκοπίας των Κρυστάλλων. Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, .*

- **Μάρκου Ι. (1996).** *Λειτουργημένη Ελληνική λιγνητική ιπτάμενη τέφρα ένεσης τύπου αιωρήματος για την επι-τόπου βελτίωση-ενίσχυση εδαφών, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.*

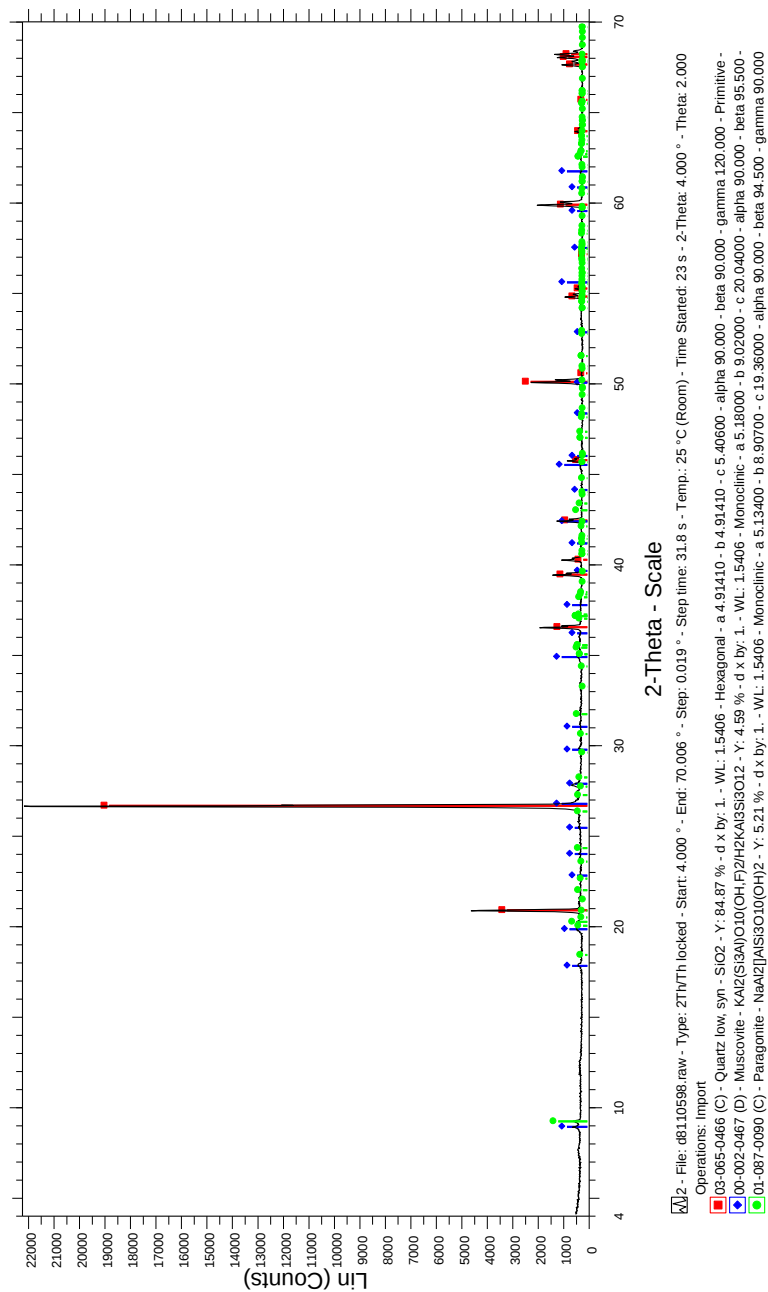
- **Παναγιωτακόπουλος Δ. Χ. (2007).** *Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων. Θεσσαλονίκη, Ζυγός.*

- **Παπαχαρίσης, Ν., Μάνου – Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι.** *Γεωτεχνική Μηχανική, Αδελφών Κυριακίδη α.ε..*

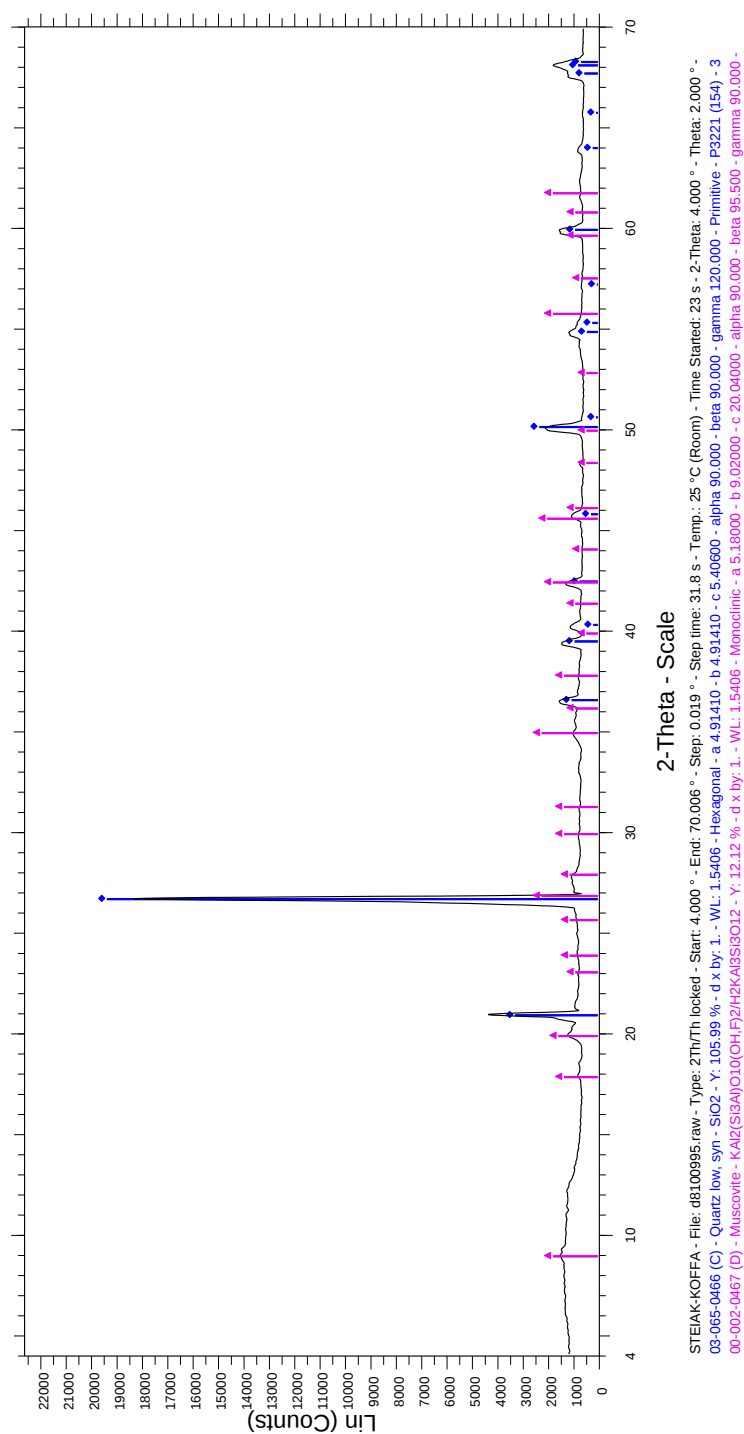
- **Σκορδύλης Α. Δ. (2001).** *Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών μη Επικίνδυνων Αποβλήτων*, ΙΩΝ.
- **Στειακάκης Ε. (2010).** *Εργαστηριακές ασκήσεις " Τεχνικής Γεωλογίας - Εδαφομηχανικής"*. Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- **Τάταρης Αθ. Α., Χριστοδούλου Γ.Ε.** Γεωλογικός χάρτης. Φύλλο χάρτη "Αλικιανού", Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους.
- **Φυτρολάκης Ν. Λ. (1980).** *Η γεωλογική δομή της Κρήτης*, Αθήνα, Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
- **Χρηστάρας Β. (2002).** *Εργαστηριακές και επι τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής*. Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



Σχήμα A.1: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμέτρου δείγματος B



Σχήμα Α.2: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμέτρου δείγματος Γ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Β.1: Αναλυτικά αποτελέσματα μέτρησης υδροπερατότητας δείγμα από την φυλλιτική χαλαζιτική σειρά (δείγμα Α)

