

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Σχεδιασμός Απόθεσης Στείρων Υλικών
Λιγνιτωρυχείου Ανοικτής Εκσκαφής"

ΦΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ (Επιβλέπων)

ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΡΟΥΜΠΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, Δρ.

ΧΑΝΙΑ, 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον προσδιορισμό γεωτεχνικών παραμέτρων στείρων υλικών από το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας και την εκτίμηση της κλίσης των πρανών και του μεγέθους της αναμενόμενης καθίζησης σε μια τυπική απόθεση ύψους 110m.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κοκκομετρικής ανάλυσης, προσδιορισμού των ορίων Atterberg, εκτίμησης της διατμητικής αντοχής και παραμέτρων συμπίεστότητας.

Ο σχεδιασμός των πρανών της απόθεσης έγινε με χρήση του λογισμικού GeoStudio 2004 θεωρώντας απαιτούμενο συντελεστή ασφάλειας των πρανών ίσο με $FS = 1.5$, ενώ η εκτίμηση των αναμενόμενων καθιζήσεων πραγματοποιήθηκε με βάση την ελαστική θεωρία και τη θεωρία καθίζησης λόγω στερεοποίησης των κορεσμένων υλικών της απόθεσης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας είχα την βοήθεια ορισμένων ανθρώπων τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, λέκτορα κ. Εμμανουήλ Στειακάκη που μου ανέθεσε την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, η συμβολή του οποίου και η καθοδήγηση συνέβαλε τα μέγιστα στην ολοκλήρωσή της.

Τον Δρ. Χρήστο Ρούμπο για τις πληροφορίες που μου παρείχε αναφορικά με τον σχεδιασμό των αποθέσεων αλλά και για τη συμμετοχή του στην αξιολόγηση και διόρθωση της εργασίας αυτής.

Τον καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη που δέχτηκε να συμμετάσχει στην εξεταστική επιτροπή καθώς και να αξιολογήσει και να διορθώσει την εργασία αυτή.

Το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης και ιδιαίτερα τον κ. Διονύσιο Βαβαδάκη για τη βοήθειά του στην περαίωση της διπλωματικής εργασίας.

Την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Αφιερωμένη

Στην οικογένειά μου
και στους φίλους μου

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Σκοπός εργασίας.....	7
1.2 Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.)	8
1.3 Γενικά περί αποθέσεων.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΛΑΦΙΚΟΥ	
ΥΛΙΚΟΥ.....	19
2.1 Γεωτεχνικές παράμετροι των στείρων υλικών απόθεσης.....	19
2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων-κοκκομετρική καμπύλη.....	20
2.3 Όρια Atterberg.....	21
2.3.1 Όριο υδαρότητας.....	21
2.3.2 Όριο πλαστικότητας.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΕΙΡΩΝ	
ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ.....	23
3.1 Γενικά.....	23
3.2 Ρυθμός οριζόντιας μετατόπισης.....	25
3.3 Αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ.....	29
4.1 Γενικά.....	29
4.2 Δοκιμή στερεοποίησης.....	30
4.2.1 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας (E).....	32
4.2.2 Δείκτης συμπίεσης (C_c) και δείκτης διόγκωσης (C_s).....	33
4.2.3 Συντελεστής μείωσης του όγκου (m_v).....	34
4.2.4 Συντελεστής συμπίεστότητας (C_v).....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΗΣ	
ΑΠΟΘΕΣΗΣ.....	37
5.1 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας των πρανών.....	37
5.1.1 Σουηδική μέθοδος (συμβατική μέθοδος Fellenius).....	39
5.1.2 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop.....	41
5.1.3 Απλοποιημένη μέθοδος Janbu.....	43
5.1.4 Μέθοδος Spencer.....	44
5.1.5 Μέθοδος Morgenstern και Price.....	45

5.1.6 Παρατηρήσεις από την εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας με τη μέθοδο των λωρίδων.....	46
5.2 Σχεδιασμός του πρανούς της απόθεσης.....	47
5.2.1 Διαστάσεις καννάβου.....	47
5.2.2 Καθορισμός παραμέτρων.....	48
5.2.3 Σχεδιασμός απόθεσης.....	50
5.2.4 Υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας.....	50
5.3 Παραμετρική ανάλυση.....	52
5.4 Παρατηρήσεις.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ.....	54
6.1 Γενικά	54
6.1.1 Άμεση καθίζηση.....	56
6.1.2 Καθίζηση λόγω στερεοποίησης.....	56
6.2 Εκτίμηση των αναμενόμενων καθιζήσεων στην απόθεση.....	57
6.2.1 Καθίζηση με βάση ελαστική θεωρία.....	57
6.2.2 Καθίζηση λόγω στερεοποίησης.....	63
6.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο το σχεδιασμό απόθεσης στείρων υλικών του ΛΚΔΜ (Σχήμα 1.1) ύψους 110m και τη διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς της απόθεσης με την μεταβολή του βαθμού κορεσμού. Η παρακίνηση για να εκπονηθεί αυτή η διπλωματική εργασία είναι η δημιουργία ασφαλών αποθέσεων με το μέγιστο οικονομοτεχνικό όφελος.



Σχήμα 1.1
Χάρτης ΛΚΔΜ
(www.dei.gr).

1.2 Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.)

Το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας αναπτύχθηκε από τη ΔΕΗ στη Δυτική Μακεδονία, 110km δυτικά της Θεσσαλονίκης και καλύπτει μια έκταση 120km². Την τριετία 1996-1999 η παραγωγή του λιγνίτη στο Λ.Κ.Δ.Μ. συνέβαλε περισσότερο από 65% στην ολική παραγόμενη ενέργεια της Ελλάδος. Τα χαρακτηριστικά του εκσκαπτόμενου λιγνίτη υποδηλώνουν ότι τα κοιτάσματα αυτά είναι ποιοτικός από τα χειρότερα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και για 1kWh παραγόμενης ενέργειας καταναλώνονται περίπου 2kg λιγνίτη. Η εξόρυξη του λιγνίτη γίνεται με τη συνεχή μέθοδο εκμετάλλευσης, η οποία χρησιμοποιεί καδοφόρους εκσκαφείς, ταινιοδρόμους και αποθέτες (Στειακάκης, 2008).

Στο Λ.Κ.Δ.Μ. λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: το ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το ορυχείο Καρδιάς, το ορυχείο Κυρίου Πεδίου και το ορυχείο Αμυνταίου (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου Κλειδιού στη Φλώρινα). Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1,8 δις τόνους. Η παραγωγή λιγνίτη ανήλθε το 2006 σε 49εκ. τόνους.

Στο Λ.Κ.Δ.Μ. χρησιμοποιούνται 42 καδοφόροι εκσκαφείς, 16 αποθέτες, 225 km περίπου ταινιόδρομοι (με πλάτος 1,0m - 2,4m) και 1.000 περίπου ντηζελοκίνητα μηχανήματα (www.dei.gr).

Όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής, όπως αναφέρει ο Στειακάκης (2008), κατά τη διάρκεια του Νεογενούς επικράτησαν ιδανικές συνθήκες για το σχηματισμό λιγνίτη στις ελώδεις περιοχές και τις αβαθείς λίμνες που είχαν σχηματισθεί. Συνεχής αργή κινητικότητα προκάλεσε τη βύθιση του πυθμένα των ελών και τεράστιες ποσότητες συγκεντρωμένων φυτικών λειψάνων σχημάτισαν τα λιγνιτικά στρώματα της Πτολεμαΐδας.

Τα Νεογενή ιζήματα αποτελούνται από τρεις σειρές: την ανώτερη (υπερκείμενη της λιγνιτοφόρας), τη λιγνιτοφόρα και την κατώτερη (υποκείμενη της λιγνιτοφόρας) σειρά.

Η ανώτερη σειρά περιλαμβάνει κιτρινόφαια κλαστικά ιζήματα και πρασινότεφρες αργίλο-μαργαϊκές αποθέσεις.

Η λιγνιτοφόρος σειρά περιλαμβάνει:

- την ανώτερη λιγνιτοφόρα στοιβάδα με 9-10 στρώματα λιγνίτη πάχους μερικών εκατοστών και 1-3 λεπτότερα στρώματα ξυλίτη, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται στείρες ενστρώσεις αργίλου, μαργών και λιμναίας κρητίδος.
- την ενδιάμεση στοιβάδα των στείων ιζημάτων όπου επικρατούν οι ασθενώς αμμούχες μάργες και
- την κατώτερη λιγνιτοφόρο στοιβάδα που αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα λιγνίτη (πάχους μέχρι 4m), μαργών, αργίλων με μεταβαλλόμενο πάχος και δύο χαρακτηριστικούς ορίζοντες: της χαρακτηριστικής άμμου και της λιμναίας κρητίδος.

Τέλος η κατώτερη (υποκείμενη) σειρά αποτελείται από τους:

- ανώτερους ορίζοντες (με συνολικό πάχος 40m) που αποτελούνται από τεφρές αργιλούχες μάργες, κατά τόπους αμμούχες με φακοειδείς ενστρώσεις μαργαϊκού ασβεστολίθου και στην κορυφή μια ένστρωση λιμναίας κρητίδος, και
- τους κατώτερους ορίζοντες που αποτελούνται από αμμούχες αργίλους με αραιές ενστρώσεις αργιλούχων μαργών (Στειακάκης, 2008 από Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972).

1.3 Γενικά περί αποθέσεων

Αν και οι αποθέσεις της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας έχουν ιστορία χιλιάδων ετών, η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με την ευστάθεια τους ανάγεται στην τελευταία πεντηκονταετία. Ορόσημο στη σχετική διαδικασία θεωρείται η κατολίσθηση, συνοδευόμενη από ρευστοποίηση, μιας απόθεσης απορριμμάτων ανθρακωρυχείου στο Aberfan της Ουαλίας (Bishop 1973). Αν και το μέγεθος της κατολίσθησης δεν ήταν ιδιαίτερος μεγάλο (100.000m^3), προκάλεσε τον θάνατο 144 ανθρώπων στον παρακείμενο οικισμό. Σήμερα η ευστάθεια των αποθέσεων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για έναν επιπλέον λόγο: οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας αστοχίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα οδυνηρές. Μια τέτοια ιδιαίτερα γνωστή περίπτωση είναι η αστοχία (1998) του τέλματος Los Frailes

των μεταλλείων Aznalcollar / Ισπανία, ιδιοκτησίας της Boliden Apirsa (Wise, 2005) όπου η εταιρία τελικά ανέστειλε τις εργασίες κλείνοντας τελικά ένα πλούσιο μεταλλείο.

Η διόγκωση των προβλημάτων από την ευστάθεια των αποθέσεων τις τελευταίες δεκαετίες συνδυάζεται με τις αλλαγές στη μεταλλευτική και μεταλλουργική βιομηχανία. Η τάση για μεγαλύτερες μονάδες προκαλεί αύξηση του μεγέθους των αποθέσεων, ιδιαίτερα καθ' ύψος. Η αύξηση του μεγέθους του εξοπλισμού των μεταλλείων μείωσε την δυνατότητα εκλεκτικής απόληψης και αύξησε τα απορριπτόμενα στείρα στις αποθέσεις. Όμοια είναι και η επίδραση της εκμετάλλευσης κοιτασμάτων με ολοένα χαμηλότερη ποιότητα και χειρότερη σχέση εκμετάλλευσης (Λεονάρδος, 2006).

Οι αλλαγές που επήλθαν τις τελευταίες δεκαετίες στη μεταλλευτική και μεταλλουργική βιομηχανία προκάλεσαν διόγκωση των προβλημάτων ευστάθειας των διαφόρων τύπων αποθέσεων (αποθέσεων στείρων, σωρών εκχύλισης, τελμάτων). Σήμερα η ευστάθεια των αποθέσεων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας αστοχίας. Οι αποθέσεις με τα αδρομερή υλικά από τα σκληρά υπερκείμενα των μεταλλείων δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα λόγω των πολύ καλών χαρακτηριστικών των υλικών. Στους σωρούς εκχείλησης, όπου αποτίθενται σκληρά υλικά, η αστοχία μπορεί να οφείλεται είτε στην αργλική βάση στεγανοποίησης του σωρού είτε στη δημιουργία υψηλού φρεάτιου ορίζοντα εντός του σωρού εξαιτίας της κακής στράγγισης στη βάση του. Προβλήματα δημιουργούνται κατά την απόθεση λεπτόκκοκων στείρων και απορριμμάτων ιδιαίτερα όταν αποτίθενται υδαρή απορρίμματα σε κατάλληλους ταμιευτήρες (τέλματα). Τα προβλήματα προέρχονται κυρίως από τη δυσκολία διαχωρισμού των διαφόρων φαινομένων που προκαλούν πιέσεις πόρων με αποτέλεσμα τον ανακριβή προσδιορισμό της διατιθέμενης διατμητικής αντοχής.

Η πρώτη πηγή πίεσης πόρων προέρχεται από την ροή του ύδατος. Η δεύτερη πηγή είναι η αρχική υπερπίεση λόγω της ταχείας και ομοιόμορφης φόρτισης. Τέλος, πιέσεις πόρων λόγω διάτμησης δημιουργούνται από αλλαγές στη διατμητική τάση, κατάσταση η οποία συμβαίνει ταχύτερα σε σχέση με την αποστράγγιση και τα χαρακτηριστικά αποτόνωσης των πιέσεων των πόρων του υλικού. Κατά συνέπεια η κρίσιμη κατάσταση αφορά στη βραχυχρόνια ευστάθεια (ανάλυση με ολικές τάσεις). Με την προσέγγιση αυτή αποφεύγονται απλές αστοχίες αλλά και ρευστοποιήσεις

κατά τη λειτουργία της απόθεσης. Ακόμα και στη μακροχρόνια ευστάθεια (ανάλυση με ενεργές τάσεις, εκτονωμένες υπερπιέσεις ύδατος) θα πρέπει να εξετάζεται η χρήση ολικών τάσεων σε περιοχές με υλικά λεπτομερέστερα των άμμων. Κατά την απόθεση μη υδαρών υλικών πρέπει να αποφεύγεται η ρευστοποίησή τους μειώνοντας το ύψος της απόθεσης στο “κρίσιμο”. Επίσης, η εξέταση της ευστάθειας μιας απόθεσης πρέπει να συμπεριλάβει και τη θεμελίωσή της (Λεονάρδος, 2006).

Οι αποθέσεις των μεταλλείων αφορούν κυρίως στείρα υπερκείμενα υλικά, τα οποία είναι βραχώδη και η εξόρυξη τους έχει γίνει με εκρηκτικά. Λόγω της σύστασης και του τρόπου εξόρυξης, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ θετικά χαρακτηριστικά (γωνίες τριβής $36 - 42^\circ$) και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατολισθήσεων ακόμα και σε μεγάλα ύψη απόθεσης. Στην περίπτωση αυτή ο κύριος κίνδυνος για κατολίσθηση προέρχεται από αστοχία της βάσης (θεμελίωσης) της απόθεσης.

Η απόθεση ενός λιγνιτωρυχείου διαμορφώνεται με μια σειρά διαδοχικών “φάσεων” (Σχήμα 1.2, Σχήμα 1.3). Επί της 1^{ης} φάσης αποτίθεται η 2^η φάση, επί της οποίας θα δημιουργηθεί η 3^η κοκ. Η κάθε φάση αποτελείται από τα εξής μέρη (Λεονάρδος, 2006):

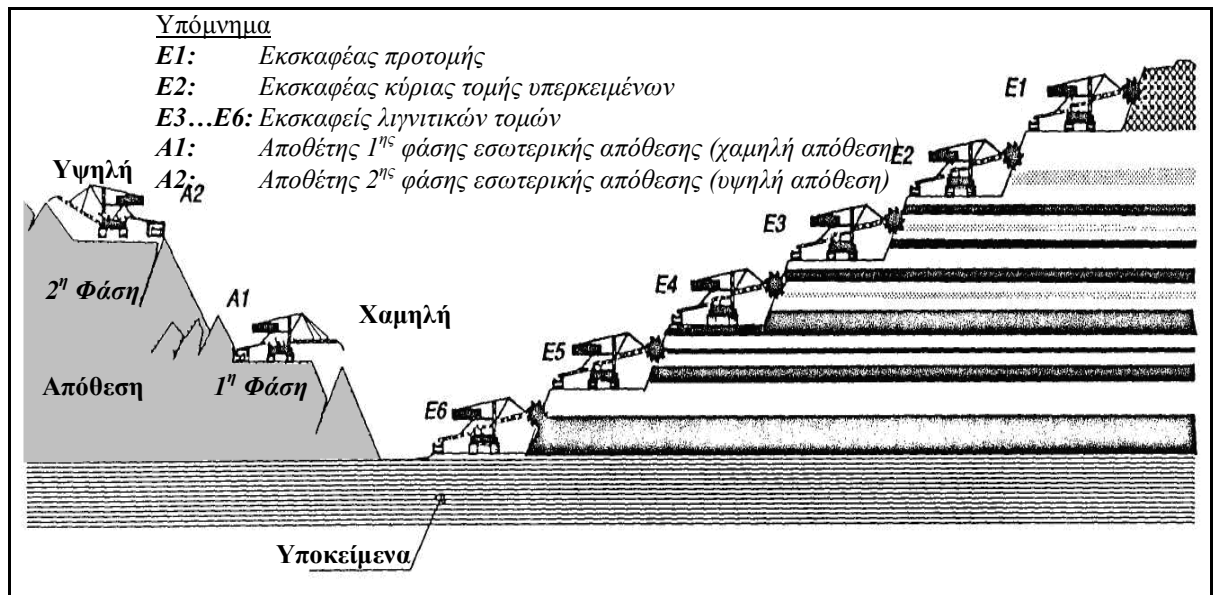
- ✓ Την χαμηλή απόθεση κατά την οποία ο αποθέτης απορρίπτει τα υλικά κάτω από το επίπεδο έδρασής του. Το ύψος της χαμηλής κυμαίνεται από τα 20 έως τα 30m.
- ✓ Την υψηλή απόθεση, κατά την οποία ο αποθέτης απορρίπτει τα υλικά πάνω από το επίπεδο έδρασης του. Το ύψος της υψηλής κυμαίνεται από τα 10 έως τα 20m.



Σχήμα 1.2

Δημιουργία πρανούς κατά την εκμετάλλευση
ανοικτής εκσκαφής και διάταξη εξοπλισμού
(W. Durst, W. Vogt, 1988).

Κατά την απόθεση, ο αποθέτης κινείται παράλληλα προς τον ταινιόδρομο που τον τροφοδοτεί, το δε υλικό αποτίθεται με μια γωνία περί τις $25-30^\circ$. Η διαδικασία αυτή αποκλείει το σχηματισμό οριζοντίων και σχετικά ομοιογενών στρώσεων, όπως συμβαίνει στη φύση. Η κατάσταση φαίνεται χαοτική σε μια λεπτομερή γεωτεχνική δειγματοληψία αλλά ανεκτά ομοιόμορφη εάν εξεταστεί ως σύνολο η κάθε φάση. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε φάση δημιουργείται από συγκεκριμένο αποθέτη, ο οποίος τροφοδοτείται με άγωνα υλικά από συγκεκριμένους, σε γενικές γραμμές γεωλογικούς ορίζοντες. Ουσιαστική αλλαγή στα αποτιθέμενα υλικά προϋποθέτει σημαντικές αλλαγές στον άκαμπτο σχεδιασμό ανάπτυξης του ορυχείου. Το χρονικό διάστημα μεταξύ τέτοιων αλλαγών μετράται σε έτη (Λεονάρδος, 2006).



Σχήμα 1.3

Ενδεικτική διάταξη εξοπλισμού για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης με τη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων (Ρούμπος, 2008).

Η απόθεση των αγόνων διενεργείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό, έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Αρχικά, κατά την απόθεση αγόνων εκτός του ορυχείου (περίοδος που μπορεί να ξεπεράσει τη δεκαετία), επιλέγονται κενοί χώροι (κοιλότητες) άλλων εξοφλημένων ορυχείων ή άλλες κατάλληλες περιοχές, ενώ στη συνέχεια, όταν δημιουργείται κενός χώρος εντός του ορυχείου, η απόθεση διενεργείται εσωτερικά, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης να είναι η ελάχιστη δυνατή (Σχήμα 1.4). Η εσωτερική απόθεση αγόνων ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης (Ρούμπος, 2008).