TEST1			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	10.63	cm
δ_k	=	9.12	cm
A	=	65.27	cm ²
h1	=	118.00	cm
h2	=	38.00	cm
h3	=	66.96	cm
T	=	23.80	oC
$\eta T / \eta 20$	=	0.9	
	t	K _T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h1-h2	730	9.13E-08	8.22E-08

TEST2			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	10.63	cm
δ_k	=	9.12	cm
A	=	65.27	cm ²
h1	=	118.00	cm
h2	=	38.00	cm
h3	=	66.96	cm
T	=	23.80	oC
$\eta T / \eta 20$	=	0.9	
	t	K _T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h1-h2	713	6.95E-08	6.7E-08

Πίνακας Β.2: Αναλυτικά αποτελέσματα μέτρησης υδροπερατότητας δείγμα από την φυλλιτική χαλαζιτική σειρά (δείγμα Β)

TEST1			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_{κ}	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h₀	=	16.50	cm
h₁	=	118.00	cm
T₁	=	20.0	°C
h₂	=	66.96	cm
T₂	=	20.4	°C
T	=	20.2	°C
η_T/η_{20}	=	0.99	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h₁-h₂	725	3.03E-08	3.02E-08

TEST 2			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_{κ}	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h₀	=	16.50	cm
h₁	=	118.00	cm
T₁	=	20.0	°C
h₂	=	66.96	cm
T₂	=	20.9	°C
T	=	20.5	°C
η_T/η_{20}	=	0.99	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h₁-h₂	853	2.58E-08	2.55E-08

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας Γ.1: Δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθό φορτίο (0,04kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 1(4kg)			
ΣΥΣΚΕΥΕΣ			
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	WF	
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602	
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71	
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353	
	Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002	
Κυψέλη	Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή TETP)	TETP	
	Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0	

ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Περιγραφή	Εδαφικό
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00
Ύψος H ₀ (mm)	24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40
Μάζα m (g)	185.98	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	21.11

ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 1		
Ημερομηνία:	10/11/2010	
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	4	kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	8.98	kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	24.45	kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	10	min
Ρυθμός διάτμησης:	0.032	mm/min
Χρονικό βήμα μέτρησης:	1.5	min

Διελθών χρόνος	Οριζ. μετακίνηση	Σχετ. κατ. μετακίνηση	Ένδ. δυν. δακτυλίου	Σχετ. οριζ. μετακίνηση	Διατμητική δύναμη	Επιφάνεια επαφής	Διατμητική τάση	Ορθή τάση
t (min)	L (mm)	ΔH (mm)	(mm)	ΔL (mm)	F (kN)	A (mm ²)	τ (kPa)	σ (kPa)
0.000	-	-	-	0.000	0.000	3600	0.00	24.45
0.167	0.013	0.011	0.001	0.012	0.001	3600	0.19	24.46
0.333	0.014	0.013	0.001	0.013	0.001	3600	0.19	24.46
0.500	0.014	0.013	0.001	0.013	0.001	3600	0.19	24.46
0.667	0.014	0.015	0.001	0.013	0.001	3600	0.19	24.46
0.833	0.014	0.017	0.001	0.013	0.001	3600	0.19	24.46
1.000	0.014	0.018	0.001	0.013	0.001	3600	0.19	24.46
1.167	0.013	0.021	0.005	0.008	0.003	3600	0.94	24.45
1.333	0.073	0.031	0.009	0.064	0.006	3598	1.69	24.47
1.500	0.186	0.037	0.009	0.177	0.006	3595	1.69	24.49
1.667	0.288	0.046	0.020	0.268	0.014	3592	3.77	24.51
1.833	0.366	0.062	0.038	0.328	0.026	3590	7.16	24.52
2.000	0.448	0.074	0.048	0.400	0.032	3588	9.05	24.53
2.167	0.549	0.085	0.056	0.493	0.038	3585	10.57	24.55
2.333	0.648	0.093	0.064	0.584	0.043	3582	12.09	24.57
2.500	0.757	0.102	0.072	0.685	0.049	3579	13.61	24.59
2.667	0.867	0.109	0.079	0.788	0.053	3576	14.94	24.61
2.833	0.980	0.113	0.086	0.894	0.058	3573	16.28	24.64
3.000	1.097	0.117	0.093	1.004	0.063	3570	17.62	24.66
3.167	1.208	0.118	0.099	1.109	0.067	3567	18.78	24.68
3.333	1.326	0.118	0.105	1.221	0.071	3563	19.93	24.70
3.500	1.444	0.114	0.111	1.333	0.075	3560	21.09	24.73
3.667	1.554	0.111	0.115	1.439	0.078	3557	21.87	24.75
3.833	1.673	0.104	0.122	1.551	0.083	3553	23.23	24.77
4.000	1.789	0.099	0.126	1.663	0.085	3550	24.01	24.80
4.167	1.910	0.089	0.131	1.779	0.089	3547	24.99	24.82
4.333	2.033	0.081	0.135	1.898	0.091	3543	25.78	24.85

4.500	2.149	0.071	0.140	2.009	0.095	3540	26.76	24.87
4.667	2.268	0.058	0.144	2.124	0.097	3536	27.55	24.89
4.833	2.380	0.046	0.149	2.231	0.101	3533	28.53	24.92
5.000	2.500	0.032	0.153	2.347	0.104	3530	29.32	24.94
5.167	2.621	0.016	0.157	2.464	0.106	3526	30.12	24.97
5.333	2.732	0.001	0.161	2.571	0.109	3523	30.92	24.99
5.500	2.853	(0.015)	0.165	2.688	0.112	3519	31.72	25.01
5.667	2.966	(0.034)	0.168	2.798	0.114	3516	32.32	25.04
5.833	3.078	(0.051)	0.171	2.907	0.116	3513	32.93	25.06
6.000	3.193	(0.069)	0.174	3.019	0.118	3509	33.54	25.08
6.167	3.311	(0.089)	0.177	3.134	0.120	3506	34.15	25.11
6.333	3.421	(0.106)	0.180	3.241	0.122	3503	34.76	25.13
6.500	3.536	(0.125)	0.183	3.353	0.124	3499	35.38	25.16
6.667	3.654	(0.144)	0.185	3.469	0.125	3496	35.80	25.18
6.833	3.769	(0.162)	0.188	3.581	0.127	3493	36.42	25.21
7.000	3.890	(0.182)	0.190	3.700	0.129	3489	36.84	25.23
7.167	4.002	(0.200)	0.192	3.810	0.130	3486	37.26	25.26
7.333	4.126	(0.217)	0.194	3.932	0.131	3482	37.69	25.28
7.500	4.248	(0.237)	0.195	4.053	0.132	3478	37.92	25.31
7.667	4.361	(0.254)	0.198	4.163	0.134	3475	38.54	25.33
7.833	4.483	(0.273)	0.199	4.284	0.135	3471	38.78	25.36
8.000	4.605	(0.290)	0.200	4.405	0.135	3468	39.02	25.39
8.167	4.732	(0.308)	0.201	4.531	0.136	3464	39.25	25.41
8.333	4.855	(0.325)	0.202	4.653	0.137	3460	39.49	25.44
8.500	4.979	(0.341)	0.202	4.777	0.137	3457	39.53	25.47
8.667	5.106	(0.355)	0.202	4.904	0.137	3453	39.58	25.50
8.833	5.238	(0.369)	0.202	5.036	0.137	3449	39.62	25.52
9.000	5.367	(0.383)	0.202	5.165	0.137	3445	39.67	25.55
9.167	5.479	(0.396)	0.202	5.277	0.137	3442	39.71	25.58
9.333	5.622	(0.409)	0.201	5.421	0.136	3437	39.56	25.61
9.500	5.743	(0.422)	0.200	5.543	0.135	3434	39.40	25.64
9.667	5.875	(0.434)	0.199	5.676	0.135	3430	39.25	25.67
9.833	5.989	(0.444)	0.197	5.792	0.133	3426	38.90	25.69
10.000	6.115	(0.455)	0.195	5.920	0.132	3422	38.55	25.72
10.167	6.239	(0.464)	0.193	6.046	0.131	3419	38.19	25.75
10.333	6.355	(0.472)	0.191	6.164	0.129	3415	37.84	25.78
10.500	6.476	(0.480)	0.189	6.287	0.128	3411	37.48	25.81
10.667	6.493	(0.480)	0.177	6.316	0.120	3411	35.11	25.81
10.683	6.493	(0.480)	0.177	6.316	0.120	3411	35.11	25.81
Μέγιστη διατμητική τάση =							39.71	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =							25.58	kPa

Πίνακας Γ.2: Δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθό φορτίο (0,12kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 2(12kg)								
ΣΥΣΚΕΥΕΣ								
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	WF						
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602						
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71						
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353						
	Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002						
Κυψέλη	Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ						
	Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0						
ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ								
Περιγραφή	Φυλλιτικό							
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα							
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ								
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00					
Ύψος H ₀ (mm)	24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40					
Μάζα m (g)	182.25	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	20.69					
ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 2								
Ημερομηνία:	10/11/2010							
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	12	kg						
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	16.98	kg						
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	46.25	kPa						
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	12	min						
Ρυθμός διάτμησης:	0.032	mm/min						
Χρονικό βήμα μέτρησης:	1.5	min						
Διελθών χρόνος t (min)	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔΗ (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔΙ (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής Α (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	3600.00	00.00	46.25
00.17	00.06	00.01	00.03	00.03	00.02	3598.98	05.45	46.26
00.33	00.16	00.02	00.04	00.12	00.02	3596.31	06.77	46.29
00.50	00.25	00.03	00.05	00.20	00.04	3593.94	09.79	46.32
00.67	00.36	00.05	00.06	00.29	00.04	3591.24	12.06	46.36
00.83	00.47	00.06	00.07	00.39	00.05	3588.27	13.95	46.40
01.00	00.58	00.08	00.08	00.49	00.06	3585.18	15.47	46.44
01.17	00.68	00.08	00.09	00.59	00.06	3582.18	16.62	46.48
01.33	00.79	00.10	00.10	00.70	00.06	3579.06	17.96	46.52
01.50	00.91	00.10	00.10	00.81	00.07	3575.70	19.49	46.56
01.67	01.03	00.11	00.11	00.92	00.07	3572.49	20.64	46.60
01.83	01.15	00.12	00.12	01.03	00.08	3568.98	21.99	46.65
02.00	01.26	00.12	00.12	01.14	00.08	3565.80	22.77	46.69
02.17	01.38	00.12	00.13	01.25	00.09	3562.44	24.12	46.73
02.33	01.49	00.13	00.13	01.36	00.09	3559.17	25.09	46.78
02.50	01.62	00.13	00.14	01.48	00.09	3555.63	26.26	46.82
02.67	01.74	00.13	00.14	01.60	00.10	3552.12	27.23	46.87
02.83	01.86	00.13	00.15	01.71	00.10	3548.82	28.40	46.91
03.00	01.98	00.13	00.15	01.83	00.10	3545.25	29.20	46.96
03.17	02.09	00.13	00.16	01.93	00.11	3541.98	30.18	47.00
03.33	02.21	00.12	00.16	02.05	00.11	3538.50	30.97	47.05
03.50	02.33	00.12	00.17	02.17	00.11	3535.05	31.77	47.10
03.67	02.45	00.11	00.17	02.28	00.12	3531.72	32.56	47.14
03.83	02.57	00.11	00.17	02.39	00.12	3528.24	33.36	47.19
04.00	02.68	00.11	00.18	02.50	00.12	3525.03	34.16	47.23

04.17	02.79	00.10	00.18	02.61	00.12	3521.67	34.77	47.27
04.33	02.91	00.10	00.18	02.73	00.12	3518.22	35.38	47.32
04.50	03.02	00.09	00.19	02.83	00.13	3515.04	35.99	47.36
04.67	03.14	00.08	00.19	02.95	00.13	3511.59	36.41	47.41
04.83	03.26	00.08	00.19	03.07	00.13	3508.02	36.83	47.46
05.00	03.37	00.07	00.19	03.17	00.13	3504.78	37.45	47.50
05.17	03.49	00.07	00.20	03.29	00.13	3501.24	37.87	47.55
05.33	03.61	00.06	00.20	03.41	00.13	3497.61	38.30	47.60
05.50	03.73	00.06	00.20	03.53	00.13	3494.22	38.53	47.65
05.67	03.85	00.05	00.20	03.65	00.14	3490.65	38.95	47.69
05.83	03.97	00.04	00.20	03.76	00.14	3487.14	39.38	47.74
06.00	04.09	00.04	00.20	03.89	00.14	3483.42	39.62	47.79
06.17	04.22	00.03	00.21	04.01	00.14	3479.64	39.86	47.85
06.33	04.34	00.02	00.21	04.13	00.14	3476.04	40.09	47.89
06.50	04.47	00.02	00.21	04.26	00.14	3472.08	40.33	47.95
06.67	04.59	00.01	00.21	04.39	00.14	3468.42	40.37	48.00
06.83	04.73	00.01	00.21	04.52	00.14	3464.40	40.42	48.06
07.00	04.85	00.01	00.21	04.65	00.14	3460.65	40.86	48.11
07.17	04.98	00.00	00.21	04.77	00.14	3457.02	40.90	48.16
07.33	05.11	00.00	00.21	04.90	00.14	3452.94	40.95	48.22
07.50	05.23	-00.01	00.21	05.02	00.14	3449.40	41.19	48.26
07.67	05.37	-00.01	00.21	05.16	00.14	3445.20	41.24	48.32
07.83	05.50	-00.01	00.21	05.29	00.14	3441.42	41.28	48.38
08.00	05.61	-00.02	00.21	05.40	00.14	3437.94	41.32	48.43
08.17	05.74	-00.02	00.21	05.53	00.14	3434.16	41.57	48.48
08.33	05.86	-00.03	00.21	05.65	00.14	3430.41	41.61	48.53
08.50	05.98	-00.03	00.21	05.77	00.14	3426.81	41.65	48.58
08.67	06.11	-00.04	00.21	05.90	00.14	3423.03	41.70	48.64
08.83	06.22	-00.04	00.21	06.01	00.14	3419.73	41.74	48.68
09.00	06.34	-00.05	00.21	06.13	00.14	3416.10	41.78	48.74
09.17	06.46	-00.05	00.21	06.25	00.14	3412.44	41.83	48.79
09.33	06.57	-00.05	00.21	06.36	00.14	3409.11	41.87	48.84
09.50	06.70	-00.05	00.21	06.49	00.14	3405.45	41.92	48.89
09.67	06.81	-00.06	00.21	06.60	00.14	3402.06	41.96	48.94
09.83	06.93	-00.06	00.21	06.72	00.14	3398.43	42.00	48.99
10.00	07.05	-00.06	00.21	06.84	00.14	3394.89	42.05	49.04
10.17	07.16	-00.07	00.21	06.95	00.14	3391.53	42.09	49.09
10.33	07.28	-00.07	00.21	07.07	00.14	3387.96	42.13	49.14
10.50	07.40	-00.07	00.21	07.19	00.14	3384.42	42.18	49.19
10.67	07.52	-00.07	00.21	07.31	00.14	3380.79	42.22	49.24
10.83	07.63	-00.07	00.21	07.42	00.14	3377.37	42.26	49.29
11.00	07.76	-00.07	00.21	07.54	00.14	3373.68	42.31	49.35
11.17	07.88	-00.07	00.21	07.66	00.14	3370.08	42.36	49.40
11.33	08.00	-00.07	00.21	07.79	00.14	3366.27	42.40	49.46
11.50	08.13	-00.06	00.21	07.92	00.14	3362.46	42.45	49.51
11.67	08.25	-00.06	00.21	08.04	00.14	3358.74	42.50	49.57
11.83	08.33	-00.06	00.21	08.11	00.14	3356.58	42.53	49.60

Μέγιστη διατμητική τάση =	42.53	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	49.60	kPa