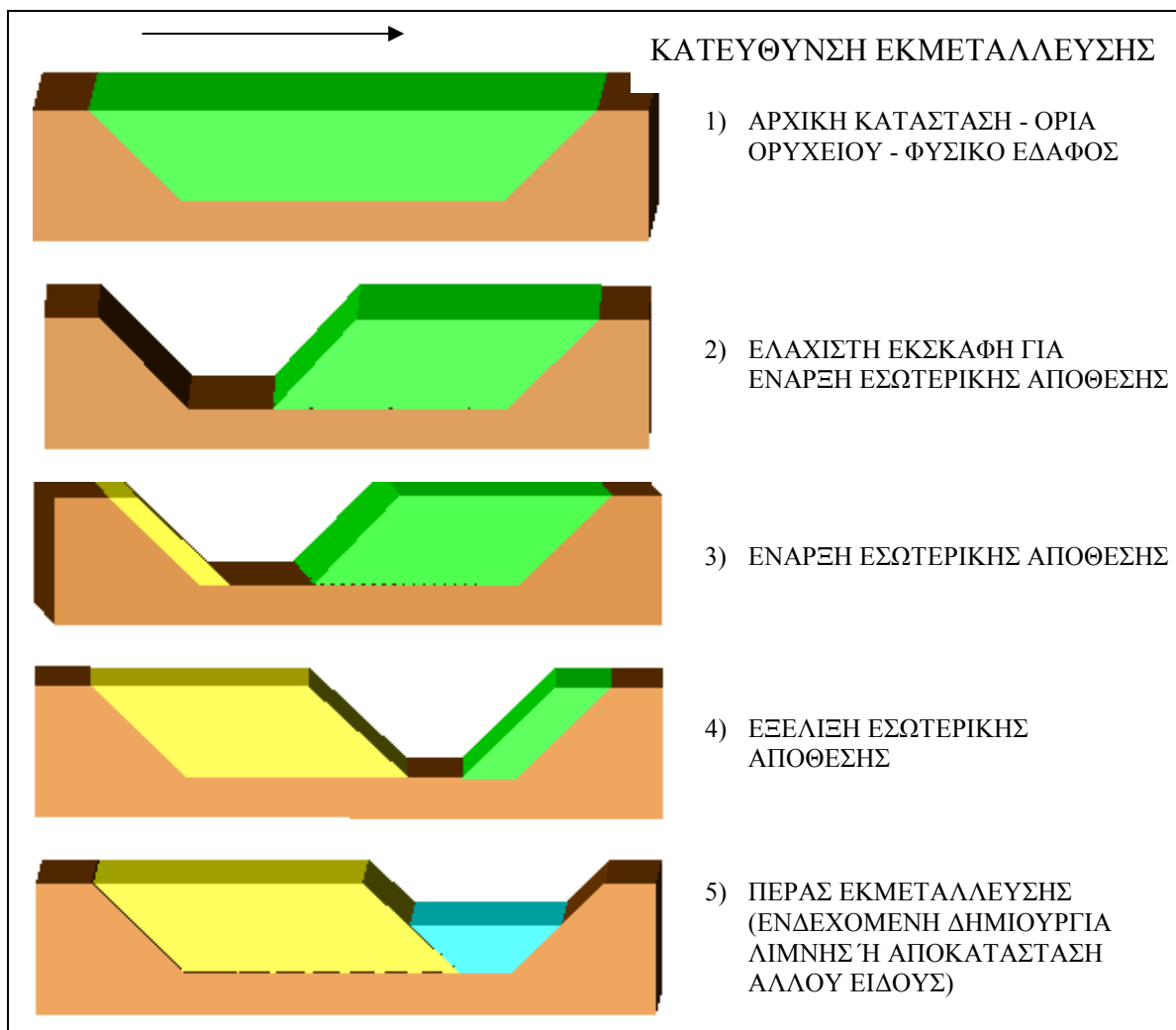
Η ανάπτυξη των εξωτερικών αποθέσεων μπορεί να λάβει μεγάλη έκταση με διαστάσεις μερικών χιλιομέτρων και ύψος που ξεπερνάει τα 100m.

Σύμφωνα με τον Καρά (1988) είναι ιδιαίτερα σημαντική η βέλτιστη δυνατή σχεδίαση των πρανών. Πιο συγκεκριμένα, : για να γίνει αντιληπτή η ανάγκη της βέλτιστης σχεδίασης πρανών, παρουσιάζεται παρακάτω μια απλή ανάλυση όπου αφ' ενός παρουσιάζονται οι συνέπειες μιάς κατολίσθησης αφ' ετέρου δε οι οικονομικές

συνέπειες μιας συντηρητικής σχεδίασης. Όπως αναφέρει ο Καράς (1988), μια κατολίσθηση είναι δυνατόν να προκαλέσει εκτός από τα ατυχήματα και τις άμεσες υλικές ζημιές, τη διακοπή της λειτουργίας του ορυχείου περισσότερο από ένα μήνα με συνέπεια να υπάρχει πολύ υψηλή απώλεια εσόδων. Πιθανή είναι όπως έχει διαπιστωθεί στην πράξη, μια συντηρητική σχεδίαση η οποία γίνεται είτε μετά από πρόχειρη μελέτη, είτε μερικές φορές χωρίς μελέτη αλλά από λανθασμένη προέκταση υπάρχουσας εμπειρίας σε άλλες θέσεις με διαφορετικά γεωμετρικά και εδαφοτεχνικά στοιχεία. Στην πράξη έχει διαπιστωθεί ότι οι συντηρητικές σχεδιάσεις πρανών συνήθως δημιουργούν γωνία κλίσης πρανούς τουλάχιστον 2 ή 3 μοίρες μικρότερη από τη βέλτιστη δημιουργώντας επίσης σημαντικές οικονομικές επιβαρύνσεις.

Συμπερασματικά, η μεγάλη ανάπτυξη των εκμεταλεύσεων δημιουργεί στα υπαίθρια ορυχεία, πρανή πολλών χιλιομέτρων με μεγάλα ύψη και ποικιλία γεωλογικών συνθηκών.

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη σχεδίαση των πρανών, χρειάζεται η δημιουργία γεωτεχνικών ομάδων στα ορυχεία, όπου τα στελέχη εκτός από την ειδίκευση στην εδαφομηχανική πρέπει να έχουν εμπειρία στις μελέτες εκμετάλλευσης υπαιθρίων λιγνιτορυχείων (Καράς, 1988).



Σχήμα 1.4
 Στάδια εξέλιξης της εκμετάλλευσης ορυχείου
 (Ρούμπος, 2008).

Ευστάθεια των πρανών των αποθέσεων

Η απόθεση των αγόνων υλικών παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε βραχυχρόνια και σε μακροχρόνια βάση.

Βραχυχρόνια ευστάθεια

Η βραχυχρόνια ευστάθεια αφορά κυρίως τα πρηνή που δημιουργούνται κατά την άμεση απόθεση του υλικού είτε σε χαμηλή απόθεση είτε σε υψηλή απόθεση. Το ολικό ύψος της απόθεσης είναι από 12-30m. Το υλικό στην περίπτωση αυτή είναι χαλαρό και έχει μεγάλη περιεκτικότητα ύδατος, είτε διότι προέρχεται από υδροφόρα στρώματα π.χ αμμώδη υλικά, είτε από στρώματα με μεγάλη περιεκτικότητα ύδατος, το οποίο απελευθερώνεται μετά την καταστροφή της δομής τους από την εκσκαφή και μεταφορά, είτε τέλος από νερό το οποίο απετέθη από την υγρασία του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος.

Στη φάση αυτή το υλικό έχει μηδενική τιμή συνοχής, φαινόμενη γωνία τριβής κυμαινόμενη από 0-14° και συμπεριφέρεται ως ρευστό με μεγάλο ιξώδες. Λόγω της μικρής γωνίας τριβής και του ύδατος που υπάρχει, το υλικό ισορροπεί σε χαμηλές κλίσεις που μπορεί να κατέλθουν μέχρι και 4°, ειδικά όταν αποτίθεται είτε σε κεκλιμένο έδαφος με κλίση προς την κατεύθυνση απόθεσης, είτε επάνω σε υλικό απόθεσης το οποίο πρόσφατα έχει αποτεθεί και δεν έχει δυνατότητα να απορροφήσει άμεσα το εκρέον ύδωρ (Καράς και Λεονάρδος, 1993).

Η βελτίωση της ευστάθειας στην φάση αυτή είναι δυνατή υπό τις εξής προϋποθέσεις:

- α) Ανάμειξη ρευστού υλικού απόθεσης με στεγνό υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε αδρομερή, ώστε αφ'ενός να μειώσει σημαντικά την υγρασία του ρευστού υλικού της απόθεσης, αφ'ετέρου να αυξήσει τη γωνία τριβής
- β) Ανάμειξη με τέφρα από τους ΑΗΣ ώστε αφ'ενός να απορροφηθεί η υγρασία και αφ'ετέρου λόγω των χημικών αντιδράσεων που ακολουθούν να δημιουργηθεί συνοχή στο υλικό και αύξηση της γωνίας τριβής.

Τέτοια υλικά συνήθως δεν διατίθενται σε μεγάλες ποσότητες, αλλά και όταν εξευρεθούν δεν είναι δυνατόν να εισαχθούν στο κύκλωμα ταινιοδρόμων απόθεσης.

Στην πράξη αφού εξαντληθούν οι μικρές δυνατότητες για ανάμειξη του υλικού της απόθεσης με υγιές υλικό πρέπει κατά το δυνατόν να ακολουθούνται οι παρακάτω δυο πρακτικές (Καράς και Λεονάρδος, 1993):

α. Απόθεση σωρών ύψους 6-7 μέτρων και βαθμιαία μετακίνηση του αποθέτη μέχρι το άλλο άκρο ώστε το σειράδι της απόθεσης να μην ξεπερνά το παραπάνω ύψος. Συνολική μετακίνηση του αποθέτη και επαναπόθεση στο αρχικό σημείο, πάλι σε σωρούς επί πλέον 6-7m, βαθμιαία μετακίνηση και απόθεση μέχρι το άκρο του ταινιοδρόμου κ.ο.κ. Κατά τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας σωρός απόθεσης πχ χαμηλή απόθεση 30m σε 4 ή 5 διαδοχικές αποθέσεις σωρών που απέχουν χρονικά η μία από την άλλη μέρες ή εβδομάδες. Έτσι δίνεται η δυνατότητα σε κάθε μερικό σωρό απόθεσης να στερεοποιηθεί και λόγω του μικρού σχετικά όγκου του αλλά και του χρόνου που μεσολαβεί μέχρι την επόμενη απόθεση σωρού. Με αυτή τη διαδικασία η στερεοποίηση (στράγγιση) κάθε σωρού γίνεται πολύ γρηγορότερα με συνέπεια ο “μεγάλος σωρός” (30m) από μικρό ύψος να αποκτά αρκετά μεγάλη γωνία τριβής και αποφεύγονται οι μεγάλες ολισθήσεις. Στην πράξη, τα ύψη της χαμηλής απόθεσης δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 25m για να αποφεύγονται τα έντονα προβλήματα αστάθειας.

Όσον αφορά την βραχυχρόνια ευστάθεια, δεν υπάρχει επιστημονικός τρόπος υπολογισμού της, λόγω της μεγάλης κύμανσης και συνεχούς μεταβολής των μεγεθών περιεκτικότητας ύδατος και συμπίκνωση κατά τη στιγμή της.

β. Κατασκευή φραγμάτων. Είναι μια πρακτική που εφαρμόζεται συχνά. Τα φράγματα ανακόπτουν την ροή του υλικού της χαμηλής απόθεσης. Το ρευστό υλικό ανυψούμενο φτάνει τελικά το ύψος του φράγματος. Έτσι από μία θέση του αποθέτη αποτίθενται μεγάλες ποσότητες υλικού. Ως πλέον κατάλληλα υλικά για την κατασκευή των φραγμάτων είναι τα αδρομερή, τα οποία πρέπει να αποτίθενται με φορτηγά σε στρώσεις των 2-3m ώστε να υφίστανται συμπίκνωση με τη διέλευση του χωματουργικού εξοπλισμού (Καράς και Λεονάρδος, 1993).

Τα φράγματα ανασχέσεως του ρευστού υλικού κατά την στιγμή της απόθεσης πρέπει να κατασκευάζονται με:

Ύψος: Περίπου 15-20m

Κλίση πρανών προς την πλευρά της απόθεσης 1:2

Κλίση πρανών προς αντίθετη πλευρά της απόθεσης 1:1.5

Μακροχρόνια ευστάθεια

Αφορά την ευστάθεια του συνολικού ύψους της απόθεσης που κυμαίνεται από 30-120m κατά θέσεις και μια αστοχία είναι δυνατόν να έχει τεράστιες συνέπειες σε ατυχήματα ή σε ζημιές στα μηχανήματα.

Η αστοχία μπορεί να προέλθει όταν οι κλίσεις των πρανών είναι μεγάλες είτε κατά την ανύψωση της απόθεσης κατά μια βαθμίδα είτε από τη δημιουργία παροδικού υδροφόρου ορίζοντα. Ο παροδικός υδροφόρος ορίζοντας δημιουργείται όταν ο χώρος απόθεσης έχει λάβει σημαντική έκταση. Κατά την επέκταση της απόθεσης η επιφάνεια εισροής αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της μέσης διάστασης, ενώ η επιφάνεια εκροής ανάλογα με την μέση διάσταση. Την επιφάνεια εκροής αποτελούν τα χαμηλότερα περιφερειακά πρανή. Υπάρχει χρονική στιγμή όπου λόγω της μεγάλης αύξησης της δυνατότητας εισροής ως προς την εκροή δημιουργείται υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος έχει υψηλή στάθμη κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων και χαμηλή έως μηδενική στάθμη κατά την περίοδο της ξηρασίας (Καράς και Λεονάρδος, 1993).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα όσον αφορά τις γενικές κλίσεις πρανών αποθέσεων ορυχείων στο Λ.Κ.Δ.Μ. παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά παραδείγματα γενικών κλίσεων πρανών αποθέσεων ορυχείων στο Λ.Κ.Δ.Μ.

Ορυχείο	Εσωτερική απόθεση	Εξωτερική απόθεση
Κύριο	1 : 3.7 (15,12°)	
Καρδιάς	1 : 7.5 (7,6°)	
Βόρειος Τομέας	1 : 5 (11,3°)	
Νότιο Πεδίο		1 : 4.5 (12,53°)
Τομέας 6		1 : 7.5 (7,6°)

Τα ανωτέρω αναφέρονται στην πρακτική που ακολουθείται από τη ΔΕΗ για τη διαμόρφωση των πρανών των αποθέσεων (Σαχαρίδης, 2002).

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η διερεύνηση της μακροχρόνιας ευστάθειας μιας τυπικής απόθεσης ύψους 110m από στείρα υλικά που προέρχονται από την εξόρυξη του λιγνίτη του Ν. Πεδίου (Τομέας 6) του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (Πτολεμαΐδα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

2.1 Γεωτεχνικές παράμετροι των στείων υλικών απόθεσης

Για τη διερεύνηση του ύψους της απόθεσης που θα μπορούσε να δημιουργηθεί με στείρα υλικά από την εκμετάλλευση, χρησιμοποιήθηκε δείγμα από μαργαϊκό ορίζοντα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας. Το δείγμα είχε ληφθεί από το ορυχείο “Τομέας 6” στο πλαίσιο προηγούμενης ερευνητικής εργασίας (Στειακάκης, 2004). Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κατάταξης του γεωυλικού (κοκκομετρική ανάλυση, προσδιορισμός των ορίων πλαστικότητας – υδαρότητας), δοκιμές άμεσης διάτμησης και στερεοποίησης. Έγινε ο σχεδιασμός μιας τυπικής απόθεσης ύψους 110m και προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας και οι αναμενόμενες καθιζήσεις. Η διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς της απόθεσης σε συνάρτηση με τη μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα πραγματοποιήθηκε με παραμετρική ανάλυση.

Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του δείγματος πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ταυτοποίησης και ταξινόμησής του. Στο εργαστήριο έγινε με:

- α) τη χρήση κοσκίνων – για το εδαφικό κλάσμα με κόκκους $>0.075\text{mm}$
- β) την υδρομετρική μέθοδο (καθίζηση σε υγρό περιβάλλον) – για το εδαφικό κλάσμα με κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No200 ($<0.075\text{mm}$) και μέχρι διαμέτρου 0.001mm περίπου.

A. Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση κοσκίνων

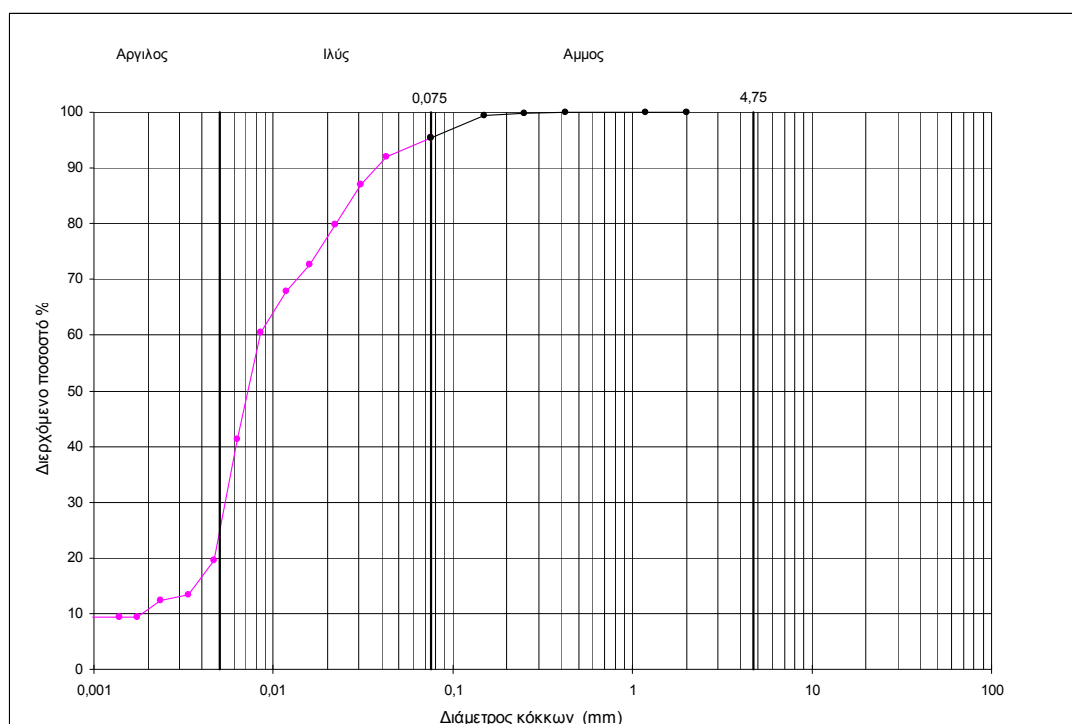
Η μέθοδος αφορά στον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των κόκκων με τη χρησιμοποίηση κοσκίνων τετραγωνικών ή κυκλικών οπών. Δείγμα εδάφους με τη φυσική του υγρασία, κοσκινίσθηκε μέσα από μια σειρά κοσκίνων και καταγράφηκε το βάρος που συγκρατήθηκε ή διέρχεται από κάθε κόσκινο (Στειακάκης, 2008).

B. Υδρομετρική μέθοδος (κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο)

Χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα ξηρού εδαφικού δείγματος (40,41g), η οποία τοποθετήθηκε σε ογκομετρικό κύλινδρο που γέμισε με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1000 ml. Το διάλυμα που προέκυψε αναδεύτηκε και κατά τη διάρκεια της καθίζησης των κόκκων καταγράφηκε, ανά τακτικά χρονικά διαστήματα, η μάζα των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται “εν αιωρήσει”. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιείται το αραιόμετρο τύπου 152h (πυκνόμετρο ή υδρόμετρο). Με δεδομένη την βαθμονόμηση του αραιομέτρου προέκυψε η μάζα των αιωρούμενων εδαφικών κόκκων (Στειακάκης, 2008).

2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων-κοκκομετρική καμπύλη

Η κοκκομετρική καμπύλη (Σχ. 2.1) σχεδιάστηκε σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου τα ολικά (αθροιστικά) ποσοστά % διερχομένων απεικονίζονται στον (γραμμικό) άξονα των τεταγμένων και το μέγεθος των εδαφικών κόκκων (δεδομένου ότι ποικίλουν ευρύτατα) στον λογαριθμικό άξονα των τετμημένων (Στειακάκης, 2008).



Σχήμα 2.1
Κοκκομετρική Ανάλυση (κατά ASTM D422).

Το ενεργό μέγεθος των κόκκων (d_{10}), προσδιορίστηκε ως η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 10 % κατά βάρος εδαφικών κόκκων. Η τιμή του με βάση το Σχήμα 2.1 εκτιμήθηκε ίση με $d_{10} = 0,0018$.

Ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων (d_{60}) προς το ενεργό μέγεθος (d_{10}) καλείται συντελεστής ομοιομορφίας (τύπος Hazen $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$) και εκτιμήθηκε ίσος με $C_u = 4,61$ (Στειακάκης, 2008).

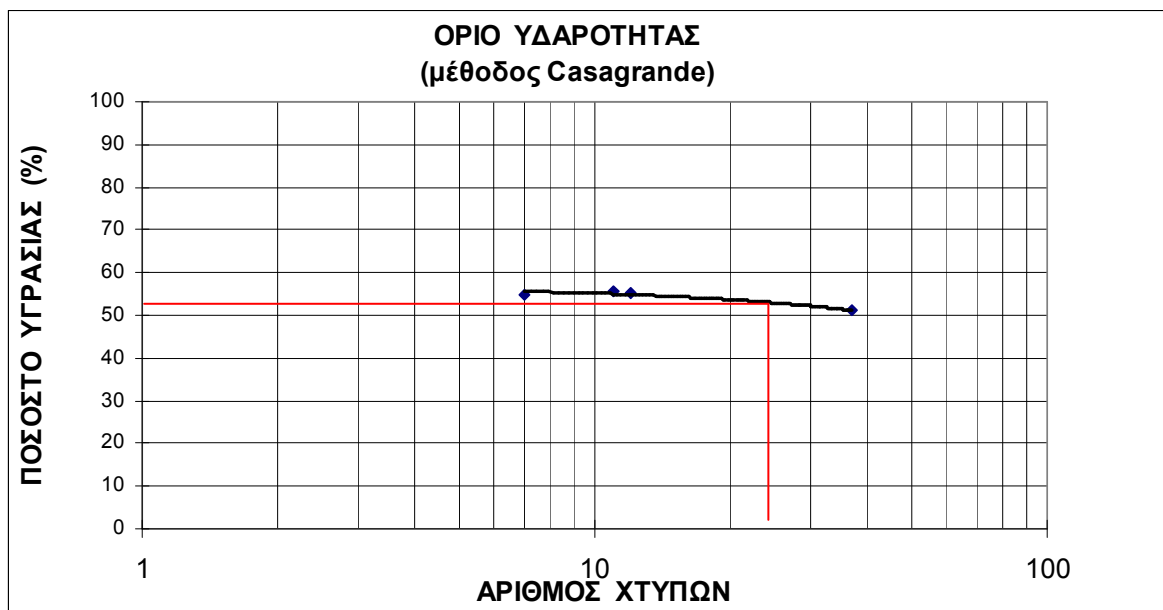
2.3 Όρια Atterberg

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας (όρια Atterberg) πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικό υλικό που διέρχονταν από το κόσκινο Νο 40 (425μm) και δεν είναι εντελώς ξηρό. Ας σημειωθεί ότι για τα περισσότερα εδάφη η φυσική ξήρανση δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των ορίων Atterberg που προκύπτουν, ενώ η ξήρανση σε φούρνο επιφέρει αλλαγές στα χαρακτηριστικά της δομής (συνοχή) των περισσότερων εδαφών, (ιδιαίτερα εκείνων που έχουν σε μεγάλο ποσοστό κόκκους μικρού μεγέθους) και επηρεάζει τα αποτελέσματα.

2.3.1 Όριο υδαρότητας

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας με τη μέθοδο Casagrande, σε δείγματα από το ίδιο το έδαφος αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό. Με βάση τα αποτελέσματα, προσδιορίστηκε ο αριθμός των κτυπημάτων που απαιτούνται για να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12.7 mm

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών (βλέπε Παράρτημα σελ. 72) σχεδιάστηκε διάγραμμα το οποίο στον άξονα των τετμημένων έχει τον αριθμό των κτύπων που απαιτήθηκαν έως ότου οι δύο πλευρές του δείγματος ενωθούν στη βάση της χαραγής και σε μήκος 12.7 mm και στον άξονα των τεταγμένων έχει το ποσοστό της υγρασίας % (σχήμα 2.2). Το όριο υδαρότητας προέκυψε από την τετμημένη που αντιστοιχεί στους 25 κτύπους. Η τιμή του ορίου υδαρότητας είναι 52,95.



Σχήμα 2.2

Διάγραμμα ποσοστού υγρασίας (%) – αριθμού χτύπων.

2.3.2 Όριο πλαστικότητας

Με βάση τα αποτελέσματα (βλέπε Παράρτημα σελ. 73), υπολογίστηκαν τα ποσοστά υγρασίας που έχουν τα δοκίμια (ραβδίσκοι) όταν διαμορφώνονται με διάμετρο 3mm και μειώνοντας περαιτέρω αυτή τη διάμετρο θραύονται. Πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές και το όριο πλαστικότητας προσδιορίστηκε ίσο με $PL = 45,69$.

Τέλος υπολογίστηκε ο δείκτης πλαστικότητας σαν η διαφορά του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας. Εκτιμήθηκε ίσος με 7,26.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΕΙΡΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

3.1 Γενικά

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 προσδιορίζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους (Στειακάκης, 2008).

Η διατμητική αντοχή οφείλεται:

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 και μπορεί να λεχθεί ότι προσδίδουν στο έδαφος διατμητική αντοχή ανάλογης φύσης με αυτή των στερεών σωμάτων. Το αίτιο αυτό εκδήλωσης 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 κατά ολίσθηση, δίδεται από τη σχέση του Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [3.1]$$

όπου: τ = η αντοχή του εδάφους σε διάτμηση

c = η συνοχή του εδάφους

σ = η ορθή τάση στο επίπεδο διάτμησης

φ = η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

Στην περίπτωση που αναπτύσσεται πίεση πόρων, θεωρώντας ενεργές τάσεις, η διατμητική αντοχή του εδάφους δίνεται από τη σχέση Coulomb-Terzaghi:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad [3.2]$$

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad [3.3]$$

όπου: σ' = η ενεργή κάθετη τάση που ασκείται στο επίπεδο διάτμησης

u = η πίεση του νερού των πόρων

c' και φ' = οι παράμετροι του εδάφους που αναφέρονται στις ενεργές τάσεις

Η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή προσδιορίζονται εργαστηριακά με διάφορες συσκευές οι οποίες προκαλούν στο εδαφικό δοκίμιο μία από τις παρακάτω μορφές διάτμησης:

- ✓ απ' ευθείας διάτμηση
- ✓ διάτμηση με τριαξονική φόρτιση

Η πλέον χρησιμοποιούμενη δοκιμή είναι αυτή της άμεσης διάτμησης κατά την οποία ασκείται στο έδαφος μια σταθερή κατακόρυφη τάση και συγχρόνως υποβάλλεται σε διάτμηση κατά μια προδιαγεγραμμένη επίπεδη επιφάνεια (κάθετη στην εφαρμοζόμενη κατακόρυφη τάση). Κατά την δοκιμή μετράται η απαιτούμενη για την διάτμηση δύναμη.

Η διάτμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αύξηση της διατμητικής δύναμης κατά σταθερές βαθμίδες και σε ίσα χρονικά διαστήματα (συσκευές ελεγχόμενων τάσεων), είτε με μετακίνηση του κινητού τμήματος της συσκευής με σταθερή ταχύτητα (Στειακάκης, 2008).

Οι δοκιμές διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγιναν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας χρησιμοποιώντας τη συσκευή άμεσης διάτμησης. Στη συσκευή του εργαστηρίου η κίνηση του κατώτερου τμήματος του κυτίου διάτμησης (μέσα στο οποίο τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο) γίνεται με ηλεκτροκίνητο τρόπο και με δεδομένο ρυθμό. Το ανώτερο τμήμα του κυτίου φέρεται από οριζόντιο στέλεχος στο οποίο είναι προσαρμοσμένος ένας δυναμομετρικός δακτύλιος για τη μέτρηση της διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται κατά τη δοκιμή (Στειακάκης, 2008).

Οι δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βραδείες δοκιμές στερεοποιημένου δοκιμίου.

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές για το εδαφικό δείγμα που μελετήθηκε. Η πρώτη αφορούσε διάτμηση του δείγματος μετά από κορεσμό και η δεύτερη σε δείγμα με τη φυσική του υγρασία. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με επιβολή ορθών φορτίων 4kg, 8kg και 16kg αντίστοιχα.

Η διάτμηση πραγματοποιήθηκε σε δείγμα με φυσική υγρασία, αλλά και σε κορεσμένο δείγμα. Στη δεύτερη περίπτωση προστέθηκε νερό στη συσκευή διάτμησης, το δείγμα αφέθηκε για κορεσμό και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στερεοποίηση και διάτμησή του.

3.2 Ρυθμός οριζόντιας μετατόπισης

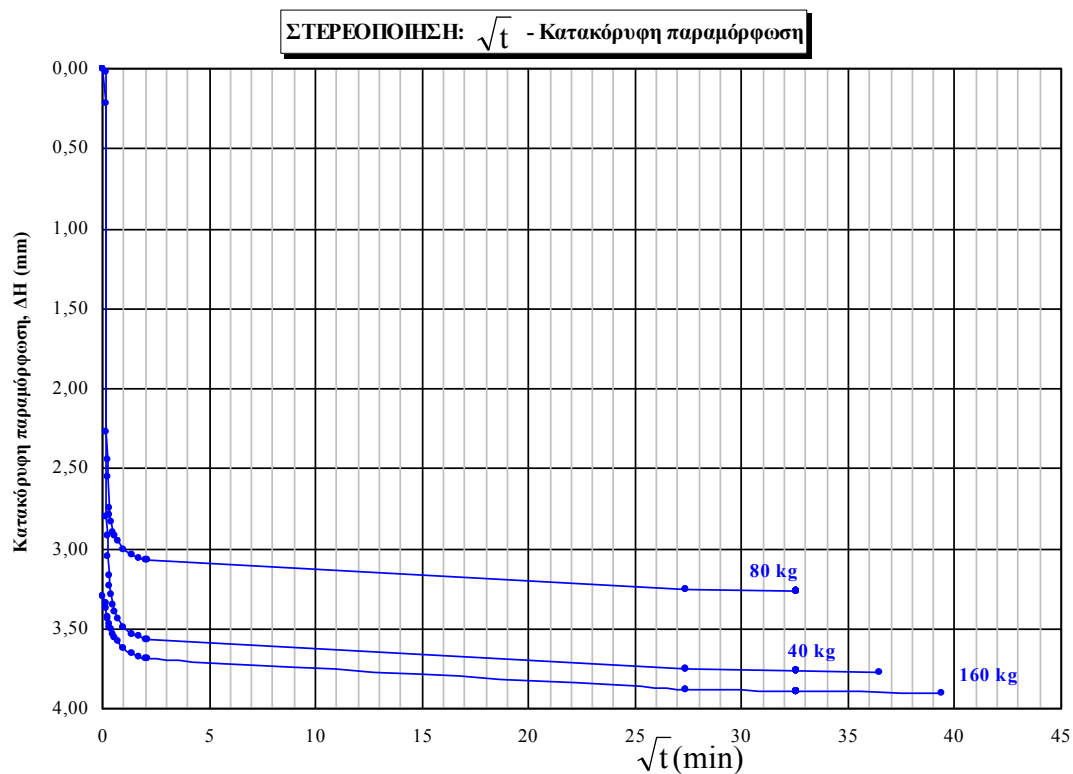
Ο χρόνος που απαιτείται για να επέλθει αστοχία υπολογίσθηκε με βάση το Σχήμα 3.1 από τον ακόλουθο τύπο: (E. Bowles, 1988).

$$t_f = 12 * t_{90} \quad [3.4]$$

Όπου t_f = ο χρόνος που χρειάζεται για να επέλθει αστοχία

t_{90} = ο χρόνος που χρειάζεται για να επέλθει το 90% της στερεοποίησης

Επειδή όμως ο ρυθμός οριζόντιας μετατόπισης που προέκυψε ήταν πολύ μεγάλος (της τάξεως των 7,92 mm/min), χρησιμοποιήθηκε με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα ρυθμός διάτμησης 0,003mm/s για το υλικό με τη φυσική υγρασία και 0,032mm/s για το κορεσμένο υλικό. Η επιλογή των αργών αυτών ρυθμών έγινε καθότι ενδιαφέρει η διερεύνηση της μακροχρόνιας ευστάθειας των πρανών, άρα για τον προσδιορισμό των c' και ϕ' επιλέγοντας αργό ρυθμό, προσομοιώνονται πιο αξιόπιστα οι συνθήκες πεδίου όσον αφορά τη μακροχρόνια συμπεριφορά.



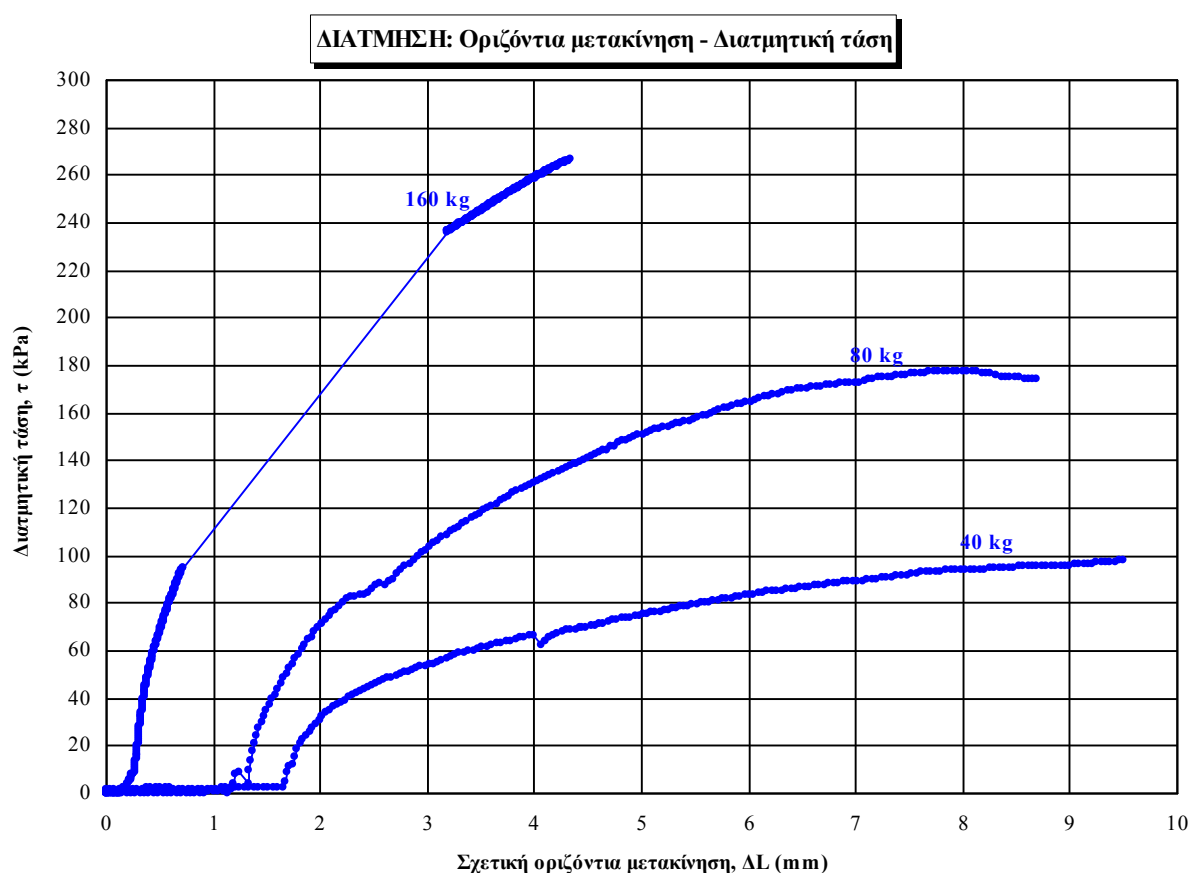
Σχήμα 3.1

Διάγραμμα κατακόρυφης παραμόρφωσης – ρίζας χρόνου.

3.3 Αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης σε 6 δείγματα. Περιλαμβάνουν:

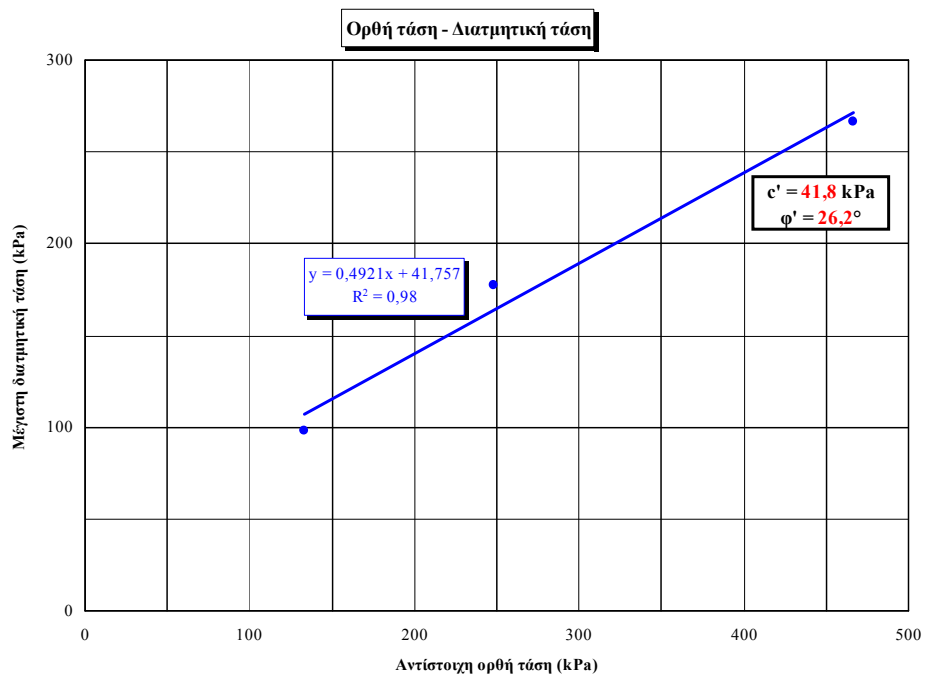
- ✓ Διάγραμμα της διατμητικής τάσης (τ) συναρτήσει της σχετικής οριζόντιας μετακίνησης (ΔL) κατά την διάτμηση
- ✓ Διάγραμμα της μέγιστης διατμητικής τάσης (τ) συναρτήσει της αντίστοιχης ορθής τάσης (σ) για τα δοκίμια που διατμήθηκαν



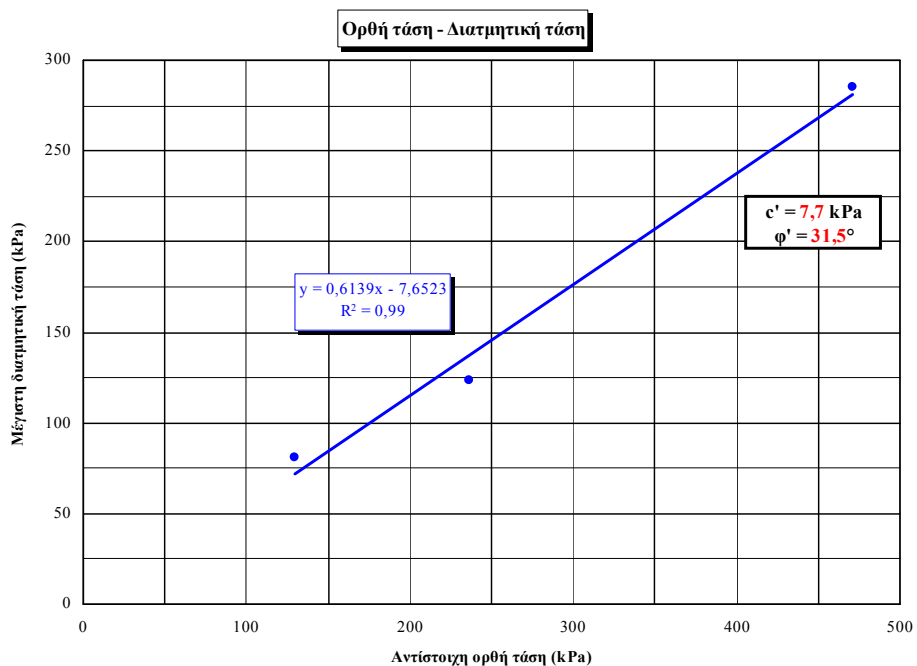
Σχήμα 3.2

Διάγραμμα διατμητικής τάσης – σχετικής οριζόντιας μετακίνησης για μη κορεσμένο υλικό.