Πίνακας Γ.3: Δοκιμή διάτμησης υπό ορθό φορτίο (0,24kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 3(24kg)									
ΣΥΣΚΕΥΕΣ									
Συσκευή διάτμησης		Εταιρία	WF						
		Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602						
		Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71						
Δυναμομετρικός δακτύλιος		Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353						
		Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002						
Κυψέλη		Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ						
		Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0						
ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ									
Περιγραφή		Εδαφικό							
Προετοιμασία δείγματος		Διαμόρφωση με μήτρα							
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ									
Διάμετρος/πλάτος D (mm)		60.0	Εμβαδόν Α ₀ (mm ²)	3600.00					
Ύψος Η ₀ (mm)		24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40					
Μάζα m (g)		177.31	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	20.13					
ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 3									
Ημερομηνία:		10/11/2010							
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:		24 kg							
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:		28.98 kg							
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:		78.93 kPa							
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:		15 min							
Ρυθμός διάτμησης:		0.032 mm/min							
Χρονικό βήμα μέτρησης:		1.5 min							
Διελθών χρόνος		Οριζ. μετακίνηση	Σχετ. κατ. μετακίνηση	Ένδ. δυν. δακτυλίου	Σχετ. οριζ. μετακίνηση	Διατμητική δύναμη	Επιφάνεια επαφής	Διατμητική τάση	Ορθή τάση
t (sec)	t(min)	L (mm)	ΔΗ (mm)	(mm)	ΔL (mm)	F (kN)	A (mm ²)	τ (kPa)	σ (kPa)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3600.00	0.00	78.93
10	0.17	0.08	0.01	0.04	0.04	0.03	3598.95	7.52	78.96
20	0.33	0.18	0.03	0.08	0.10	0.05	3597.03	14.86	79.00
30	0.50	0.26	0.04	0.09	0.17	0.06	3595.05	17.69	79.04
40	0.67	0.30	0.05	0.10	0.20	0.07	3594.00	19.20	79.07
50	0.83	0.31	0.05	0.10	0.21	0.07	3593.85	19.20	79.07
60	1.00	0.31	0.05	0.10	0.21	0.07	3593.79	19.20	79.07
70	1.17	0.31	0.05	0.10	0.21	0.07	3593.76	19.20	79.07
80	1.33	0.31	0.05	0.10	0.21	0.07	3593.73	19.20	79.07
90	1.50	0.31	0.05	0.10	0.21	0.07	3593.70	19.20	79.07
100	1.67	0.32	0.06	0.10	0.21	0.07	3593.64	19.39	79.07
110	1.83	0.32	0.06	0.10	0.22	0.07	3593.55	19.39	79.08
120	2.00	0.40	0.06	0.10	0.30	0.07	3591.06	19.59	79.13
130	2.17	0.52	0.07	0.11	0.42	0.07	3587.52	19.80	79.21
140	2.33	0.60	0.08	0.13	0.47	0.09	3585.90	25.09	79.24
150	2.50	0.70	0.10	0.16	0.55	0.10	3583.62	29.26	79.30
160	2.67	0.80	0.13	0.17	0.64	0.11	3580.92	31.36	79.36
170	2.83	0.91	0.16	0.18	0.73	0.12	3578.07	34.03	79.42
180	3.00	1.03	0.18	0.19	0.84	0.13	3574.68	35.58	79.49
190	3.17	1.14	0.21	0.20	0.94	0.13	3571.77	37.50	79.56
200	3.33	1.26	0.23	0.21	1.05	0.14	3568.62	39.62	79.63
210	3.50	1.37	0.26	0.22	1.15	0.15	3565.53	41.74	79.70
220	3.67	1.48	0.27	0.23	1.25	0.15	3562.50	43.49	79.77
230	3.83	1.60	0.29	0.24	1.36	0.16	3559.23	45.24	79.84

240	4.00	1.71	0.31	0.25	1.46	0.17	3556.08	46.99	79.91
250	4.17	1.84	0.32	0.26	1.58	0.17	3552.57	48.56	79.99
260	4.33	1.95	0.33	0.26	1.69	0.18	3549.42	49.94	80.06
270	4.50	2.07	0.35	0.27	1.80	0.18	3545.88	51.51	80.14
280	4.67	2.20	0.35	0.28	1.92	0.19	3542.37	53.09	80.22
290	4.83	2.32	0.36	0.28	2.04	0.19	3538.80	52.95	80.30
300	5.00	2.44	0.36	0.29	2.15	0.19	3535.56	55.11	80.37
310	5.17	2.56	0.37	0.29	2.26	0.20	3532.14	56.31	80.45
320	5.33	2.68	0.37	0.30	2.38	0.20	3528.63	57.90	80.53
330	5.50	2.80	0.37	0.31	2.50	0.21	3525.15	59.11	80.61
340	5.67	2.93	0.37	0.32	2.62	0.21	3521.52	60.71	80.69
350	5.83	3.05	0.37	0.32	2.73	0.22	3518.22	62.11	80.77
360	6.00	3.18	0.37	0.33	2.85	0.22	3514.59	63.33	80.85
370	6.17	3.29	0.37	0.34	2.96	0.23	3511.29	64.54	80.93
380	6.33	3.42	0.37	0.34	3.07	0.23	3507.78	65.76	81.01
390	6.50	3.54	0.37	0.35	3.20	0.24	3504.15	67.18	81.09
400	6.67	3.66	0.37	0.35	3.31	0.24	3500.76	68.22	81.17
410	6.83	3.77	0.36	0.36	3.42	0.24	3497.55	69.24	81.25
420	7.00	3.89	0.36	0.36	3.53	0.25	3494.25	70.28	81.32
430	7.17	4.00	0.36	0.37	3.63	0.25	3491.04	71.12	81.40
440	7.33	4.12	0.35	0.37	3.74	0.25	3487.71	72.35	81.48
450	7.50	4.23	0.35	0.38	3.85	0.26	3484.38	73.20	81.55
460	7.67	4.36	0.35	0.38	3.97	0.26	3480.78	74.24	81.64
470	7.83	4.47	0.34	0.39	4.09	0.26	3477.45	75.09	81.72
480	8.00	4.59	0.34	0.39	4.20	0.26	3473.94	75.75	81.80
490	8.17	4.72	0.33	0.39	4.32	0.27	3470.34	76.61	81.88
500	8.33	4.83	0.33	0.40	4.43	0.27	3467.01	77.46	81.96
510	8.50	4.96	0.32	0.40	4.56	0.27	3463.35	78.33	82.05
520	8.67	5.08	0.31	0.41	4.68	0.27	3459.69	79.19	82.14
530	8.83	5.20	0.31	0.41	4.79	0.28	3456.18	79.86	82.22
540	9.00	5.33	0.30	0.41	4.92	0.28	3452.37	80.73	82.31
550	9.17	5.46	0.30	0.41	5.05	0.28	3448.59	81.02	82.40
560	9.33	5.58	0.29	0.42	5.17	0.28	3445.02	81.89	82.49
570	9.50	5.72	0.29	0.42	5.30	0.28	3441.00	82.57	82.58
580	9.67	5.85	0.28	0.42	5.43	0.28	3437.22	82.86	82.67
590	9.83	5.98	0.28	0.43	5.56	0.29	3433.23	83.74	82.77
600	10.00	6.11	0.28	0.43	5.69	0.29	3429.42	84.03	82.86
610	10.17	6.24	0.27	0.43	5.82	0.29	3425.55	84.52	82.95
620	10.33	6.37	0.26	0.43	5.94	0.29	3421.83	84.81	83.04
630	10.50	6.51	0.26	0.43	6.07	0.29	3417.78	85.31	83.14
640	10.67	6.64	0.26	0.43	6.21	0.29	3413.85	85.61	83.24
650	10.83	6.76	0.25	0.43	6.33	0.29	3410.16	85.90	83.33
660	11.00	6.89	0.25	0.44	6.45	0.29	3406.44	86.39	83.42
670	11.17	7.01	0.24	0.44	6.57	0.29	3402.84	86.68	83.51
680	11.33	7.13	0.24	0.44	6.70	0.30	3399.12	86.97	83.60
690	11.50	7.26	0.23	0.44	6.82	0.30	3395.40	87.27	83.69
700	11.67	7.38	0.23	0.44	6.94	0.30	3391.89	87.56	83.78
710	11.83	7.50	0.23	0.44	7.06	0.30	3388.26	87.85	83.87
720	12.00	7.62	0.22	0.44	7.18	0.30	3384.75	87.94	83.95
730	12.17	7.73	0.22	0.44	7.29	0.30	3381.45	88.23	84.04
740	12.33	7.84	0.22	0.44	7.40	0.30	3377.94	88.52	84.12
750	12.50	7.97	0.21	0.44	7.53	0.30	3374.22	88.62	84.22
760	12.67	8.09	0.21	0.44	7.64	0.30	3370.68	88.91	84.30
770	12.83	8.20	0.21	0.44	7.75	0.30	3367.38	89.00	84.39
780	13.00	8.32	0.21	0.44	7.88	0.30	3363.69	89.30	84.48
790	13.17	8.44	0.21	0.44	8.00	0.30	3360.15	89.39	84.57
800	13.33	8.56	0.20	0.44	8.12	0.30	3356.40	89.49	84.66
810	13.50	8.68	0.20	0.44	8.24	0.30	3352.80	89.59	84.75
820	13.67	8.80	0.20	0.44	8.36	0.30	3349.20	89.68	84.85
830	13.83	8.93	0.20	0.44	8.48	0.30	3345.54	89.58	84.94
840	14.00	9.06	0.19	0.44	8.61	0.30	3341.61	89.68	85.04
850	14.17	9.17	0.19	0.44	8.73	0.30	3338.07	89.58	85.13
860	14.33	9.31	0.19	0.44	8.87	0.30	3334.05	89.68	85.23
870	14.50	9.43	0.19	0.44	8.98	0.30	3330.48	89.78	85.32
880	14.67	9.56	0.19	0.44	9.12	0.30	3326.43	89.69	85.43
890	14.83	9.69	0.19	0.44	9.25	0.30	3322.47	89.59	85.53