Από τα διαγράμματα της μέγιστης διατμητικής τάσης συναρτήσει της αντίστοιχης ορθής τάσης (Σχήμα 3.3, Σχήμα 3.4), υπολογίστηκαν οι παράμετροι c' και ϕ' με τιμές $c' = 41,8 \text{ kPa}$, $\phi' = 26,2^\circ$, $c' = 7,7 \text{ kPa}$, $\phi' = 31,5^\circ$ για μή κορεσμένα και κορεσμένα δείγματα αντιστοίχως.



Σχήμα 3.3
Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής - ορθής τάσης
για μη κορεσμένο υλικό.



Σχήμα 3.4
Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής - ορθής τάσης
για κορεσμένο υλικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

4.1 Γενικά

Με τη φόρτιση ενός κορεσμένου, μικρής διαπερατότητας εδάφους, το φορτίο φέρεται αρχικά από το νερό των πόρων και σταδιακά καθώς η πίεση εκτονώνεται, το φορτίο μεταφέρεται στον εδαφικό σκελετό. Θεωρώντας ότι η παραμόρφωση των εδαφικών κόκκων κάτω από το συγκεκριμένο φορτίο είναι εξαιρετικά μικρή, ο όγκος του δοκιμίου μειώνεται ανάλογα με την ποσότητα του νερού που εκρέει. Το παραπάνω φαινόμενο καλείται στερεοποίηση του εδάφους και η εξέλιξη του εξαρτάται από το εδαφικό υλικό.

Σκοπός της δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης εδαφών είναι η πρόβλεψη του ρυθμού και του μεγέθους καθίζησης των κατασκευών επί αργιλικών εδαφών.

Η δοκιμή πραγματοποιείται στο οιδήμετρο (συμπιεσόμετρο) εφαρμόζοντας σταδιακά, διάφορα βάρη σ' ένα πλευρικά περιορισμένο δοκίμιο που έχει ύψος περίπου το 1/4 της διαμέτρου του. Η μεταβολή του ύψους σε κάθε στάδιο της φόρτισης καταγράφεται για χρονικό διάστημα συνήθως 24h. Επειδή δεν επιτρέπεται πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου, η δοκιμή προκαλεί μονοδιάστατη στερεοποίηση (Στειακάκης, 2008).

Εκτιμώμενα μεγέθη

- ✓ Ο δείκτης συμπίεσης C_c που υποδηλώνει την ικανότητα συμπίεσης του εδάφους.
- ✓ Ο συντελεστής συμπιεστότητας C_v ($m^2/year$) που υποδεικνύει τον ρυθμό συμπίεσης κατά την φόρτιση και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ρυθμού καθίζησης:

Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι το έδαφος είναι ομογενές, κορεσμένο σε νερό, οι φυσικές ιδιότητες του παραμένουν σταθερές κάτω από τη συγκεκριμένη φόρτιση, ενώ η φόρτιση και η στράγγιση εκδηλώνονται μονοδιάστατα. Εντούτοις, στη φύση ο ρυθμός συμπίεσης (που ελέγχεται όχι μόνο από κατακόρυφη αλλά και από οριζόντια στράγγιση) διαφέρει σημαντικά από αυτόν που προκύπτει στο εργαστήριο (όπου

επιτρέπεται μόνο κατακόρυφη στράγγιση) και κατά συνέπεια το εκτιμώμενο μέγεθος αποκλίνει σε κάποιο βαθμό του πραγματικού (Στειακάκης, 2008).

4.2 Δοκιμή στερεοποίησης

Πραγματοποιήθηκαν 2 δοκιμές συμπιεστότητας σε δείγμα από μαργαϊκό ορίζοντα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας στη θέση όπου αναπτύσσονταν το ορυχείο “Τομέας 6”. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγμα που είχε την φυσική του υγρασία αλλά και σε κορεσμένο δείγμα επιβάλλοντας σταδιακά φόρτιση μέχρι 1477 kPa.

Η επεξεργασία των μετρήσεων της υποχώρισης του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου σε κάθε στάδιο φόρτισης πραγματοποιήθηκε με βάση το ισοδύναμο ύψος των εδαφικών κόκκων. Η έννοια του ισοδύναμου ύψους των εδαφικών κόκκων είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες του δοκιμίου και παραμένει σταθερό καθ’ όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Για τον προσδιορισμό του χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$H_s = \frac{m_d * 1000}{G_s * \rho_w * A} \quad [4.1]$$

όπου: H_s = το ισοδύναμο ύψος των εδαφικών κόκκων σε mm

m_d = η μάζα σε g του ξηρού δείγματος

G_s = το ειδικό βάρος των κόκκων σε g/cm^3

ρ_w = η πυκνότητα του νερού σε Mg/m^3

A = η επιφάνεια του δοκιμίου σε mm^2

Ο αρχικός λόγος κενών e_o υπολογίστηκε από το αρχικό ύψος του δοκιμίου, πριν αυτό υποβληθεί σε οποιοδήποτε φορτίο με βάση τη σχέση:

$$e_o = \frac{H_o - H_s}{H_s} \quad [4.2]$$

όπου: H_o = το αρχικό ύψος του δοκιμίου σε mm

H_s = το ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων σε mm

Ο λόγος κενών e μετά την ολοκλήρωση κάθε σταδίου φόρτισης, εκτιμήθηκε συναρτήσει του αρχικού λόγου κενών e_o και της μεταβολής ΔH του ύψους του δοκιμίου σύμφωνα με την εξίσωση

$$e = e_o - \frac{\Delta H}{H_s} \quad [4.3]$$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται σε διαγράμματα (βλέπε Παράρτημα σελ 85-93) και περιλαμβάνουν:

- ✓ Συγκεντρωτικό διάγραμμα της αθροιστικής παραμόρφωσης συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου
- ✓ Διαγράμματα ανά φορτίο (φόρτιση – αποφόρτιση) της αθροιστικής παραμόρφωσης συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου
- ✓ Διάγραμμα του λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (e - P)
- ✓ Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης (e - $\log P$)
- ✓ Διάγραμμα της ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της επιβαλόμενης τάσης (ε - P)
- ✓ Διάγραμμα συντελεστή μείωσης όγκου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (m_v - P)

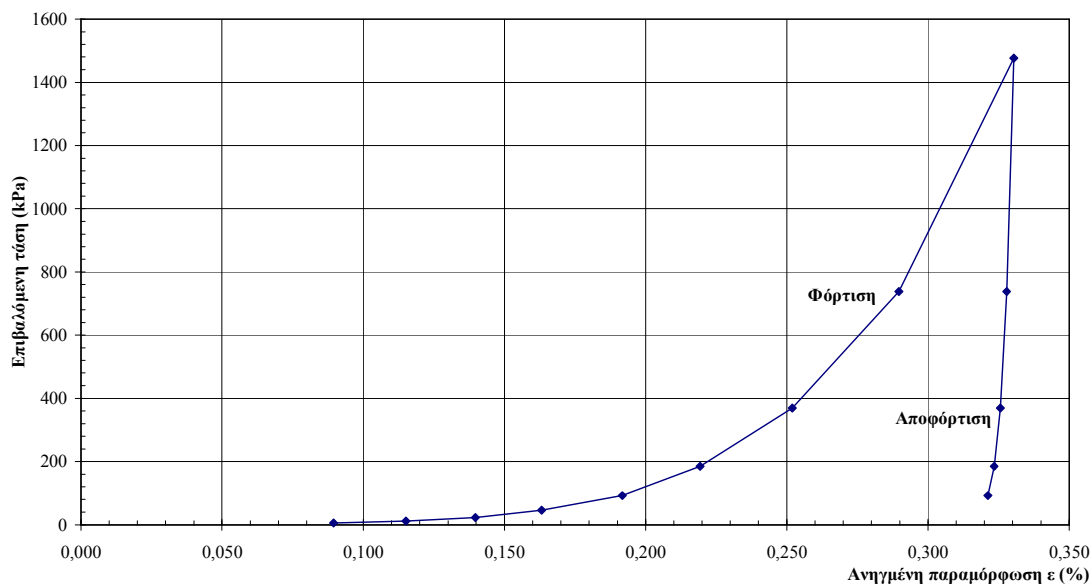
Οι τιμές που προέκυψαν για τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν (βλέπε Παράρτημα σελ. 84, 89) χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αναμενόμενης καθίζησης της απόθεσης.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν αναλυτικά οι παράμετροι που υπολογίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών.

4.2.1 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας (E)

Για κάθε στάδιο φόρτισης καταγράφεται η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Με βάση λοιπόν την τελική μέτρηση κάθε σταδίου υπολογίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου για το στάδιο αυτό. Έτσι, κατασκευάζεται το διάγραμμα της επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της αντίστοιχης ανηγμένης παραμόρφωσης που περιγράφει το συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα, για τα στάδια της φόρτισης αλλά και της αποφόρτισης του δοκιμίου (Καλογήρου, 2000).

Το μέτρο αυτό θεωρήθηκε ότι προσεγγίζει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε συνθήκες φυσικής υγρασίας.



Σχήμα 4.1

Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης P (kPa) - ανηγμένης παραμόρφωσης ε (%) για μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

Το μέτρο ελαστικότητας E για κάθε στάδιο της δοκιμής προκύπτει ως εξής:

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} \quad [4.4]$$

όπου: ΔP = η μεταβολή της τάσης μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης σε kPa

$\Delta \varepsilon$ = η μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου μεταξύ δύο σταδίων

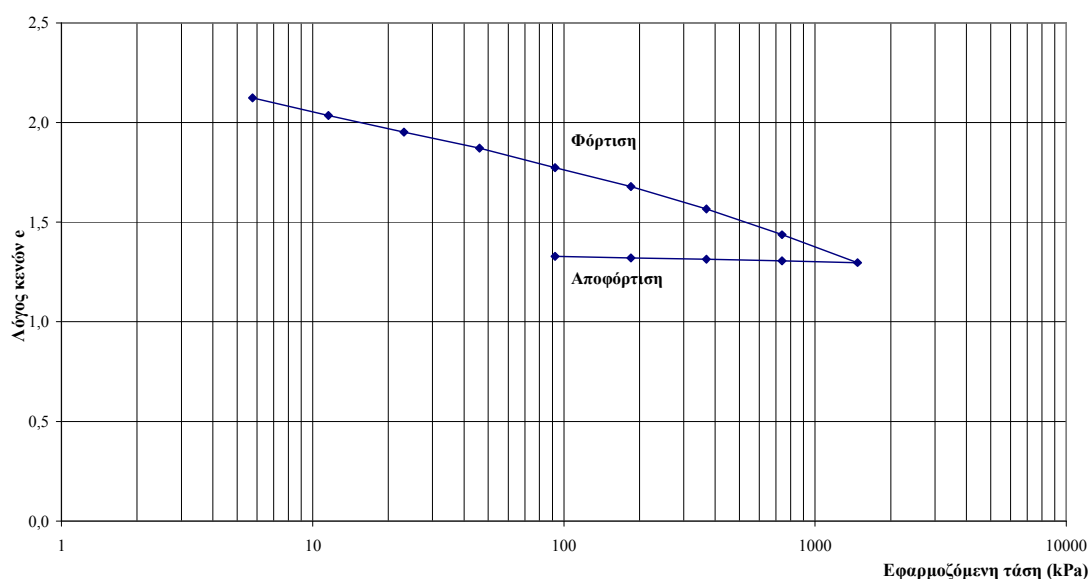
E = το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους σε kPa

4.2.2 Δείκτης συμπίεσης (C_c) και δείκτης διόγκωσης (C_s)

Ο δείκτης συμπίεσης C_c είναι η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης λόγου κενών e συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης $\log P$ (Σχήμα 4.2) και είναι μέγεθος αδιάστατο. Για δύο οποιαδήποτε σημεία του γραμμικού τμήματος της καμπύλης είναι:

$$C_c = \frac{e_o - e_1}{\log \frac{P_1}{P_o}} \quad [4.5]$$

Για το υπολογιζόμενο δείγμα προέκυψε μέση τιμή $C_c=0,188$ για το κορεσμένο υλικό.



Σχήμα 4.2

Διάγραμμα λόγου κενών e – λογαρίθμου εφαρμοζόμενης τάσης P (kPa)
για μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

Το τμήμα του διαγράμματος του λόγου κενών e συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης $\log P$ που αντιστοιχεί στη διαδικασία της αποφόρτισης, μπορεί να προσεγγιστεί με μια ευθεία, η κλίση της οποίας αναφέρεται ως δείκτης διόγκωσης C_s , κατ' αντιστοιχία με το δείκτη συμπίεσης. Η σημασία προσδιορισμού των παραπάνω παραμέτρων είναι μεγάλη αφού αυτές υποδεικνύουν την ικανότητα συμπίεσης ή διόγκωσης του εδάφους αντίστοιχα, με την επιβολή ή απομάκρυνση φορτίου από την επιφάνειά του.

4.2.3 Συντελεστής μείωσης του όγκου (m_v)

Ως συντελεστής μείωσης του όγκου m_v (m^2/MN) ορίζεται η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα αύξησης της ενεργής τάσης. Η μεταβολή αυτή μπορεί να εκφράζεται είτε σε μεταβολή του λόγου κενών ή σε μεταβολή του πάχους του δοκιμίου (Στειακάκης, 2008).

Ειδικότερα ο m_v είναι το πηλίκο του συντελεστή συμπίεσης του εδάφους a_v προς τον όγκο του δοκιμίου $1+e_i$, υπολογίζεται για κάθε στάδιο φόρτισης και η μέση τιμή λαμβάνεται σαν αντιπροσωπευτική για το γεωυλικό.

$$m_v = \frac{e_o - e_1}{(1 + e_o)} \cdot \frac{1}{(\sigma'_1 - \sigma'_o)} = \frac{(H_o - H_1)}{H_o \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_o)} \quad [4.6]$$

όπου: $d\sigma_i$ = η μεταβολή της τάσης μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης σε kPa

de_i = η μεταβολή λόγου κενών του δοκιμίου μεταξύ δύο σταδίων

dH_i = η μεταβολή του πάχους του δοκιμίου μεταξύ δυο σταδίων σε mm

Η τιμή m_v για κάθε στάδιο φόρτισης παρουσιάζεται στο παράρτημα σελ. 84, 89.

Η μέση τιμή του κορεσμένου δείγματος εκτιμήθηκε ίση με $m_v = 0,5332 \text{ m}^2/MN$.

Η μέση τιμή του μη κορεσμένου εκτιμήθηκε ίση με $m_v = 0,8405 \text{ m}^2/MN$.

4.2.4 Συντελεστής συμπιεστότητας (C_v)

Ο συντελεστής συμπιεστότητας C_v (m^2/year), υποδεικνύει το ρυθμό συμπίεσης κατά τη φόρτιση. Ο συντελεστής συμπιεστότητας C_v προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$C_v = \frac{0,848 * H^2}{t_{90}} \quad [4.7]$$

όπου: C_v = ο συντελεστής συμπιεστότητας σε mm^2/min

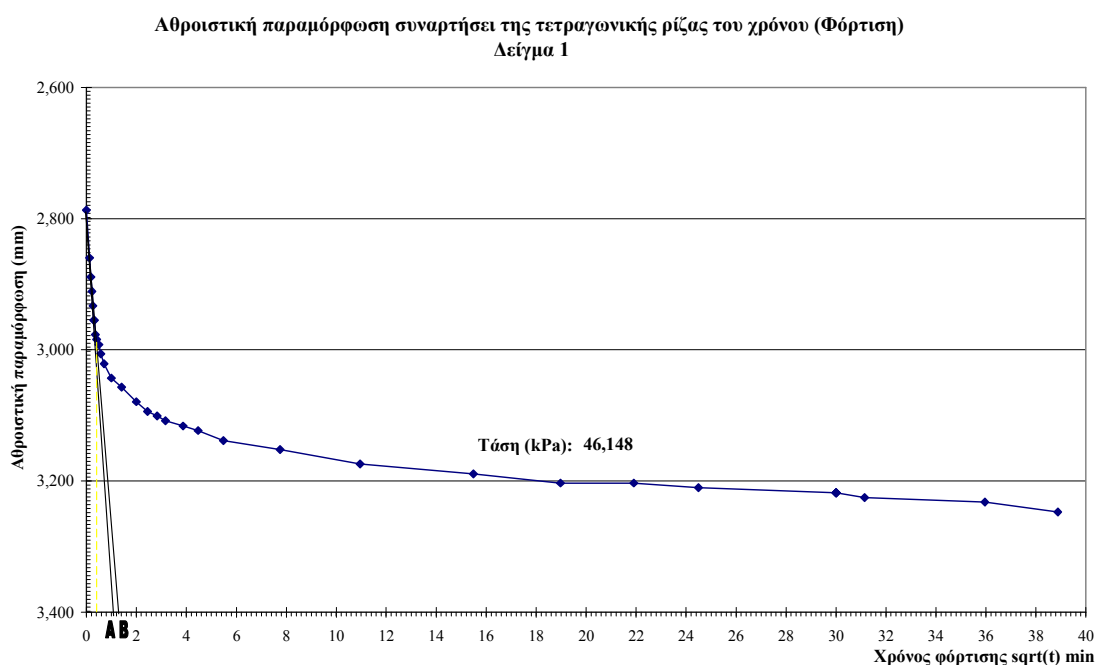
H = το μέσο ύψος του δοκιμίου κατά το συγκεκριμένο στάδιο φόρτισης που προκύπτει από τη σχέση $H = H_o - [(αρχική + τελική \text{ ένδειξη μηχανοστοιμέτρου κατά το τρέχον στάδιο})/2]$ σε mm^2 . (Στην περίπτωση των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν επιτρέπεται στράγγιση και από τις δύο πλευρές του δοκιμίου και η τιμή του H υποδιπλασιάζεται).

t_{90} = ο χρόνος που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης 90%, σε min.

Η μέση τιμή του κορεσμένου δείγματος εκτιμήθηκε και είναι ίση με $C_v = 248,73$ (m^2/year).

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται μια καμπύλη αθροιστικής παραμόρφωσης σε mm συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου σε min. Καμπύλες αυτού του είδους σχεδιάζονται για κάθε στάδιο φόρτισης με βάση τις ενδείξεις του μετρητή παραμορφώσεων για καθορισμένες χρονικές στιγμές και προσδιορίζεται ο χρόνος t_{90} που αντιστοιχεί σε 90% πρωτεύουσας στερεοποίησης.

Το αρχικό τμήμα των καμπυλών αυτών (εξαιρουμένων των πρώτων μετρήσεων), προσεγγίζεται με μια ευθεία γραμμή. Η γραμμή αυτή προεκτείνεται μέχρι να τμήσει τον άξονα της αθροιστικής παραμόρφωσης, προσδιορίζοντας έτσι το “διορθωμένο” μηδενικό σημείο (την παραμόρφωση δηλαδή που αντιστοιχεί σε 0% στερεοποίηση) (ευθεία Α). Έπειτα σχεδιάζεται μια δεύτερη ευθεία (ευθεία Β) η οποία ξεκινά από το διορθωμένο μηδενικό σημείο και έχει τετμημένη 1,15 φορές μεγαλύτερη από αυτή της ευθείας Α (Στειακάκης, 2008).



Μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για τον υπολογισμό του t_{90} .

Η τομή της ευθείας Β με την καμπύλη των αποτελεσμάτων αντιστοιχεί στο 90% της πρωτεύουσας στερεοποίησης και μας δίνει το t_{90} που είναι και το ζητούμενο.

Για το μελετούμενο εδαφικό δείγμα προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα στις σελίδες 85-87, 90-92.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 4.1: Τιμές t_{90} για κορεσμένο υλικό.

sqrt $t_{90}(\text{min})$	$t_{90}(\text{min})$
0,30	0,0900
0,20	0,040
0,63	0,397
0,42	0,176
1,00	1,000
0,47	0,221
0,58	0,34
0,43	0,185
0,74	0,548

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ

Η αρχικά θεωρούμενη γεωμετρία των αποθέσεων ορίστηκε από τα παρακάτω μεγέθη:

- Συνολικό ύψος απόθεσης 110m
- 5 βαθμίδες ύψους 20m και 1 βαθμίδα 10m
- Κλίση βαθμίδας 1:2

Με βάση τις γεωτεχνικές παράμετρους του υλικού της απόθεσης και τη διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών, προέκυψε ότι για να ικανοποιείται ένας συντελεστής ασφάλειας $FS=1.5$, η μέση κλίση της απόθεσης πρέπει να είναι:

- Μέση κλίση απόθεσης για μη κορεσμένο υλικό $22,5^\circ$ ($\approx 1/2,4$)
- Μέση κλίση απόθεσης για κορεσμένο υλικό $14,7^\circ$ ($\approx 1/3,8$)

Το υπόβαθρο της απόθεσης θεωρήθηκε ότι αποτελείται από λατυποπαγές υλικό πάχους 20m.

5.1 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας των πρανών

Μέθοδος των λωρίδων (method of slices)

Οι επιλύσεις ευστάθειας με τη μέθοδο των λωρίδων απαιτούν την αποτύπωση της γεωμετρίας του εξεταζόμενου πρανούς υπό κλίμακα, οπότε και εκτιμώνται τα απαιτούμενα για την επίλυση μεγέθη.

Έχουν καθιερωθεί προσεγγιστικές μέθοδοι οι οποίες, υποδιαιρώντας την κυκλοειδή ολισθαίνουσα μάζα σε επιμέρους λωρίδες με κατακόρυφες πλευρές, παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης της μεταβολής σε κάθε μια από τις λωρίδες αυτές των εδαφικών παραμέτρων, των υπεδαφικών νερών κ.λ.π. Η υποδιαίρεση αυτή γίνεται συνήθως σε λωρίδες ίσου πλάτους και προφανώς μοναδιαίου πάχους, ο αριθμός των οποίων συνήθως κυμαίνεται από 10 μέχρι 40 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Η ανάλυση στατικής ισορροπίας που ικανοποιεί ισορροπία δυνάμεων και ροπών, δίνει δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και μία εξίσωση ροπών για κάθε λωρίδα, δηλαδή συνολικά $3n$ στερεοστατικές εξισώσεις ισορροπίας (όπου n : ο αριθμός των λωρίδων). Ο αριθμός των αγνώστων που υπεσέρχονται στην επίλυση είναι μεγαλύτερος ($5n-2$), γεγονός που συνεπάγεται πρακτικά αδυναμία επίλυσης. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται συνήθως με μείωση του αριθμού των αγνώστων. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες αφορούν κυρίως τη διεύθυνση ή/και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι επίλυσης οι οποίες διαφοροποιούνται μεταξύ τους, κυρίως ως προς τις αντίστοιχες παραδοχές σχετικά με τη δράση των διαλωριδικών πλευρικών δυνάμεων. Οι σπουδαιότερες των οποίων περιγράφονται στη συνέχεια.

5.1.1 Σουηδική μέθοδος (συμβατική μέθοδος Fellenius).

Η μέθοδος προτάθηκε από τον Fellenius (1936) και είναι γνωστή και ως συμβατική μέθοδος των λωρίδων (Conventional Method of Slices). Είναι η παλαιότερη μέθοδος και η επίλυσή της ικανοποιεί μόνον την ισορροπία των ροπών στο σύνολο της ολισθαίνουσας μάζας. Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι ότι οι διαλωριδικές πλευρικές δυνάμεις (X και E) έχουν συνισταμένες (L_1 και L_2) με διεύθυνση παράλληλη προς τη βάση της λωρίδας και είναι ίσες και αντίθετες (δηλαδή αλληλοεξουδετερώνονται) (Σχήμα 5.2). Η επίλυση των δυνάμεων γίνεται σε άξονα κάθετο στη βάση της λωρίδας.

Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' \Delta l + (W_i \cos \alpha_i - u_i \Delta l) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \quad [5.1]$$

όπου:

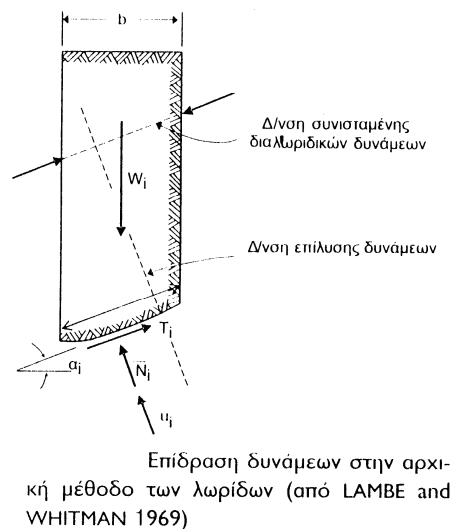
c' και ϕ' : οι παράμετροι διατμητικής αντοχής σε ενεργές συνθήκες φόρτισης

Δl : το μήκος της βάσης κάθε λωρίδας

α_i : η γωνία μεταξύ της ακτίνας του κύκλου ολίσθησης που διέρχεται από το μέσο της βάσης κάθε λωρίδας και της κατακόρυφου

u_i : η πίεση των πόρων (υδροστατική πίεση) στο επίπεδο της βάσης κάθε λωρίδας

W_i : το βάρος κάθε λωρίδας



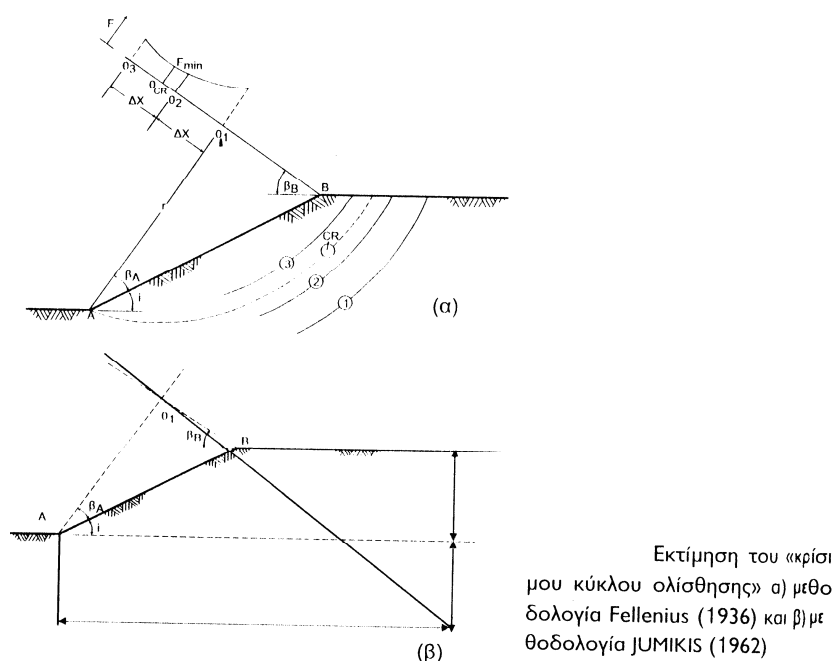
Σχήμα 5.2
(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Η παραπάνω μέθοδος ανάλυσης επιδέχεται και γραφική επίλυση η οποία προϋποθέτει βέβαια σχεδίαση του εξεταζόμενου πρανούς υπό κλίμακα, θεωρώντας τις παθητικές (αντίστασης) και δρώσες (περιστροφής) ροπές ως προς το κέντρο του κύκλου ολίσθησης. Το σημαντικό πρόβλημα είναι ο προσδιορισμός του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης, δηλαδή του κύκλου που ο συντελεστής ασφάλειας γίνεται ελάχιστος. Για λόγους συντόμευσης των υπολογισμών υπάρχουν προς την κατεύθυνση αυτή κάποιες γενικές οδηγίες, που οδηγούν στον εντοπισμό του κρίσιμου κύκλου και έχουν εφαρμογή κυρίως στην περίπτωση ομογενών συνεκτικών πρανών. Συγκεκριμένα:

- ✓ Για σχετικά ήπια πρανή (κλίσεις γενικά μικρότερες των 15°) ο κρίσιμος κύκλος ολίσθησης διέρχεται βαθύτερα από το πόδι του πρανούς.
- ✓ Για πιο απότομα πρανή (κλίσεις μέχρι 45° περίπου) ο κρίσιμος κύκλος διέρχεται συνήθως από το πόδι και έχει τη μικρότερη ακτίνα και το μικρότερο μήκος τόξου.
- ✓ Συνήθως για τα πιο απότομα πρανή συνεκτικών εδαφών η κρίσιμη κυκλική επιφάνεια έχει κέντρο O_1 που ορίζεται από την τομή των πλευρών των γωνιών β_A και β_B και διέρχεται από το πόδι του πρανούς ενώ προσεγγιστικά λαμβάνεται $\beta_A=25-29^\circ$ και $\beta_B=35-37^\circ$ (Σχήμα 5.3α). Οι ακριβείς τιμές των γωνιών β_A και β_B για πρανή με κλίσεις από 11° μέχρι 60° δίνονται από τον Fellenius (1936). Η μεθοδολογία αυτή βέβαια δεν είναι εφαρμόσιμη όταν το

έδαφος αρχίζει να γίνεται αμμώδες, οπότε για την περίπτωση αυτή προτάθηκε μια άλλη μεθοδολογία από τον Jumikis (1962) που ενδεικτικά δίνεται στο σχήμα 5.3β και αποτελεί στην ουσία μια επέκταση της αρχικής.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα εκτιμώμενα κέντρα (O_1) του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης με βάση τις παραπάνω μεθοδολογίες είναι ενδεικτικά. Θα πρέπει στη συνέχεια να τοποθετηθούν τουλάχιστον δύο επιπλέον κέντρα σε ίσες περίπου αποστάσεις (O_2 και O_3) πάνω στις συγκεκριμένες ευθείες (στην άνω περιοχή του O_1) ενώ το κέντρο του κρίσιμου κύκλου (O_{CR}) βρίσκεται κάπου ανάμεσα τους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

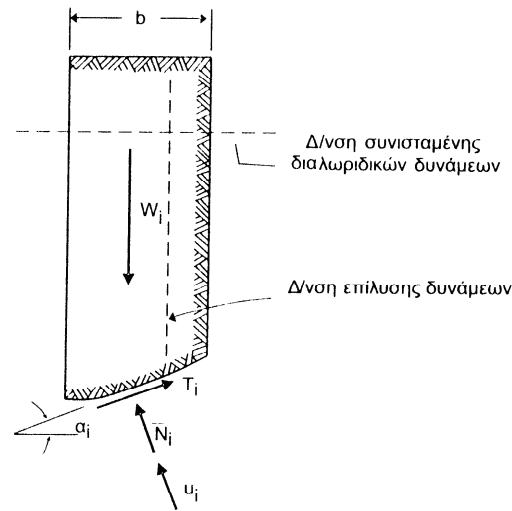


Σχήμα 5.3
(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

5.1.2 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης είναι η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων (Simplified Method of Slices) που προτάθηκε από τον Bishop (1955). Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι ότι οι συνισταμένες των διαλωριδικών πλευρικών δυνάμεων (X και E) έχουν διεύθυνση οριζόντια και είναι προσεγγιστικά ίσες και αντίθετες (δηλαδή η επίδραση τους θεωρείται αμελητέα). Η επίλυση των δυνάμεων γίνεται σε κατακόρυφο άξονα (Σχήμα 5.4). Με τον τρόπο αυτό δεν ικανοποιείται η ισορροπία δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση ούτε η ισορροπία

ροπών σε κάθε λωρίδα αλλά ικανοποιούν την ισορροπία ροπών στο σύνολο της μάζας που ολισθαίνει.



Επίδραση δυνάμεων στην απλοποιημένη μέθοδο BISHOP (από LAMBE and WHITMAN 1969)

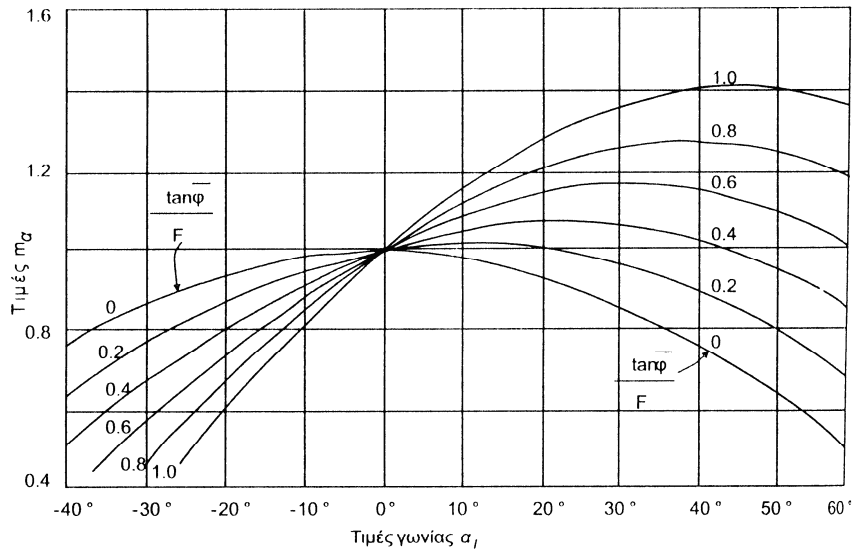
Σχήμα 5.4
(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \{ [c'b + (W_i - u_i b) \tan \phi'] (\frac{1}{m_\alpha}) \}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \quad [5.2]$$

όπου: $m_\alpha = \cos \alpha_i [1 + (\frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{F})]$ [5.3]

Αφού ο συντελεστής ασφάλειας F εμφανίζεται και στα δύο μέλη της εξίσωσης είναι προφανές ότι η επίλυση πρέπει να γίνει με επαναληπτικό τρόπο. Αρχικά τοποθετείται μια υποθετική τιμή του F και εκτιμάται με την εξίσωση μια νέα, μέχρι να επέλθει σύγκλιση των τιμών του F. Η εκτίμηση του m_α μπορεί να γίνει από το διάγραμμα του σχήματος 5.5 (Terzaghi and Peck, 1967).



Διάγραμμα υπολογισμού του m_a (από TERZAGHI and PECK 1967)

Σχήμα 5.5
(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

5.1.3 Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

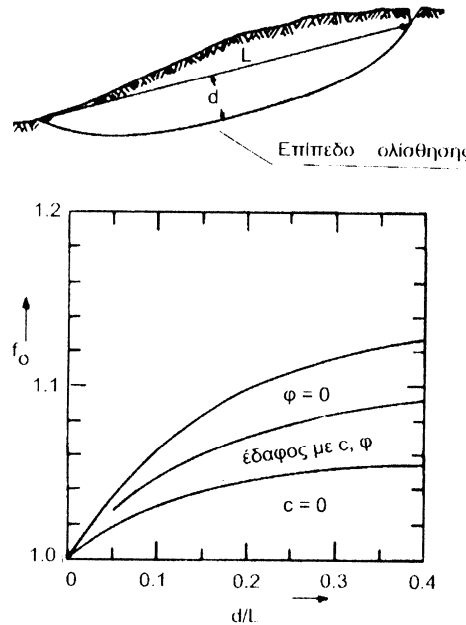
Προτάθηκε από τους Janbu, Bjerrum και Kjaernsli (1956) και χρησιμοποιεί την ίδια παραδοχή με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop, αλλά λαμβάνει επιπρόσθετα υπόψη και την επιρροή των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων χρησιμοποιώντας έναν εμπειρικό διορθωτικό συντελεστή. Ο συντελεστής αυτός (f_0) είναι προκαθορισμένος και οι τιμές του εξαρτώνται από τη συνοχή, τη γωνία εσωτερικής τριβής και το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Δηλαδή η επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να μην είναι κυκλική αλλά γενικότερα καμπυλόγραμμη.

Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = f_0 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c' b + (W_i - u_i b) \tan \phi'}{\cos \alpha_i m_a} \right]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \tan \alpha_i} \quad [5.4]$$

όπου το m_a δίνεται από τη σχέση (3) ή εκτιμάται από το διάγραμμα του σχήματος 5.5. Ο συντελεστής f_0 που αποτελεί τον διορθωτικό παράγοντα του ρόλου των διαλωριδικών δυνάμεων, είναι συνάρτηση της καμπυλότητας της επιφάνειας ολίσθησης και του είδους του εδάφους (εξαρτάται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του). Οι προτεινόμενες τιμές του f_0 δίνονται στο σχήμα 5.6.

Η γενικευμένη μέθοδος που πρότεινε ο Janbu (1957), δέχεται ότι είναι γνωστή η θέση του σημείου εφαρμογής των διαλωριδικών δυνάμεων. Τα σημεία αυτά μάλιστα αποτελούν μία καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη ωθήσεων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Εκτίμηση του συντελεστή f_o

Σχήμα 5.6

(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

5.1.4 Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) ακολούθησε τη γενικότερη μεθοδολογία των λωρίδων και πρότεινε ότι η επίδραση των εσωτερικών δυνάμεων που δρουν σε μια λωρίδα, μπορούν να αντικατασταθούν από τη συνισταμένη τους (Q), η οποία εφαρμόζεται με γωνία θ με την οριζόντια και διέρχεται από το μέσον της λωρίδας ώστε να ικανοποιεί την ισορροπία των ροπών. Γενικά η συνισταμένη (Q) και η γωνία (θ) μεταβάλλονται από λωρίδα σε λωρίδα και από την ισορροπία των δυνάμεων προκύπτει:

$$Q = \frac{\left[\left(\frac{c' b \sec \alpha_i}{F} \right) + \left(\frac{\tan \phi'}{F} \right) (W_i \cos \alpha_i - u b \sec \alpha_i) - W \sin \alpha_i \right]}{\cos(\alpha_i - \theta) \left[1 + \left(\frac{\tan \phi'}{F} \right) \tan(\alpha_i - \theta) \right]} \quad [5.5]$$

Στη μέθοδο αυτή ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας των οριζόντιων και κατακόρυφων εσωτερικών δυνάμεων καθώς επίσης των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ως προς το κέντρο περιστροφής (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Για λόγους απλοποίησης η γωνία (θ) θεωρείται σταθερή, οπότε η τιμή του συντελεστή ασφάλειας εξαρτάται προφανώς από τη σταθερή τιμή της γωνίας (θ). Για κάθε τιμή της θ ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων (F_f) δεν είναι ίσος με το συντελεστή ασφάλειας που υπολογίζεται από την ισορροπία των ροπών (F_m). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή των F_f και F_m με τις τιμές της γωνίας θ . Η τομή των δύο καμπυλών (των F_f και F_m με τη γωνία θ) δίνει το ζεύγος τιμών θ και F που ικανοποιούν όλες τις εξισώσεις.

Αν η γωνία θ γίνει μηδέν (δηλαδή συνισταμένη οριζόντια) οι παραπάνω εξισώσεις καταλήγουν στην απλοποιημένη μέθοδο Bishop, πράγμα που σημαίνει ότι η μέθοδος Bishop αποτελεί υπολογισμό του F_m με $\theta=0$.