900	15.00	9.83	0.19	0.44	9.39	0.30	3318.45	89.70	85.63
910	15.17	9.96	0.19	0.44	9.52	0.30	3314.43	89.60	85.74
920	15.33	10.09	0.19	0.44	9.65	0.30	3310.50	89.51	85.84
924	15.40	10.14	0.19	0.44	9.71	0.30	3308.85	89.55	85.88

Μέγιστη διατμητική τάση =	89.78	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	85.32	kPa

Πίνακας Γ.4: Δοκιμή διάτμησης υπό ορθό φορτίο (0,32kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 4(32kg)

ΣΥΣΚΕΥΕΣ			
Συσκευή διάτμησης		Εταιρία	WF
		Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602
		Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71
Δυναμομετρικός δακτύλιος		Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353
		Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002
Κυψέλη		Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ
		Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0

ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ		
Περιγραφή		Εδαφικό
Προετοιμασία δείγματος		Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ				
Διάμετρος/πλάτος D (mm)		60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00
Ύψος H ₀ (mm)		24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40
Μάζα m (g)		177.31	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	20.13

ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 4	
Ημερομηνία:	10/11/2010
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	32 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	36.98 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	100.73 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	18 min
Ρυθμός διάτμησης:	0.032 mm/min
Χρονικό βήμα μέτρησης:	1.5 min

Διελθών χρόνος		Οριζ. μετακίνηση	Σχετ. κατ. μετακίνηση	Ένδ. δυν. δακτυλίου	Σχετ. οριζ. μετακίνηση	Διατμητική δύναμη	Επιφάνεια επαφής	Διατμητική τάση	Ορθή τάση
t (sec)	t(mi n)	L (mm)	ΔH (mm)	(mm)	ΔL (mm)	F (kN)	A (mm ²)	τ (kPa)	σ (kPa)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3600.00	0.00	100.73
10	0.17	0.08	0.01	0.05	0.03	0.04	3599.04	9.77	100.75
20	0.33	0.18	0.03	0.08	0.10	0.05	3596.88	15.05	100.81
30	0.50	0.27	0.04	0.09	0.17	0.06	3594.78	17.31	100.87
40	0.67	0.32	0.04	0.10	0.22	0.07	3593.55	18.83	100.91
50	0.83	0.32	0.04	0.10	0.22	0.07	3593.34	18.83	100.91
60	1.00	0.32	0.05	0.10	0.22	0.07	3593.31	19.01	100.91
70	1.17	0.33	0.05	0.10	0.23	0.07	3593.25	19.02	100.92
80	1.33	0.33	0.05	0.10	0.23	0.07	3593.16	18.83	100.92
90	1.50	0.33	0.05	0.10	0.23	0.07	3593.13	18.83	100.92
100	1.67	0.33	0.05	0.10	0.23	0.07	3593.10	19.02	100.92
110	1.83	0.34	0.06	0.10	0.24	0.07	3592.89	19.39	100.93
120	2.00	0.41	0.06	0.10	0.30	0.07	3590.88	19.40	100.98
130	2.17	0.53	0.07	0.11	0.43	0.07	3587.25	20.18	101.09

140	2.33	0.62	0.08	0.13	0.49	0.09	3585.42	24.91	101.14
150	2.50	0.73	0.10	0.15	0.59	0.10	3582.45	27.57	101.22
160	2.67	0.84	0.14	0.17	0.67	0.11	3579.90	31.94	101.29
170	2.83	0.94	0.16	0.19	0.75	0.13	3577.41	35.36	101.36
180	3.00	1.05	0.19	0.21	0.84	0.14	3574.83	39.55	101.44
190	3.17	1.16	0.21	0.23	0.93	0.15	3572.10	42.99	101.51
200	3.33	1.26	0.23	0.23	1.03	0.15	3568.98	43.41	101.60
210	3.50	1.38	0.25	0.25	1.13	0.17	3566.01	46.67	101.69
220	3.67	1.49	0.26	0.26	1.23	0.18	3563.04	49.18	101.77
230	3.83	1.60	0.28	0.27	1.33	0.18	3560.13	51.50	101.86
240	4.00	1.72	0.29	0.28	1.43	0.19	3556.98	53.63	101.95
250	4.17	1.84	0.30	0.30	1.54	0.20	3553.77	56.16	102.04
260	4.33	1.95	0.31	0.30	1.65	0.20	3550.41	57.35	102.13
270	4.50	2.08	0.32	0.31	1.77	0.21	3546.96	59.13	102.23
280	4.67	2.20	0.33	0.32	1.88	0.22	3543.60	61.09	102.33
290	4.83	2.32	0.33	0.33	1.99	0.22	3540.30	62.68	102.43
300	5.00	2.45	0.34	0.34	2.11	0.23	3536.76	64.65	102.53
310	5.17	2.57	0.34	0.35	2.22	0.23	3533.40	66.24	102.63
320	5.33	2.69	0.35	0.35	2.34	0.24	3529.74	67.27	102.73
330	5.50	2.82	0.35	0.36	2.46	0.24	3526.23	68.87	102.83
340	5.67	2.94	0.35	0.36	2.57	0.25	3522.84	69.71	102.93
350	5.83	3.06	0.35	0.37	2.70	0.25	3519.15	70.55	103.04
360	6.00	3.18	0.35	0.37	2.81	0.25	3515.76	71.58	103.14
370	6.17	3.30	0.35	0.38	2.93	0.26	3512.19	72.62	103.25
380	6.33	3.43	0.36	0.39	3.04	0.26	3508.68	74.23	103.35
390	6.50	3.55	0.36	0.39	3.16	0.26	3505.23	75.46	103.45
400	6.67	3.67	0.36	0.40	3.28	0.27	3501.72	76.70	103.55
410	6.83	3.79	0.36	0.40	3.39	0.27	3498.45	77.93	103.65
420	7.00	3.91	0.36	0.41	3.50	0.28	3495.12	79.16	103.75
430	7.17	4.03	0.37	0.42	3.61	0.28	3491.70	80.40	103.85
440	7.33	4.14	0.37	0.42	3.72	0.28	3488.49	81.64	103.95
450	7.50	4.25	0.37	0.43	3.83	0.29	3485.25	82.49	104.04
460	7.67	4.37	0.37	0.43	3.94	0.29	3481.89	83.74	104.14
470	7.83	4.48	0.37	0.43	4.05	0.29	3478.53	84.40	104.24
480	8.00	4.60	0.37	0.44	4.16	0.30	3475.17	85.65	104.35
490	8.17	4.72	0.37	0.44	4.28	0.30	3471.72	86.52	104.45
500	8.33	4.83	0.37	0.45	4.38	0.30	3468.48	87.57	104.55
510	8.50	4.96	0.37	0.45	4.50	0.31	3464.94	88.44	104.65
520	8.67	5.08	0.37	0.46	4.62	0.31	3461.28	89.32	104.76
530	8.83	5.20	0.37	0.46	4.74	0.31	3457.89	89.99	104.87
540	9.00	5.32	0.37	0.46	4.86	0.31	3454.17	90.68	104.98
550	9.17	5.45	0.37	0.47	4.98	0.32	3450.57	91.36	105.09
560	9.33	5.57	0.37	0.47	5.10	0.32	3447.06	92.24	105.20
570	9.50	5.70	0.38	0.47	5.23	0.32	3443.25	92.93	105.31
580	9.67	5.83	0.38	0.48	5.35	0.32	3439.41	93.62	105.43
590	9.83	5.95	0.38	0.48	5.48	0.32	3435.75	94.12	105.54
600	10.00	6.09	0.38	0.48	5.61	0.32	3431.73	94.62	105.67
610	10.17	6.22	0.38	0.48	5.74	0.33	3427.95	95.12	105.78
620	10.33	6.35	0.38	0.49	5.86	0.33	3424.11	95.82	105.90
630	10.50	6.48	0.38	0.49	6.00	0.33	3420.09	96.13	106.03
640	10.67	6.61	0.39	0.49	6.12	0.33	3416.40	96.63	106.14
650	10.83	6.74	0.39	0.49	6.25	0.33	3412.62	97.14	106.26
660	11.00	6.87	0.39	0.49	6.37	0.33	3408.78	97.44	106.38
670	11.17	6.99	0.39	0.49	6.49	0.33	3405.21	97.74	106.49
680	11.33	7.11	0.39	0.49	6.62	0.33	3401.49	98.25	106.61
690	11.50	7.24	0.39	0.50	6.75	0.33	3397.65	98.56	106.73
700	11.67	7.36	0.39	0.50	6.87	0.34	3393.99	99.06	106.84
710	11.83	7.48	0.39	0.50	6.99	0.34	3390.42	99.17	106.95
720	12.00	7.60	0.39	0.50	7.10	0.34	3386.88	99.47	107.07
730	12.17	7.72	0.39	0.50	7.23	0.34	3383.25	99.78	107.18
740	12.33	7.84	0.39	0.50	7.34	0.34	3379.77	100.08	107.29
750	12.50	7.96	0.39	0.50	7.46	0.34	3376.29	100.38	107.40
760	12.67	8.08	0.39	0.50	7.57	0.34	3372.81	100.69	107.51
770	12.83	8.19	0.39	0.50	7.68	0.34	3369.48	100.79	107.62
780	13.00	8.31	0.39	0.50	7.80	0.34	3365.88	101.10	107.73
790	13.17	8.43	0.39	0.50	7.92	0.34	3362.31	101.20	107.85