5.1.5 Μέθοδος Morgenstern και Price

Οι Morgenstern and Price (1965) ανέπτυξαν μια μέθοδο ανάλυσης που αναφέρεται σε μη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις στατικής ισορροπίας. Η μέθοδος δέχεται ότι η σχέση μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων έχει τη μορφή:

$$X = \lambda f(x)E \quad [5.6]$$

όπου: λ : παράγοντας που υπολογίζεται κατά την επίλυση (αντιπροσωπεύει το ποσοστό της συνάρτησης που χρησιμοποιείται)

$f(x)$: συνάρτηση που αναφέρεται στη μεταβολή των εσωτερικών δυνάμεων

X και E : οι διαλωριδικές δυνάμεις

Η γενικευμένη θεώρηση της μεθόδου είναι ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ δύο λωρίδων έχει προκαθορισμένη κλίση κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Η τιμή της κλίσης μπορεί να έχει οποιαδήποτε κατανομή που ορίζεται από το χρήστη.

Η μέθοδος Spencer είναι αντίστοιχη με τη μέθοδο αυτή με την παραδοχή $f(x)=1$ (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

5.1.6 Παρατηρήσεις από την εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας με τη μέθοδο των λωρίδων

Η επίλυση όλων ανεξαρτήτως των μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας πρανών με το διαχωρισμό των επιμέρους λωρίδων στην πράξη είναι υλοποιήσιμη μόνο με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού σε Η/Υ καθόσον, αν πιθανώς εξαιρεθεί η Σουηδική μέθοδος, όλες οι άλλες είναι πρακτικά ανέφικτες. Με τον τρόπο αυτόν, η ευστάθεια ενός πρανού είναι υπολογιστικά εύκολη αλλά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται κυρίως από τη «σωστή» εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται.

Μια συγκριτική θεώρηση των μεθόδων ανάλυσης οδηγεί στις παρακάτω σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμογή τους:

1. Ορισμένες από τις μεθόδους ανάλυσης δεν ικανοποιούν όλες τις στερεοστατικές εξισώσεις ισορροπίας. Έτσι, οι απλοποιημένες μέθοδοι των Bishop και Janbu δεν ικανοποιούν την ισορροπία δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση ούτε στην ισορροπία ροπών σε κάθε λωρίδα. Ικανοποιούν όμως την ισορροπία ροπών στο σύνολο της μάζας που ολισθαίνει. Η μέθοδος Fellenius ικανοποιεί επίσης μόνο την ισορροπία ροπών στο σύνολο της μάζας που ολισθαίνει. Τέλος, οι μέθοδοι των Morgenstern – Price, γενικευμένη Janbu και Spencer ικανοποιούν όλες τις στερεοστατικές εξισώσεις ισορροπίας και έτσι θεωρούνται σαν οι πλέον ακριβείς.
2. Η μέθοδος Spencer και κυρίως η Morgenstern – Price μπορούν να εφαρμοστούν σε περίπτωση μη κυκλικής (σύνθετης) επιφάνειας ολίσθησης.
3. Οι «ακριβείς» μέθοδοι, δίνουν πρακτικά τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας. Ακόμα και σε ανομοιογενή εδάφη οι διαφορές του συντελεστή ασφαλείας δεν είναι μεγαλύτερος του 15% (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007 από Duncan and Wright, 1980).
4. Η τροποποιημένη μέθοδος Bishop, αν και δεν ικανοποιεί όλες τις συνθήκες ισορροπίας, δίνει περίπου τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας με τις «ακριβείς».
5. Η μέθοδος Fellenius δίνει τιμές γενικά μικρότερες από τις άλλες μεθόδους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

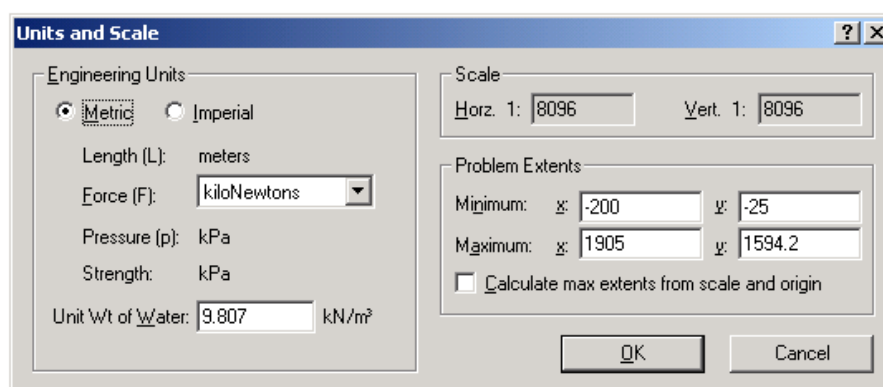
Είναι συνεπώς συντηρητική και η χρήση της συνιστάται μόνο για προκαταρκτικές εκτιμήσεις και σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση άλλης ακριβέστερης μεθόδου (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007 από Καββαδάς και Αλκαλάης, 1988). Μπορεί να δώσει τιμές μέχρι και 50% μικρότερες από τη “σωστή” τιμή αν χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις με ενεργές τάσεις και υψηλές πιέσεις πόρων. Αντίθετα σε αναλύσεις με ολικές τάσεις (χωρίς πιέσεις πόρων) δίνει αρκετά μικρότερες διαφορές (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007 από Duncan and Wright, 1980).

5.2 Σχεδιασμός του πρανούς της απόθεσης

Ο σχεδιασμός του πρανούς της απόθεσης έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου GeoStudio 2004 και συγκεκριμένα με το λογισμικό Slope. Ο κύριος σκοπός ήταν ο σχεδιασμός της απόθεσης ούτως ώστε ο συντελεστής ασφαλείας για πλήρως κορεσμένα υλικά απόθεσης να είναι $FS=1.5$. Στην παρούσα διπλωματική επιχειρήθηκε μια ανάλυση α) για μη κορεσμένο υλικό και β) για κορεσμένη μάζα ούτως ώστε να φανεί η συμπεριφορά της απόθεσης κάτω από τις χειρίστες δυνατές συνθήκες. Διερευνήθηκε η ευστάθεια και κατ'επέκτασιν προσδιορίστηκε η απαιτούμενη κλίση των πρανών θεωρώντας ένα εδαφικό στρώμα με καλύτερες γεωτεχνικές παραμέτρους (χονδρόκοκκα υλικά) στο πρώτο και δεύτερο στρώμα της απόθεσης.

5.2.1 Διαστάσεις καννάβου

Ο σχεδιασμός της απόθεσης έγινε σε κλίμακα 1: 8100 με τη χρήση του μενού Units and Scale του λογισμικού (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7
Units and scale menu.

5.2.2 Καθορισμός παραμέτρων

Επιλέχθηκαν τρεις μέθοδοι ανάλυσης και εκτίμησης του συντελεστή ευστάθειας. Η

- α) Τροποποιημένη Μέθοδος Bishop
- β) Τροποποιημένη Μέθοδος Janbu
- γ) Σουηδική Μέθοδος

Analysis Settings

Project ID | Method | PWP | Slip Surface | FOS Distribution | Advanced

Project Identification

Title:

Comments:

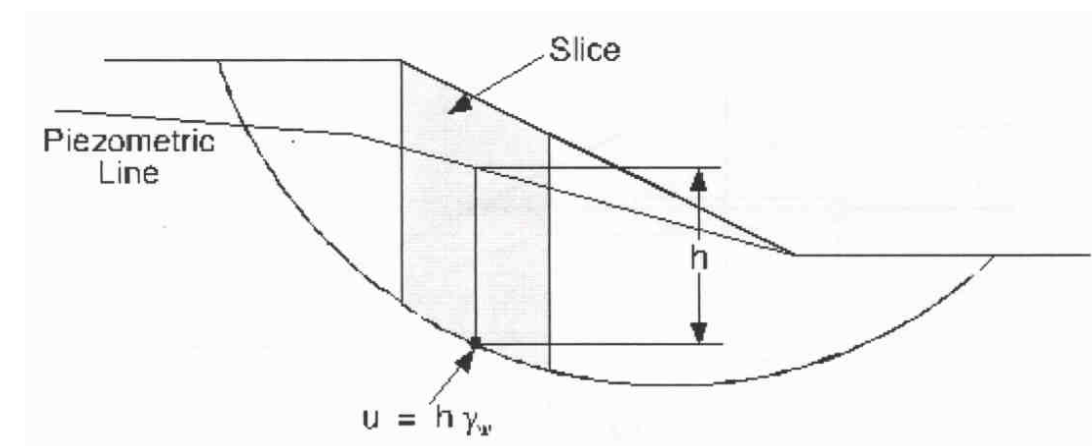
Current Settings

File Name	Babis_final_kor14,67degrees.gsz	Copy
Last Saved Date	5/3/2010	
Last Saved Time	13:26:10	
Analysis Method	Bishop (with Ordinary & Janbu)	Print...
Direction of Slip Movement	Right to Left	
Slip Surface Option	Grid of Centers and Radius Tangent	
P.W.P. Option	Piezometric Lines / Ru	
Tension Crack Option	(none)	
Seismic Coefficient	(none)	

OK Cancel

Σχήμα 5.8
Analysis settings menu.

Η πίεση νερού των πόρων καθορίστηκε με χρήση ισοκαμπύλης r_u .



Σχήμα 5.9

(Slope/w for slope stability analysis version 5, user's guide).

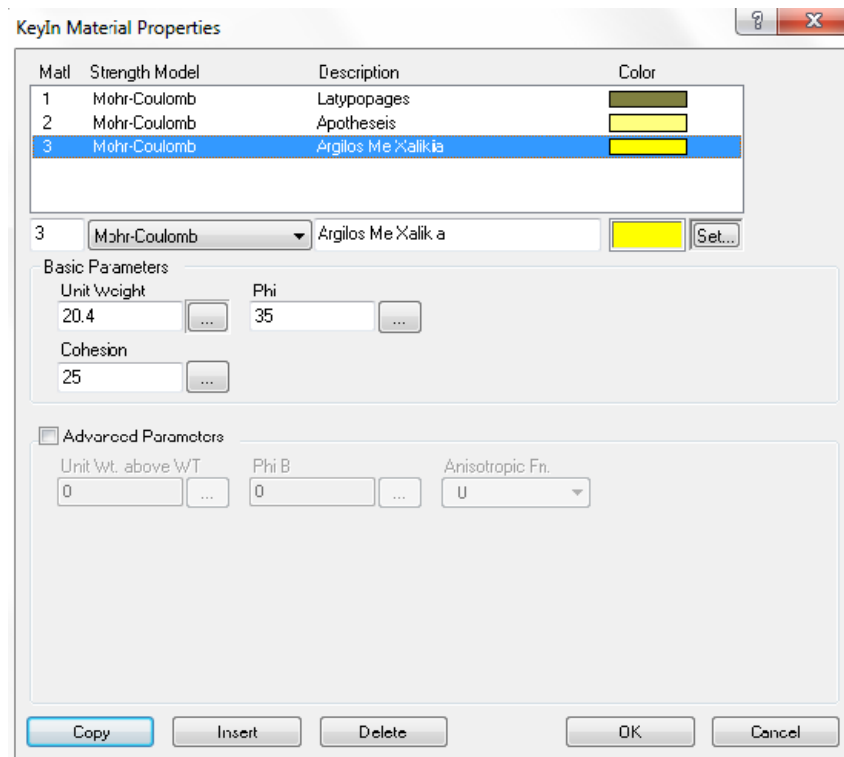
Όταν χρησιμοποιείται μία πιεζομετρική γραμμή, η πίεση του νερού των πόρων στο μέσο της βάσης της λωρίδας, υπολογίζεται ως το ολικό ύψος του νερού πάνω από το μέσο της βάσης της λωρίδας επί το μοναδιαίο βάρος του νερού (Σχήμα 5.9). Θεωρητικά αυτό είναι αληθές όταν η πιεζομετρική γραμμή είναι οριζόντια, αντιπροσωπεύοντας μια υδροστατική συνθήκη, ή όταν η πιεζομετρική γραμμή αντιπροσωπεύει την πραγματική κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια ολίσθησης. Στην περίπτωση της πιεζομετρικής γραμμής του πρανούς, ο υπολογισμός της πίεσης του νερού των πόρων στο κέντρο βάσης θα πρέπει να διορθωθεί για απώλεια φορτίου ή απώλεια διήθησης εξαιτίας του ρέοντος ύδατος. Με άλλα λόγια, η πιεζομετρική γραμμή πρέπει να θεωρηθεί ως υδροφόρος ορίζοντας και η πίεση του νερού των πόρων υπολογίζεται με βάση την ισοδυναμική γραμμή που διέρχεται από το μέσο της βάσης της λωρίδας (Slope/w, 2002).

Μια κύρια μέθοδος παρουσίασης δεδομένων πίεσης πόρων, είναι μέσω της χρήσης του λόγου πίεσης πόρων R_u . Θεωρώντας οποιοδήποτε σημείο στο πρανές, ο λόγος πίεσης πόρων R_u υπολογίζεται από το λόγο της πίεσης πόρων σε εκείνο το σημείο σε σχέση με την κατακόρυφη ολική τάση που υπολογίζεται με βάση το βάθος του σημείου κάτω από το εδάφος (Bromhead, 1986):

$$R_u = \frac{u}{\gamma_z} \quad [5.7]$$

5.2.3 Σχεδιασμός απόθεσης

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αφγάλειας, ορίστηκε η πιεζομετρική γραμμή πίεσης νερού των πόρων και με την εντολή KeyIn, Material Properties (Σχήμα 5.10),

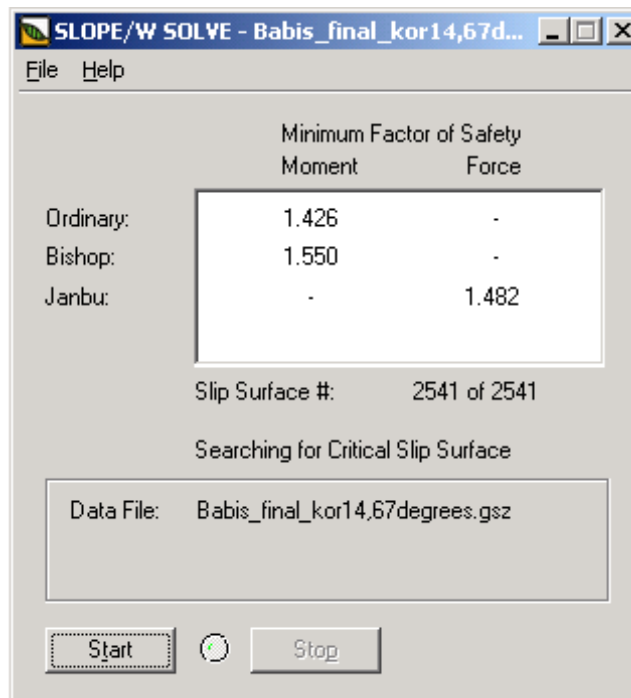


Σχήμα 5.10
Material properties menu.

ορίστηκαν τα διαφορετικά στρώματα που υπάρχουν και οι παράμετροί τους όπως το μοναδιαίο βάρος, η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής. Τέλος ορίστηκε ο κένναβος του κέντρου των ακτινών ολίσθησης και το εύρος μεταβολής των ακτινών (Grid και Radius) έτσι ώστε να εντοπιστεί η επιφάνεια ολίσθησης με το μικρότερο δυνατό συντελεστή ασφάλειας.

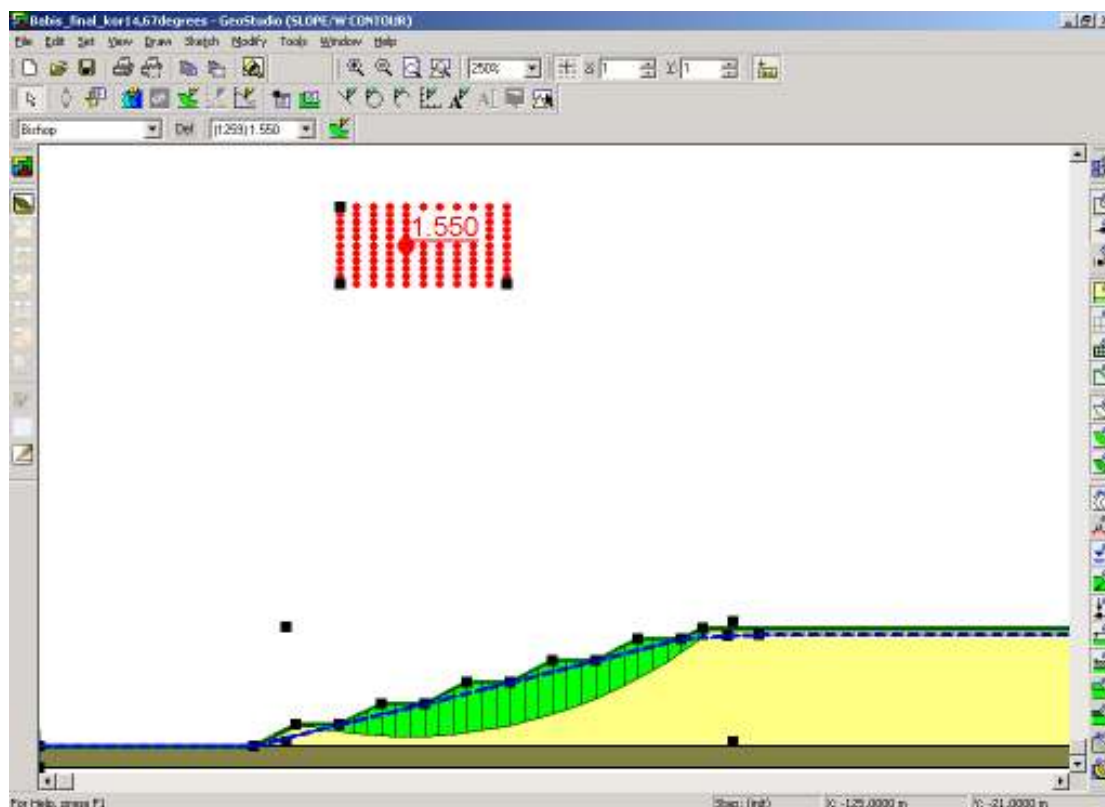
5.2.4 Υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας

Με το σχεδιασμό της πιεζομετρικής γραμμής (πίεσης νερού των πόρων), ορίστηκαν οι παράμετροι των εδαφών και τοποθετήθηκε ο κένναβος των κέντρων και οι ακτίνες των κυκλικών τομών. Ακολούθως πραγματοποιείται η επίλυση με την εντολή Solve. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφάλειας της απόθεσης (Σχήμα 5.11) και με την εντολή Contour παρουσιάστηκε η επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.11

Συντελεστές ασφάλειας κορεσμένου εδάφους.



Σχήμα 5.12

Επιφάνεια ολίσθησης με τη μέθοδο Bishop σε πρανές ύψους 110m με μέση κλίση 14,7° και συντελεστή ασφάλειας 1.55.

5.3 Παραμετρική ανάλυση

Μετά το σχεδιασμό της απόθεσης θεωρήθηκε χρήσιμο να διερευνηθεί η ευστάθεια, αντικαθιστώντας το πρώτο και δεύτερο στρώμα της απόθεσης με πιο χονδρόκοκκα υλικά. Τα αποτελέσματα για το κορεσμένο εδαφικό υλικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

5.4 Παρατηρήσεις

Με τη προσθήκη χονδρόκοκκων στη βάση της απόθεσης, γίνεται πιο ρηχή η επισφαλής επιφάνεια (μικραίνει η διάμετρος του κύκλου) και αυξάνεται οριακά ο συντελεστής ασφάλειας.

Πίνακας 5.1: Γεωτεχνικές παράμετροι κορεσμένων εδαφικών υλικών και συντελεστές ασφάλειας απόθεσης.

Αρχικός σχεδιασμός			Σενάριο 1 (πάχος στρώματος αργίλου - χαλίκων 20m)			Σενάριο 2 (πάχος στρώματος αδρομερών 20m)		
	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Άργιλος με χαλίκια	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Αδρομερή
Μον. βάρος above/below water pressure (kN/m ³)	19.5	20/18	19.5	20/18	22.4/20.4	19.5	20/18	20.5/18.5
c(kPa)	10	7.7	10	7.7	25	10	7.7	30
φ(°)	30	31.5	30	31.5	35	30	31.5	30
Μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας	Συντελεστές ασφάλειας							
Bishop	1.55		1.62			1.59		

Σενάριο 3 (πάχος στρώματος αργίλου - χαλίκων 40m)			
	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Άργιλος με χαλίκια
Μον. βάρος above/below water pressure (kN/m ³)	19.5	20/18	22.4/20.4
c(kPa)	10	7.7	25
φ(°)	30	31.5	35
Μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας	Συντελεστές ασφάλειας		
Bishop	1.72		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

6.1 Γενικά

Το μέγεθος μιας καθίζησης που προκύπτει με την συμπίεση του εδάφους περιλαμβάνει: α) την άμεση καθίζηση λόγω ελαστικής παραμόρφωσης του εδαφικού σχηματισμού, β) την καθίζηση λόγω μεταβολής του όγκου του η οποία προκαλείται με την αποβολή του περιεχομένου νερού (φαινόμενο στερεοποίησης) και γ) την καθίζηση λόγω δευτερεύουσας συμπίεσης.

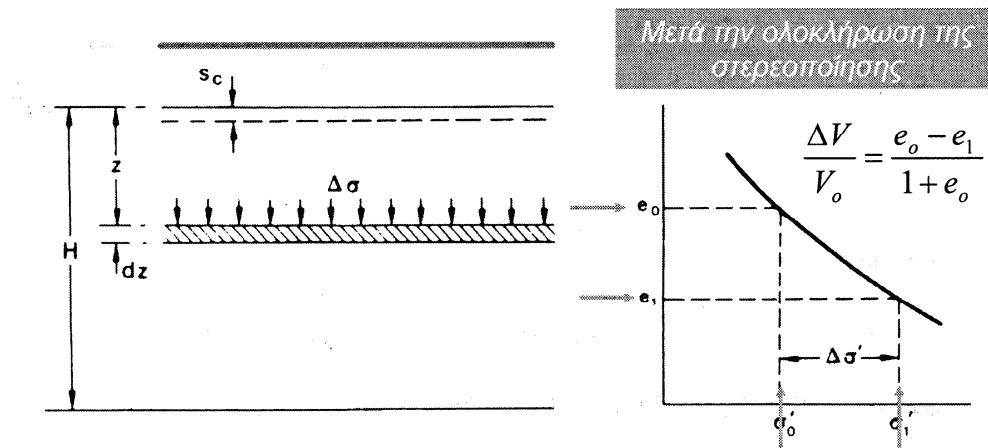
Η άμεση καθίζηση οφείλεται στην ελαστική παραμόρφωση του εδάφους λόγω της επιβολής ενός φορτίου στην επιφάνεια του και εξαρτάται από τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη μάζα του. Το σχετικό μέγεθος της άμεσης καθίζησης είναι μικρό (σε σχέση με το φαινόμενο της στερεοποίησης) και πολλές φορές δεν έχει πρακτική αξία. Μόνο στις περιπτώσεις που μεγάλο μέρος του φορτίου είναι κινητό ή όταν ο χρόνος παραμονής του φορτίου είναι μικρός (περιπτώσεις δεξαμενών και σιλό), τότε το μέγεθος της άμεσης καθίζησης αποκτά μεγαλύτερη σημασία (Στειακάκης, 2008 από Τσότσος, 1991).

Η καθίζηση εξαιτίας μεταβολής όγκου συνδυάζεται με την απομάκρυνση του νερού των εδαφικών πόρων (στερεοποίηση). Εξελίσσεται βαθμιαία, με την απομάκρυνση του νερού και η φόρτιση σταδιακά μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στον εδαφικό σκελετό. Το φαινόμενο συνεχίζεται μέχρι εξίσωσης της πίεσης των πόρων με τις εξωτερικές υδραυλικές συνθήκες και στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών ο απαιτούμενος χρόνος είναι μεγάλος.

Μετά το τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης, εμφανίζεται και μια καθίζηση λόγω της δευτερεύουσας συμπίεσης, η οποία εξελίσσεται συναρτήσει του χρόνου χωρίς μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων. Εκδηλώνεται με μηχανισμό σύνθετο, διαφορετικό κατά περίπτωση και δεν ενδιαφέρει στα συνήθη προβλήματα σχεδιασμού.

Αν θεωρηθεί ένα κορεσμένο εδαφικό στρώμα πάχους (H) και μια κατασκευή στην επιφάνεια του (Σχ. 6.1), η κατακόρυφη τάση σε λεπτό στρώμα πάχους dz σε βάθος z , αυξάνει εξαιτίας αυτής της φόρτισης κατά $\Delta\sigma$, (Craig, 1984). Επιπλέον, αν θεωρηθεί ότι δεν εκδηλώνεται πλευρική παραμόρφωση μέσα στο συγκεκριμένο στρώμα, με την ολοκλήρωση της στερεοποίησης θα έχει προκληθεί αύξηση της ενεργής κατακόρυφης

τάσης κατά $\Delta\sigma'$ ίση με την επιβαλλόμενη τάση από την κατασκευή. Η μεταβολή αυτή αντιστοιχεί σε μια αύξηση της ενεργής τάσης από σ_0' σε σ_1' και σε μια μείωση του λόγου κενών από e_0 σε e_1 όπως φαίνεται στο διάγραμμα $e-\sigma'$ (Σχ. 6.1).



Σχήμα 6.1
Καθίζηση λόγω στερεοποίησης
(Craig, 1984).

Λόγω του πλευρικού περιορισμού, η μείωση του όγκου ανά μονάδα όγκου είναι ίση με την μείωση του πάχους ανά μονάδα πάχους και κατά συνέπεια η καθίζηση του εδαφικού στρώματος με πάχος dz δίδεται από τη σχέση:

$$ds_c = m_v * \Delta\sigma' * dz \quad [6.1]$$

Η καθίζηση όλου του στρώματος με πάχος H , θεωρώντας ότι m_v και $\Delta\sigma'$ είναι σταθερά με το βάθος, δίνεται από τον τύπο:

$$s_c = m_v * \Delta\sigma' * H \quad [6.2]$$

όπου: m_v = ο συντελεστής μείωσης όγκου σε m^2/MN

$\Delta\sigma'$ = η μεταβολή της τάσης μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης σε kPa

H = το αρχικό ύψος του δοκιμίου μείον την υποχώρηση ανά στάδιο φόρτισης σε mm (Στειακάκης, 2008).

6.1.1 Άμεση Καθίζηση

Η άμεση καθίζηση δηλαδή η άμεση κατακόρυφη υποχώρηση (s_i) του εδάφους στα σημεία επαφής του με την επιφάνεια φόρτισης (βάθος $z=0$), είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με βάση την ελαστική θεωρία.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών η καθίζηση (s_i) προσδιορίζεται από τη σχέση

$$s_i = \frac{qB(1-\nu^2)}{E} I_s \quad [6.3]$$

όπου: q η ομοιόμορφη πίεση επαφής της επιφάνειας φόρτισης στο έδαφος,
 B το πλάτος (η μικρότερη διάσταση) της επιφάνειας φόρτισης,
 E το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους,
 ν ο λόγος Poisson,
 I_s συντελεστής εξαρτώμενος από γεωμετρικά στοιχεία και την ακαμψία της επιφάνειας φόρτισης

Στα κορεσμένα μη συνεκτικά εδάφη, ταυτόχρονα με την άμεση καθίζηση εμφανίζεται και η καθίζηση λόγω στερεοποίησης η οποία είναι γενικά μικρή, αντιστρόφως ανάλογη με τη σχετική πυκνότητα του εδάφους.

Στα συνεκτικά εδάφη η άμεση καθίζηση μπορεί να θεωρηθεί ως ελαστική και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 6.3, με την υπόθεση όμως ότι η παραμόρφωση του εδάφους δεν συνδυάζεται με μεταβολή του όγκου του, αντιστοιχεί δηλαδή σε αστράγγιστες συνθήκες. Ως μέτρο ελαστικότητας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αστράγγιστο μέτρο E_u το οποίο προκύπτει από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στράγγιση και ως λόγος Poisson η τιμή $\nu=0.5$ (Στειακάκης, 2008).

6.1.2 Καθίζηση λόγω στερεοποίησης

Όπως είναι φυσικό, τα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη (σε αντίθεση με τα μη συνεκτικά), δεν παρουσιάζουν άμεση απόκριση στην επιβολή εξωτερικών φορτίων αλλά παραμορφώνονται ανάλογα με το ρυθμό στερεοποίησης τους, για αρκετό χρόνο μετά την επιβολή του φορτίου (Στειακάκης, 2008).

Η καθίζηση στρώματος πάχους (H) και θεωρώντας ότι το m_v και $\Delta\sigma'$ είναι σταθερά με το βάθος, η καθίζηση (λόγω στερεοποίησης) του εδαφικού στρώματος δίδεται από την εξίσωση:

$$S_c = m_v \cdot \Delta\sigma' \cdot H \quad [6.4]$$

όπου: m_v ο συντελεστής μείωσης όγκου σε m^2/MN

$\Delta\sigma'$ η μεταβολή της ενεργής τάσης σε kPa

H το πάχος του στρώματος σε mm

6.2 Εκτίμηση των αναμενόμενων καθιζήσεων στην απόθεση

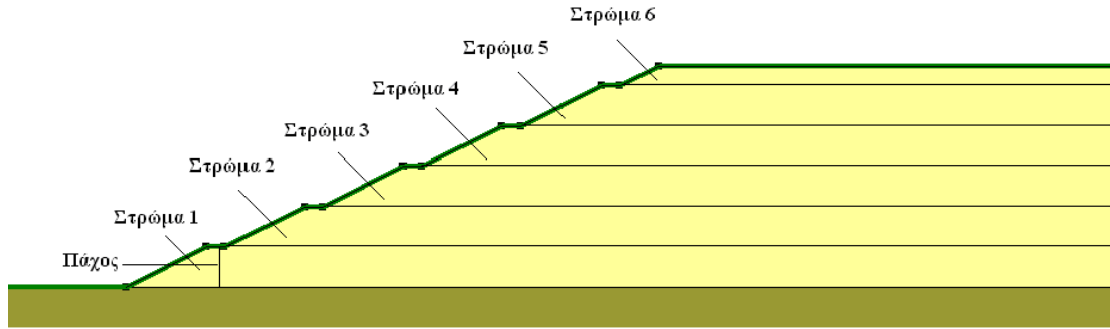
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού των καθιζήσεων στην αναμενόμενη απόθεση.

6.2.1 Καθίζηση με βάση ελαστική θεωρία

Ο υπολογισμός των καθιζήσεων έχει προφανώς άμεση σχέση με το σχεδιασμό της απόθεσης. Για τα στρώματα που έχουν σχεδιαστεί ισχύουν τα εξής (βλέπε σχήμα 6.2):

Πίνακας 6.1: Γεωμετρικά στοιχεία των στρωμάτων της απόθεσης.

<i>Περιγραφή</i>	<i>Πάχος (m)</i>	<i>Πλάτος B στρώματος (m)</i>
<i>Στρώμα 6</i>	<i>10</i>	<i>1410</i>
<i>Στρώμα 5</i>	<i>20</i>	<i>1508</i>
<i>Στρώμα 4</i>	<i>20</i>	<i>1606</i>
<i>Στρώμα 3</i>	<i>20</i>	<i>1704</i>
<i>Στρώμα 2</i>	<i>20</i>	<i>1802</i>
<i>Στρώμα 1</i>	<i>20</i>	<i>1900</i>



Σχήμα 6.2
Απόθεση άγονων υλικών σε στρώσεις.

Η ολική τάση σ_v που ασκείται από κάθε στρώμα στο υποκείμενό του υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_v = \gamma * z \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad [6.5]$$

όπου z το πάχος του εκάστοτε στρώματος σε m και γ το μοναδιαίο βάρος του υλικού της απόθεσης σε kN/m^3 .

Με βάση το μέγεθος αυτό θα γίνει η εκτίμηση του φορτίου που ασκεί κάθε στρώμα σε βάθος και υπολογισμός της προκαλούμενης παραμόρφωσης στα υπόλοιπα στρώματα. Η διαδικασία θα ακολουθηθεί για όλα τα στρώματα και θα υπολογισθεί η συνολική άμεση καθίζηση λόγω ελαστικής συμπεριφοράς.

Ως μέτρο “ελαστικότητας” E , θεωρείται η μέση τιμή των τιμών E_s που προέκυψε από τα στάδια της φόρτισης της δοκιμής συμπίεστότητας.

Πίνακας 6.2: Πάχος στρώματος, βάθος επίδρασης και μέση σημειακή μεταβολή από τη φόρτιση των επιμέρους στρωμάτων.

Στρώματα	Πάχος d (m)	Βάθος στο οποίο εκτιμάται η επίδραση των υπερκείμενων στρωμάτων* (m)	Μέση σημειακή μεταβολή σ_z (kN/m ²)
Στρώμα 6	10	-	-
Στρώμα 5	20	5	81.90
Στρώμα 4	20	25	81.90
Στρώμα 3	20	45	81.89
Στρώμα 2	20	65	81.87
Στρώμα 1	20	85	81.84

* στο μέσο του κάθε υποκείμενου στρώματος

Το στρώμα 6 που είναι το ανώτερο στρώμα, επηρεάζει όλα τα άλλα. Το βάθος επίδρασης της φόρτισής του υπολογίζεται στο μέσο των υποκείμενων στρωμάτων (Βλέπε σχήμα 6.3).

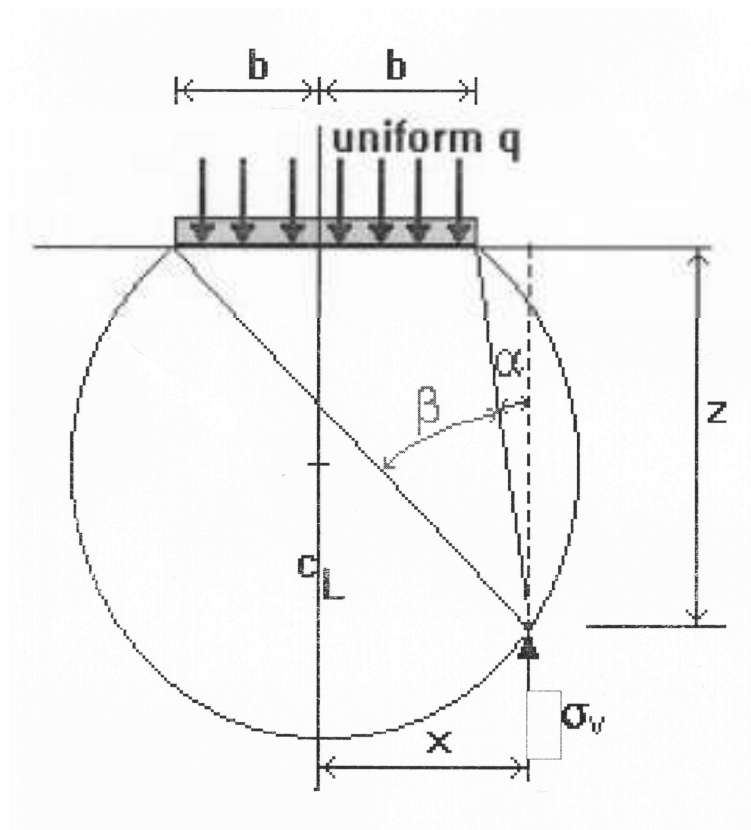
Η μέση σημειακή μεταβολή σ_z υπολογίζεται:

$$\sigma_z = \sigma_v' \frac{a + \sin \alpha * \cos(\alpha + 2\beta)}{\pi} \quad [6.6]$$

όπου: σ_v' = η ενεργή τάση που ασκείται από το υπερκείμενο στρώμα στο επίπεδο έδρασης του σε kPa

Η γωνία β του κάθε στρώματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta = -\tan^{-1} \left(\left(\frac{B}{2} \right) / \text{βάθος επίδρασης} \right) \quad [6.7]$$



Σχήμα 6.3

Κατακόρυφη τάση που προκαλείται από φόρτιση λωρίδας στην επιφάνεια (Στειακάκης, 2008).

όπου: η γωνία β σε rad

B = πλάτος στρώματος

Η γωνία α προκύπτει ως εξής:

$$\alpha = -2\beta \text{ (σε rad)} \quad [6.8]$$

Η άμεση καθίζηση που προκαλείται από το κάθε στρώμα στα υπόλοιπα προκύπτει ως εξής:

$$S_c = \frac{\sigma_z * d}{E} \quad [6.9]$$

όπου: S_c = η καθίζηση που προκαλεί το κάθε στρώμα στα υποκείμενα (σε m)

σ_z = η μέση σημειακή μεταβολή σε kPa

d = το πάχος του εκάστοτε στρώματος σε m

E = το μέτρο ελαστικότητας σε kPa

Προσθέτοντας τις καθιζήσεις που προκαλεί το κάθε στρώμα στα υποκείμενα του βρίσκουμε την συνολική καθίζηση που προκαλεί η απόθεσή του. Η ανωτέρω διαδικασία ακολουθείται για όλα τα στρώματα και προσθέτοντας τις επιμέρους καθιζήσεις, προκύπτει η συνολική άμεση καθίζηση στην απόθεση.

Η ανωτέρω διαδικασία εφαρμόστηκε για το υλικό με φυσική υγρασία και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα καθίζησης με βάση την ελαστική θεωρία για μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑ ΣΤΟΝ ΑΡΜΟ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ ΤΟΥ									
Στρώμα	Περιγραφή	Πάχος (m)	Πλάτος Β στρώματος (m)	Βάθος πιεζομετρικής επιφάνειας (m)	Μον. Βάρος kN/m ³	σ _c (kN/m ²)	u (kN/m ²)	Τάση σ _c που ασκείται από το επιμέρους στρώμα στο επίπεδο ιδράσεως του	Μέσο Ε kN/m ²
6	Στρώμα 6	10	1410	-	18	180	98,10	81,90	5,027
5	Στρώμα 5	20	1508	-	18	360,00	196,20	163,80	
4	Στρώμα 4	20	1606	-	18	360,00	196,20	163,80	
3	Στρώμα 3	20	1704	-	18	360,00	196,20	163,80	
2	Στρώμα 2	20	1802	-	18	360,00	196,20	163,80	
1	Στρώμα 1	20	1900	-	18	360,00	196,20	163,80	
	Σύνολο	110							
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΟΥ ΔΕΚΕΙ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ									
ΣΤΡΩΜΑ 6	ΠΑΛΤΟΣ Β=	1410	m						
Τάση σ _c που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ _c (kN/m ²)	(σ _c *d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (kN/m ²)	Καθίζηση στρώματος (m)
81,90	Στρώμα 5	20	5	3,13	-1,56	81,90	1638,00	5,027	0,326
	Στρώμα 4	20	25	3,07	-1,54	81,90	1637,97	5,027	0,326
	Στρώμα 3	20	45	3,01	-1,51	81,89	1637,82	5,027	0,326
	Στρώμα 2	20	65	2,96	-1,48	81,87	1637,46	5,027	0,326
	Στρώμα 1	20	85	2,90	-1,45	81,84	1636,80	5,027	0,326
								Σύνολο	1,629
ΣΤΡΩΜΑ 5	ΠΑΛΤΟΣ Β=	1508	m						
Τάση σ _c που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ _c (kN/m ²)	(σ _c *d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (kN/m ²)	Καθίζηση στρώματος (m)
163,80	Στρώμα 4	20	10	3,12	-1,56	163,80	3276,00	5,027	0,652
	Στρώμα 3	20	30	3,06	-1,53	163,80	3275,91	5,027	0,652
	Στρώμα 2	20	50	3,01	-1,50	163,78	3275,60	5,027	0,652
	Στρώμα 1	20	70	2,96	-1,48	163,74	3274,90	5,027	0,651
								Σύνολο	2,606
ΣΤΡΩΜΑ 4	ΠΑΛΤΟΣ Β=	1606	m						
Τάση σ _c που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ _c (kN/m ²)	(σ _c *d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (kN/m ²)	Καθίζηση στρώματος (m)
163,80	Στρώμα 3	20	10	3,12	-1,56	163,80	3276,00	5,027	0,652
	Στρώμα 2	20	30	3,07	-1,53	163,80	3275,93	5,027	0,652
	Στρώμα 1	20	50	3,02	-1,51	163,78	3275,67	5,027	0,652
								Σύνολο	1,955
ΣΤΡΩΜΑ 3	ΠΑΛΤΟΣ Β=	1704	m						
Τάση σ _c που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ _c (kN/m ²)	(σ _c *d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (kN/m ²)	Καθίζηση στρώματος (m)
163,80	Στρώμα 2	20	10	3,12	-1,56	163,80	3276,00	5,027	0,652
	Στρώμα 1	20	30	3,07	-1,54	163,80	3275,94	5,027	0,652
								Σύνολο	1,303
ΣΤΡΩΜΑ 2	ΠΑΛΤΟΣ Β=	1802	m						
Τάση σ _c που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ _c (kN/m ²)	(σ _c *d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (kN/m ²)	Καθίζηση στρώματος (m)
163,80	Στρώμα 1	20	10	3,12	-1,56	163,80	3276,00	5,027	0,652
								Σύνολο	0,652
Καθίζηση που εκδηλώνεται για όλα τα στάδια της εκσκαφής :				8,15	(m)				
* στο μέσο του κάθε στρώματος:									

6.2.2 Καθίζηση λόγω στερεοποίησης

Για τον υπολογισμό της καθίζησης λόγω στερεοποίησης, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής μείωσης του όγκου m_v (m^2/MN) που προέκυψε από τα διάφορα στάδια φόρτισης κατά τη στερεοποίηση. Οι εκτιμήσεις της καθίζησης, αναμένεται να διαφέρουν σε κάποιο βαθμό από την πραγματικότητα δεδομένου ότι το υλικό στο εργαστήριο αναζυμώθηκε και ακολουθήθηκε μια διαδικασία η οποία σε σχέση με την πραγματική απόθεση των στερίων, διαφέρει αισθητά, καθότι η απόθεση των στερίων γίνεται με μεγάλους όγκους υλικού. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε τιμή του συντελεστή μείωσης όγκου που να προσεγγίζει την πραγματικότητα και η οποία είναι εντός των τιμών που προέκυψαν από τα στάδια φόρτισης της στερεοποίησης.