800	13.33	8.54	0.39	0.50	8.04	0.34	3358.83	101.51	107.96
810	13.50	8.66	0.39	0.50	8.16	0.34	3355.23	101.62	108.08
820	13.67	8.78	0.39	0.51	8.27	0.34	3351.90	101.92	108.18
830	13.83	8.90	0.39	0.51	8.39	0.34	3348.30	102.03	108.30
840	14.00	9.02	0.39	0.51	8.52	0.34	3344.52	102.15	108.42
850	14.17	9.14	0.39	0.51	8.63	0.34	3341.01	102.25	108.54
860	14.33	9.26	0.39	0.51	8.76	0.34	3337.23	102.37	108.66
870	14.50	9.39	0.39	0.51	8.89	0.34	3333.36	102.49	108.78
880	14.67	9.52	0.39	0.51	9.01	0.34	3329.70	102.60	108.90
890	14.83	9.65	0.40	0.51	9.14	0.34	3325.80	102.72	109.03
900	15.00	9.78	0.40	0.51	9.27	0.34	3321.90	102.84	109.16
910	15.17	9.91	0.40	0.50	9.40	0.34	3317.91	102.76	109.29
920	15.33	10.04	0.40	0.50	9.53	0.34	3314.07	102.88	109.42
930	15.50	10.17	0.40	0.50	9.66	0.34	3310.11	103.00	109.55
940	15.67	10.29	0.40	0.50	9.79	0.34	3306.33	102.92	109.67
950	15.83	10.43	0.41	0.50	9.93	0.34	3302.22	103.05	109.81
960	16.00	10.56	0.41	0.50	10.06	0.34	3298.35	103.17	109.94
970	16.17	10.69	0.41	0.50	10.18	0.34	3294.54	103.29	110.07
980	16.33	10.82	0.41	0.50	10.31	0.34	3290.61	103.41	110.20
990	16.50	10.94	0.41	0.50	10.44	0.34	3286.95	103.52	110.32
1000	16.67	11.07	0.41	0.50	10.56	0.34	3283.11	103.44	110.45
1010	16.83	11.18	0.41	0.50	10.68	0.34	3279.54	103.55	110.57
1020	17.00	11.31	0.42	0.50	10.81	0.34	3275.67	103.67	110.70
1030	17.17	11.44	0.42	0.50	10.94	0.34	3271.95	103.79	110.83
1040	17.33	11.56	0.42	0.50	11.06	0.34	3268.29	103.91	110.95
1050	17.50	11.68	0.42	0.50	11.18	0.34	3264.57	103.82	111.08
1060	17.67	11.81	0.42	0.50	11.30	0.34	3260.91	104.14	111.20
1070	17.83	11.93	0.42	0.50	11.43	0.34	3257.19	103.85	111.33
1080	18.00	12.04	0.42	0.50	11.54	0.34	3253.77	103.96	111.45
1090	18.17	12.15	0.42	0.50	11.65	0.34	3250.41	103.86	111.56
1100	18.33	12.27	0.42	0.50	11.77	0.34	3246.78	104.18	111.69
1110	18.50	12.40	0.42	0.50	11.90	0.34	3243.06	104.09	111.81
1120	18.67	12.51	0.42	0.50	12.01	0.34	3239.76	104.20	111.93
1129	18.82	12.61	0.42	0.49	12.12	0.33	3236.49	102.42	112.04

Μέγιστη διατμητική τάση =	104.20	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	111.93	kPa

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Πίνακας Δ.1: Αναλυτικά αποτελέσματα μετρήσεων υδροπερατότητας στο δείγμα μίγματος Α

TEST1			
α	=	0.03	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_k	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h_0	=	16.50	cm
h_1	=	120.50	cm
T_1	=	12.3	°C
h_2	=	72.00	cm
T_2	=	13.4	°C
T	=	12.9	°C
η_T/η_{20}	=	1.23	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h_1-h_2	255600	7.82E-11	9.58E-11

TEST2			
α	=	0.03	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_k	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h_0	=	16.50	cm
h_1	=	118.50	cm
T_1	=	14.8	°C
h_2	=	78.50	cm
T_2	=	15.3	°C
T	=	15.1	°C
η_T/η_{20}	=	1.15	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h_1-h_2	267400	5.98E-11	6.87E-11

Πίνακας Δ.2: Αναλυτικά αποτελέσματα μετρήσεων υδροπερατότητας στο δείγμα μίγματος Β

TEST 1			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_k	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h₀	=	16.50	cm
h₁	=	144.00	cm
T₁	=	24.8	°C
h₂	=	123.00	cm
T₂	=	24.7	°C
T	=	24.8	°C
η_T/η_{20}	=	0.88	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h₁-h₂	7980	7.66E-10	6.78E-10

TEST 2			
α	=	0.0269	cm ²
L	=	11.64	cm
δ_k	=	10.14	cm
A	=	80.75	cm ²
h₀	=	16.50	cm
h₁	=	144.50	cm
T₁	=	24.7	°C
h₂	=	119.00	cm
T₂	=	24.6	°C
T	=	24.7	°C
η_T/η_{20}	=	0.89	
	t	K_T	k
	(sec)	(m/sec)	(m/sec)
h₁-h₂	10020	7.52E-10	6.66E-10

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Πίνακας Ε.1: Δοκιμή διάτμησης στο μίγμα υπό ορθό φορτίο (0,04kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 1(4kg)		
ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	474.46
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353
	Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002
Κυψέλη	Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ
	Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0

ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Μίγμα
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00
Ύψος H ₀ (mm)	24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40
Μάζα m (g)	163.85	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	18.60

ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 1		
Ημερομηνία:	22.7.2011	
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	4	kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	13.97	kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	38.07	kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	4	min
Ρυθμός διάτμησης:	0.162	mm/min
Χρονικό βήμα μέτρησης:	0.17	min

Διελθώ ν χρόνος t (min)	Οριζ. μετακίνησ η L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνησ η ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίο υ (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνησ η ΔL (mm)	Διατμητικ ή δύναμη F (kN)	Επιφάνει α επαφής A (mm ²)	Διατμητικ ή τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
0.00	-	-	-	-	-	3600	0.00	38.07
0.17	0.03	(0.16)	0.01	0.03	0.01	3599	2.26	38.08
0.33	0.13	(0.17)	0.07	0.13	0.05	3596	12.60	38.11
0.50	0.24	(0.18)	0.11	0.24	0.08	3593	20.90	38.14
0.67	0.36	(0.18)	0.15	0.36	0.10	3589	28.27	38.18
0.83	0.47	(0.18)	0.19	0.47	0.13	3586	34.90	38.22
1.00	0.58	(0.18)	0.22	0.58	0.15	3583	40.79	38.25
1.17	0.69	(0.18)	0.25	0.69	0.17	3579	47.06	38.29
1.33	0.80	(0.16)	0.28	0.80	0.19	3576	52.21	38.32
1.50	0.92	(0.15)	0.30	0.92	0.21	3572	57.57	38.36
1.67	1.04	(0.13)	0.33	1.04	0.22	3569	61.98	38.40
1.83	1.14	(0.10)	0.35	1.14	0.23	3566	65.64	38.43
2.00	1.25	(0.07)	0.36	1.25	0.24	3562	68.55	38.47
2.17	1.36	(0.04)	0.37	1.36	0.25	3559	71.08	38.50
2.33	1.47	0.01	0.38	1.47	0.26	3556	72.10	38.54
2.50	1.59	0.06	0.38	1.59	0.26	3552	72.18	38.58
2.67	1.70	0.11	0.37	1.70	0.25	3549	70.15	38.61
2.83	1.82	0.16	0.34	1.82	0.23	3545	65.64	38.65
3.00	1.93	0.21	0.32	1.93	0.22	3542	60.74	38.69
3.17	2.06	0.25	0.29	2.06	0.20	3538	55.25	38.73
3.33	2.17	0.28	0.27	2.17	0.18	3535	51.29	38.77
3.50	2.29	0.30	0.26	2.29	0.17	3531	49.04	38.81
3.67	2.41	0.33	0.25	2.41	0.17	3528	46.98	38.85
3.83	2.53	0.35	0.24	2.53	0.16	3524	45.50	38.89

4.00	2.53	0.35	0.24	2.53	0.16	3524	45.50	38.89
Μέγιστη διατμητική τάση =							72.18	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =							38.58	kPa

Πίνακας Ε.2: Δοκιμή διάτμησης στο μίγμα υπό ορθό φορτίο (0,12kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 2(12kg)								
ΣΥΣΚΕΥΕΣ								
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	WF						
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602						
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71						
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353						
	Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002						
Κυψέλη	Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ						
	Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0						
ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ								
Περιγραφή	Μίγμα							
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα							
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ								
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00					
Ύψος H ₀ (mm)	24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40					
Μάζα m (g)	164.51	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	18.67					
ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 2								
Ημερομηνία:		10/11/2010						
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:		12	kg					
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:		22.98	kg					
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:		62.59	kPa					
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:		12.43	min					
Ρυθμός διάτμησης:		0.192	mm/min					
Χρονικό βήμα μέτρησης:		0.17	min					
Διελθών χρόνος t (min)	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3600	0.00	62.59
0.17	0.03	-0.29	0.01	0.02	0.01	3599	1.69	62.60
0.33	0.10	-0.30	0.03	0.07	0.02	3598	5.08	62.63
0.50	0.14	-0.30	0.03	0.11	0.02	3597	6.02	62.65
0.67	0.15	-0.30	0.03	0.11	0.02	3597	6.02	62.65
0.83	0.15	-0.30	0.03	0.11	0.02	3597	6.02	62.65
1.00	0.15	-0.31	0.03	0.11	0.02	3597	6.02	62.65
1.17	0.15	-0.31	0.03	0.12	0.02	3597	6.02	62.65
1.33	0.15	-0.31	0.03	0.12	0.02	3597	6.02	62.65
1.50	0.16	-0.31	0.03	0.12	0.02	3596	6.40	62.65
1.67	0.23	-0.31	0.04	0.19	0.02	3594	6.59	62.69
1.83	0.33	-0.31	0.04	0.30	0.02	3591	6.59	62.75
2.00	0.43	-0.32	0.05	0.38	0.03	3589	9.05	62.79
2.17	0.52	-0.32	0.08	0.45	0.05	3587	14.15	62.82
2.33	0.62	-0.33	0.10	0.52	0.06	3584	18.12	62.86
2.50	0.70	-0.34	0.13	0.58	0.09	3583	23.79	62.89
2.67	0.79	-0.34	0.17	0.62	0.11	3581	31.36	62.92
2.83	0.89	-0.35	0.20	0.69	0.13	3579	36.86	62.95
3.00	0.99	-0.36	0.23	0.76	0.15	3577	42.93	62.99
3.17	1.11	-0.36	0.27	0.84	0.18	3575	50.72	63.03
3.33	1.22	-0.36	0.31	0.92	0.21	3573	57.75	63.07
3.50	1.33	-0.36	0.34	0.99	0.23	3570	64.05	63.11

3.67	1.46	-0.35	0.37	1.08	0.25	3567	70.16	63.16
3.83	1.58	-0.33	0.40	1.18	0.27	3565	75.53	63.21
4.00	1.69	-0.32	0.42	1.27	0.28	3562	79.58	63.26
4.17	1.81	-0.30	0.44	1.37	0.30	3559	83.45	63.31
4.33	1.92	-0.28	0.46	1.47	0.31	3556	86.56	63.37
4.50	2.03	-0.26	0.47	1.56	0.32	3553	89.10	63.42
4.67	2.16	-0.24	0.48	1.69	0.32	3549	90.91	63.48
4.83	2.28	-0.22	0.48	1.80	0.33	3546	92.33	63.54
5.00	2.40	-0.20	0.49	1.91	0.33	3543	92.99	63.60
5.17	2.52	-0.17	0.49	2.03	0.33	3539	93.09	63.67
5.33	2.64	-0.15	0.49	2.15	0.33	3535	93.00	63.73
5.50	2.75	-0.13	0.48	2.27	0.33	3532	92.51	63.80
5.67	2.88	-0.11	0.48	2.40	0.32	3528	91.85	63.86
5.83	3.00	-0.09	0.48	2.52	0.32	3524	91.75	63.93
6.00	3.12	-0.08	0.48	2.64	0.32	3521	91.46	64.00
6.17	3.24	-0.06	0.47	2.77	0.32	3517	90.79	64.07
6.33	3.37	-0.04	0.47	2.90	0.32	3513	90.12	64.14
6.50	3.48	-0.03	0.47	3.02	0.32	3510	89.83	64.20
6.67	3.61	-0.01	0.46	3.15	0.31	3506	89.16	64.28
6.83	3.74	0.00	0.46	3.28	0.31	3502	88.48	64.35
7.00	3.86	0.02	0.46	3.40	0.31	3498	88.00	64.42
7.17	3.99	0.03	0.45	3.54	0.31	3494	87.71	64.49
7.33	4.12	0.04	0.45	3.67	0.30	3490	87.23	64.56
7.50	4.25	0.06	0.45	3.80	0.30	3486	86.94	64.64
7.67	4.38	0.07	0.44	3.94	0.30	3482	86.07	64.71
7.83	4.51	0.08	0.44	4.07	0.30	3478	85.78	64.79
8.00	4.65	0.09	0.44	4.21	0.30	3474	85.10	64.87
8.17	4.78	0.10	0.44	4.34	0.29	3470	84.81	64.94
8.33	4.90	0.11	0.43	4.47	0.29	3466	84.32	65.01
8.50	5.04	0.12	0.43	4.61	0.29	3462	83.84	65.09
8.67	5.17	0.14	0.43	4.74	0.29	3458	83.73	65.16
8.83	5.30	0.15	0.43	4.87	0.29	3454	83.44	65.24
9.00	5.41	0.16	0.42	4.99	0.29	3450	82.94	65.30
9.17	5.54	0.17	0.42	5.12	0.28	3447	82.64	65.38
9.33	5.67	0.18	0.42	5.25	0.28	3443	82.53	65.45
9.50	5.78	0.20	0.42	5.36	0.28	3439	82.22	65.52
9.67	5.90	0.21	0.42	5.49	0.28	3435	81.72	65.59
9.83	6.03	0.22	0.41	5.62	0.28	3432	81.42	65.66
10.00	6.15	0.23	0.41	5.73	0.28	3428	81.31	65.73
10.17	6.27	0.24	0.41	5.86	0.28	3424	81.20	65.80
10.33	6.39	0.25	0.41	5.98	0.28	3421	80.89	65.87
10.50	6.51	0.26	0.41	6.10	0.28	3417	80.98	65.94
10.67	6.63	0.27	0.41	6.22	0.28	3413	80.86	66.01
10.68	6.75	0.28	0.41	6.34	0.28	3410	80.75	66.08
11.00	6.88	0.29	0.41	6.47	0.28	3406	80.84	66.16
11.17	6.99	0.30	0.41	6.58	0.27	3403	80.72	66.22
11.33	7.12	0.31	0.41	6.71	0.27	3399	80.61	66.30
11.50	7.24	0.32	0.41	6.83	0.27	3395	80.70	66.37
11.67	7.36	0.33	0.41	6.95	0.27	3391	80.79	66.44
11.83	7.49	0.34	0.41	7.08	0.27	3388	80.88	66.52
12.00	7.61	0.35	0.41	7.21	0.27	3384	80.97	66.59
12.17	7.73	0.36	0.41	7.33	0.27	3380	81.06	66.66
12.33	7.87	0.37	0.40	7.46	0.27	3376	80.95	66.74
12.43	7.96	0.37	0.40	7.55	0.27	3373	81.02	66.79

Μέγιστη διατμητική τάση =	93.09	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	63.67	kPa

Πίνακας Ε.3: Δοκιμή διάτμησης στο μίγμα υπό ορθό φορτίο (0,24kN)

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟ 3(24kg)

ΣΥΣΚΕΥΕΣ			
Συσκευή διάτμησης		Εταιρία	WF
		Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4602
		Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	374.71
Δυναμομετρικός δακτύλιος		Συντελεστής μετατροπής (N/div)	1.353
		Αντιστοίχιση ενδείξεων (mm/div)	0.002
Κυψέλη		Σχήμα διατομής (ΚΥΚΛ ή ΤΕΤΡ)	ΤΕΤΡ
		Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0

ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ		
Περιγραφή		Μίγμα
Προετοιμασία δείγματος		Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00
Ύψος H ₀ (mm)	24.0	Όγκος V ₀ (cm ³)	86.40
Μάζα m (g)	164.84	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	18.71

ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟ 3	
Ημερομηνία:	22.7.2011
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	24 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	40.98 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	111.62 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	8.60 min
Ρυθμός διάτμησης:	0.084 mm/min
Χρονικό βήμα μέτρησης:	0.33 min

Διελθών χρόνος	Οριζ. μετακίνηση	Σχετ. κατ. μετακίνηση	Ένδ. δυν. δακτυλίου	Σχετ. οριζ. μετακίνηση	Διατμητική δύναμη	Επιφάνεια επαφής	Διατμητική τάση	Ορθή τάση
t(min)	L (mm)	ΔH (mm)	(mm)	ΔL (mm)	F (kN)	A (mm ²)	τ (kPa)	σ (kPa)
-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3600	0.00	111.62
0.17	0.01	-0.40	-0.01	0.03	-0.01	3599	-2.26	111.65
0.33	0.10	-0.42	0.02	0.07	0.02	3598	4.32	111.69
0.50	0.17	-0.42	0.03	0.13	0.02	3596	6.21	111.75
0.67	0.19	-0.43	0.04	0.16	0.03	3595	6.96	111.77
0.83	0.20	-0.43	0.04	0.16	0.03	3595	6.96	111.77
1.00	0.20	-0.43	0.04	0.16	0.03	3595	6.96	111.77
1.17	0.20	-0.43	0.04	0.16	0.03	3595	6.96	111.77
1.33	0.20	-0.43	0.04	0.16	0.03	3595	6.96	111.77
1.50	0.20	-0.44	0.04	0.16	0.03	3595	7.34	111.77
1.67	0.20	-0.44	0.04	0.16	0.03	3595	7.53	111.78
1.83	0.30	-0.44	0.04	0.26	0.03	3592	7.53	111.86
2.00	0.40	-0.44	0.05	0.35	0.03	3589	9.42	111.95
2.17	0.48	-0.45	0.08	0.40	0.06	3588	15.84	111.99
2.33	0.58	-0.45	0.11	0.47	0.07	3586	19.81	112.06
2.50	0.65	-0.45	0.14	0.51	0.10	3585	26.61	112.10
2.67	0.73	-0.46	0.18	0.55	0.12	3583	34.17	112.14
2.83	0.83	-0.47	0.22	0.61	0.15	3582	41.93	112.19
3.00	0.94	-0.47	0.26	0.67	0.18	3580	49.89	112.25
3.17	1.05	-0.48	0.31	0.74	0.21	3578	58.24	112.32
3.33	1.16	-0.48	0.35	0.81	0.24	3576	66.41	112.38
3.50	1.28	-0.49	0.40	0.88	0.27	3574	75.35	112.45
3.67	1.40	-0.49	0.44	0.96	0.30	3571	83.92	112.52
3.83	1.52	-0.49	0.48	1.03	0.33	3569	91.74	112.59
4.00	1.64	-0.49	0.52	1.11	0.35	3567	99.39	112.67
4.17	1.75	-0.49	0.56	1.19	0.38	3564	105.72	112.74
4.33	1.86	-0.48	0.59	1.27	0.40	3562	111.49	112.82
4.50	1.97	-0.47	0.61	1.36	0.41	3559	116.32	112.90
4.67	2.09	-0.46	0.64	1.46	0.43	3556	120.98	112.99

4.83	2.21	-0.45	0.66	1.56	0.44	3553	124.89	113.09
5.00	2.32	-0.44	0.67	1.65	0.45	3550	127.66	113.18
5.17	2.44	-0.42	0.68	1.76	0.46	3547	129.12	113.29
5.33	2.56	-0.41	0.68	1.88	0.46	3544	130.58	113.40
5.50	2.68	-0.39	0.68	2.00	0.46	3540	130.71	113.51
5.67	2.79	-0.38	0.68	2.12	0.46	3536	129.50	113.63
5.83	2.92	-0.36	0.67	2.25	0.45	3533	128.12	113.75
6.00	3.04	-0.35	0.66	2.38	0.45	3529	126.15	113.88
6.17	3.15	-0.34	0.65	2.50	0.44	3525	124.55	114.00
6.33	3.27	-0.34	0.64	2.63	0.43	3521	123.15	114.13
6.50	3.39	-0.33	0.64	2.76	0.43	3517	122.13	114.25
6.67	3.51	-0.32	0.63	2.88	0.43	3514	121.11	114.37
6.83	3.64	-0.32	0.62	3.01	0.42	3510	120.09	114.50
7.00	3.76	-0.31	0.62	3.14	0.42	3506	119.83	114.62
7.17	3.89	-0.31	0.62	3.27	0.42	3502	119.77	114.75
7.33	4.01	-0.31	0.62	3.39	0.42	3498	119.70	114.87
7.50	4.14	-0.31	0.62	3.52	0.42	3494	119.84	115.00
7.67	4.27	-0.30	0.62	3.65	0.42	3491	119.97	115.12
7.83	4.39	-0.30	0.62	3.78	0.42	3487	119.90	115.25
8.00	4.52	-0.30	0.62	3.91	0.42	3483	119.46	115.38
8.17	4.65	-0.29	0.62	4.03	0.42	3479	119.59	115.50
8.33	4.78	-0.29	0.61	4.17	0.41	3475	119.15	115.64
8.50	4.90	-0.29	0.61	4.29	0.41	3471	119.27	115.76
8.60	5.00	-0.29	0.61	4.39	0.41	3468	118.40	115.86

Μέγιστη διατμητική τάση =	130.71	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	113.51	kPa