Η μεταβολή της ενεργής κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma'$ στο μέσον του κάθε στρώματος εξαιτίας της φόρτισης από το υπερκείμενο φορτίο εκτιμήθηκε από την εξίσωση:

$$\Delta\sigma' = (\gamma_{sat} * H) - u \quad [6.10]$$

όπου: $\Delta\sigma'$ = η μεταβολή της ενεργής κατακόρυφης τάσης σε kPa

γ_{sat} = το κορεσμένο μοναδιαίο βάρος του γεωυλικού σε kN/m^3

H = το πάχος στο μέσον του κάθε στρώματος σε m

u = η πίεση του νερού των πόρων

Η καθίζηση με βάση την στερεοποίηση εκτιμήθηκε από τον τύπο:

$$S_c = \Delta\sigma' * m_v * H \quad [6.11]$$

όπου: S_c = η καθίζηση με βάση την στερεοποίηση σε mm

$\Delta\sigma'$ = η μεταβολή της ενεργής κατακόρυφης τάσης σε kPa

m_v = ο συντελεστής μείωσης του όγκου σε m^2/MN

H = το πάχος του στρώματος σε m

Οι εκτιμήσεις της καθίζησης λόγω στερεοποίησης για κορεσμένο υλικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα καθίζησης με βάση τη στερεοποίηση για κορεσμένο εδαφικό υλικό.

$m_v(m^2/MN)$	0.15	
$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20	
$\gamma_w(kN/m^3)$	9.81	
H(m)	20	
Layer	$\Delta\sigma'(kN/m^2)$	$\Delta\sigma' = (\gamma_{sat} * H) - u$ (στο μέσο του κάθε στρώματος)
6	50,9	
5	203,8	
4	560,4	
3	1120,9	
2	1885,1	
1	2853,2	
Layer	$S_c(mm)$	$S_c = \Delta\sigma' * m_v * H$
6	76	
5	611	
4	1681	
3	3363	
2	5655	
1	8560	
Total(m)	19,95	

6.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με βάση την ελαστική θεωρία, θεωρώντας μη κορεσμένο το υλικό της απόθεσης, το μέγεθος της αναμενόμενης καθίζησης εκτιμάται σε 8,15m. Με βάση την στερεοποίηση για κορεσμένο υλικό απόθεσης, η καθίζηση εκτιμάται σε 19,95m.

Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε καθίζηση της τάξης του 7.5-18% περίπου του συνολικού ύψους της απόθεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απόθεση που μελετήθηκε έχει συνολικό ύψος 110m σε 5 βαθμίδες των 20m και 1 βαθμίδα των 10m και θεωρήθηκε ότι εκτείνεται σε μήκος 1900m. Στο υπόβαθρο θεωρήθηκε το λατυποπαγές της περιοχής του ΛΚΔΜ, ενώ η μάζα της απόθεσης (στείρα υλικά) χαρακτηρίζεται σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα ταξινόμησης USCS σαν ανόργανοι ιλείς υψηλής πλαστικότητας.

Ο συντελεστής ασφάλειας για μέση κλίση των πρανών της απόθεσης $22,54^{\circ}$ (1/2.4), εκτιμήθηκε με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop ίσος με 1,63 στην περίπτωση που τα υλικά είναι ακόρεστα (με την φυσική τους υγρασία).

Ο συντελεστής ασφάλειας μειώνεται όταν τα υλικά της απόθεσης θεωρηθούν πλήρως κορεσμένα σε 1,55.

Η αναμενόμενη καθίζηση εκτιμήθηκε με βάση την ελαστική θεωρία για μή κορεσμένα υλικά σε 8.15m, ενώ η καθίζηση που υπολογίστηκε λόγω στερεοποίησης (θεωρώντας συνθήκες πλήρους κορεσμού των υλικών) είναι 9.25m.

Τα αποτελέσματα αυτά θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την εκτίμηση της αναμενόμενης κινητικότητας στις αποθέσεις των στείων υλικών στο ΛΚΔΜ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καλογήρου Ε., (2000). Εργαστηριακή Εκτίμηση της Παραμορφωσιμότητας Εδαφών και υπολογισμός της Αναθόλωσης του Δαπέδου της Εκσκαφής του Τομέα 6 (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας), Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Καράς Β., Ευστάθεια Πρανών στα Υπαίθρια Λιγνιτωρυχεία.
3. Καράς Β., Λεονάρδος Μ., (1993). Μελέτη Ευστάθειας Πρανών Εξωτερικής Απόθεσης Ορυχείου Νοτίου Πεδίου/ΛΚΠΑ, Τομέας εδαφομηχανικών και Υδρογεωλογικών Μελετών, Αθήνα Ιούνιος 1993, Δ.Ε.Η.
4. Καράς Β., Πρακτικά 1^{ου} Πανελ. Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα 3-5 Φεβρουαρίου 1988, ΤΕΕ, ΕΕΕΕΘ.
5. Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων.
6. Λεονάρδος Μ., (2006). Εισαγωγή στην Ευστάθεια των Αποθέσεων της Μεταλλευτικής και Μεταλλουργικής Βιομηχανίας, Ορυκτός Πλούτος Νο 139.
7. Ρούμπος Χ., (2008). Σημειώσεις Σχεδιασμού Επιφανειακών Εκμεταλλεύσεων.
8. Σαχαρίδης Ν., (2002). Βελτιστοποίηση του Ισοζυγίου Αποθέσεως Αγόνων Συστήματος Κυρίου Πεδίου (Μαυροπηγή-Κόμανος-Β.Πεδίο) και Τομέα 6, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. Στειακάκης Ε., (2008). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
10. Στειακάκης Ε., (2008). Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
11. Στειακάκης Ε., (2003). Συμπεριφορά Ανοικτών Εκσκαφών Μεγάλου Βάθους, Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητας Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
12. ASTM (1990). Annual book of ASTM standards V. 4.08. ASTM Publication.
13. Bowles, E., (1988). Engineering properties of soils and their measurement. Third edition.
14. Bromhead., (1986). The Stability Of Slopes, Surrey University Press, New York, U.S.A.
15. Craig, R.F., (1983). Soil Mechanics. Published by Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd, England.
16. Durst, W., Vogt, W., (1988). Series on mining Engineering Vol. 7.

17. Slope/w for slope stability analysis version 5, user's guide (2002).
18. www.dei.gr/Default.aspx?id=898&nt=18&lang=1
19. www.dei.gr/Default.aspx?id=899&nt=18&lang=1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	
ΕΡΓΟ	
Δείγμα	Γ1
Ημερομηνία	
Βάρος Δείγματος (g)	149,00

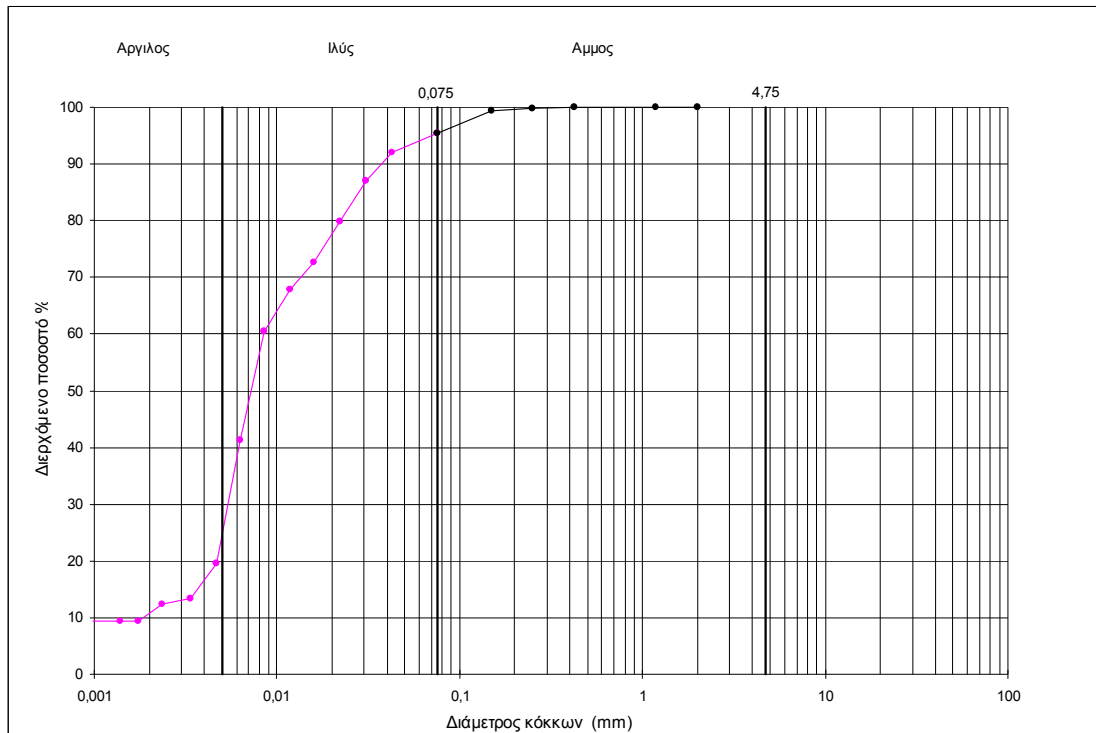
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος κοσκίνου mm	Βάρος καθαρού κοσκίνου g	Βάρος κοσκίνου με συγκρατούμενο δείγμα g
10	2	428,8	428,84
16	1,18	406,1	406,13
40	0,425	350,7	350,71
60	0,25	321,61	321,7
100	0,15	318,81	319,63
200	0,075	298,83	304,56
Συλλέκτης		440	582,07

Συγκρατούμενο δείγμα g	Συγκρατούμενο ποσοστό %	Διερχόμενο ποσοστό %
0	0,00	100,00
0,01	0,01	99,99
0,05	0,03	99,96
0,09	0,06	99,90
0,82	0,55	99,35
5,73	3,85	95,50
142,07	95,35	
148,77	99,85	(Αθροισμα)

Ανάλυση μεγέθους κόκκων με την μέθοδο του υδρομέτρου (για διάμετρο κόκκων <200μm)

		Ανάλυση μεγέθους κόκκων με την μέθοδο του υδρομέτρου (για διάμετρο κόκκων <200μm)									
ΔΕΙΓΜΑ	Γ1	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΕΛΛΗΦΙΚΩΝ ΚΟΚΚΩΝ (γs)	2,55								
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ		ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΝΕΡΟΥ (γl) g/cm3	1								
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ		ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΗΝΙΣΚΟΥ (Cm)	0,5								
ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (Wd) gr	40,41	ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (Cd)	-7,92								
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΕΛΛΗΦΙΚΩΝ ΚΟΚΚΩΝ α = 1.65 ^{αγ/2.65^α} (γl-1)	1,024345709										
Χρόνος t (min)	Χρόνος t (sec)	Ανάγνωση υδρομέτρου R	Θερμοκρασία T°C	Ιξόδοξ (η) η= 1.81* 10 ⁻⁵ /(1+0.034*T+0.0002*T ²)	Διόρθωση θερμοκρασίας (Ct) Ct= -4.35 + 0.31T	Διορθωμένη ανάγνωση υδρομέτρου ως προς το μηνίσκο R' R'=R+Cm	Πλήρως διορθωμένη ανάγνωση υδρομέτρου R'' R''= R'+Ct+Cd	Βάθος βύθισης Hr	Διάμετρος κόκκων D=[(1800 ^α η ^α Hr)/(γl-γl) ^α t] ^{1/2}	Ποσοστό κόκκων εν αιώρηση % = (R'' ^α a/ Wd)*100	Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος (%)
0	0								0,075	100	95,50
1	60	43,0	21,9	9,83417E-06	2,44	43,50	38,02	9,49	0,04249751	96,37	92,040088
2	120	41,0	21,8	9,85706E-06	2,41	41,50	35,99	9,77	0,030534334	91,23	87,123246
4	240	38,0	21,8	9,85706E-06	2,41	38,50	32,99	10,20	0,022058812	83,62	79,860554
8	480	35,0	21,9	9,83417E-06	2,44	35,50	30,02	10,63	0,015903337	76,09	72,672911
15	900	33,0	21,9	9,83417E-06	2,44	33,50	28,02	10,92	0,011769032	71,02	67,831116
30	1800	30,0	21,9	9,83417E-06	2,44	30,50	25,02	11,34	0,008483584	63,42	60,568425
60	3600	22,0	22,0	9,81136E-06	2,47	22,50	17,05	12,49	0,006286116	43,22	41,276296
120	7200	13,0	22,0	9,81136E-06	2,47	13,50	8,05	13,77	0,004667977	20,41	19,488222
240	14400	10,5	22,0	9,81136E-06	2,47	11,00	5,55	14,13	0,003343244	14,07	13,435979
480	28800	10,0	22,1	9,78864E-06	2,50	10,50	5,08	14,20	0,002367247	12,88	12,300578
900	54000	9,0	21,4	9,94947E-06	2,28	9,50	3,86	14,34	0,001751675	9,79	9,3543465
1440	86400	9,0	21,4	9,94947E-06	2,28	9,50	3,86	14,34	0,00138482	9,79	9,3543465
2880	172800	9,0	21,4	9,94947E-06	2,28	9,50	3,86	14,34	0,000979216	9,79	9,3543465

Κοκκομετρική ανάλυση (κατά ASTM D422)



Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, το υλικό είναι ιλύς

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,0083}{0,0018} = 4,61$$

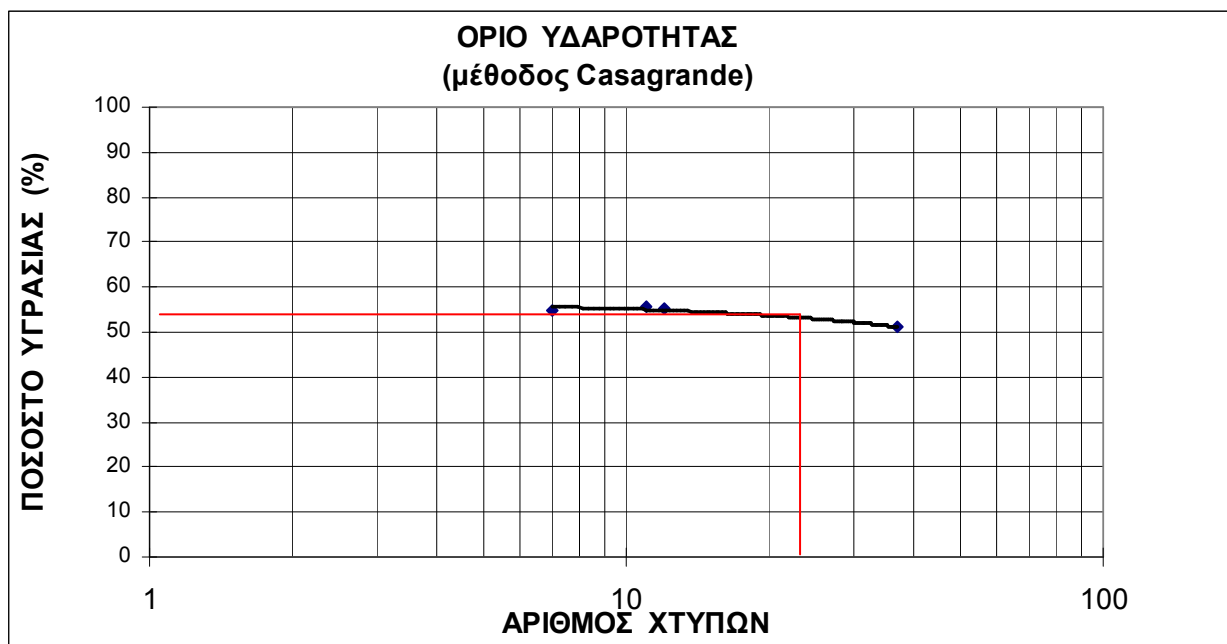
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΟΡΙΩΝ ATTERBERG

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ

Μέθοδος Casagrande

		Βάρος υποδοχέα	Βάρος υποδοχέα	Βάρος
Αριθμός δοκιμίου	Βάρος υποδοχέα	με δείγμα	με ξηρό δείγμα	υγρού δείγματος
Sample	Weight of container	Weight of container + sample	Weight of container + dry sample	Weight of wet sample
	(g)	(g)	(g)	(g)
1	46.72	68.68	60.86	21.96
2	40.96	59.48	52.87	18.52
3	46.51	63.68	57.6	17.17
4	47.91	66.17	60	18.26

Βάρος		Ποσοστό υγρασίας		
ξηρού δείγματος	Απώλεια υγρασίας	επί ξηρού δείγματος	Αριθμός χτύπων	Οριο υδαρότητας
Weight of dry sample	water	moisture content	Number of blows	liquid limit
(g)	(g)	(%)		LL
14.14	7.82	55.30	12	52.95
11.91	6.61	55.50	11	
11.09	6.08	54.82	7	
12.09	6.17	51.03	37	



ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Δείγμα Γ1

Αριθμός Δοκιμίου	Υποδοχέα (g)	Βάρος	
		Υποδοχέα και υγρό δείγμα (g)	Υποδοχέα και ξηρό δείγμα (g)
1	41.46	42.33	42.03
2	44.31	45.04	44.83
3	46.35	47.2	46.94

Απώλεια Υγρασίας (%)	Υγρασία επι ξηρού δείγματος (%)	Όριο Πλαστικότητας (PL)
0.3	52.63	45.69
0.21	40.38	
0.26	44.07	

Δείγμα	Όριο Υδαρότητας (LL)		Όριο Πλαστικότητας (PL)	Δείκτης πλαστικότητας
	Μέθοδος Casagrande	Μέθοδος Κώνου		
	52.9		45.7	7.3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Πίνακας Α1: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης για μή κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 160kg(1600N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	3600.00
Ύψος H_0 (mm)	22.64	Όγκος V_0 (cm ³)	81.50
Μάζα m (g)	101	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	12.16

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ	
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	40

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	160	kg
----------------------	-----	----

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.003	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	449.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	266.50	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	466.40	kPa

Πίνακας Α2: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης για μή κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 80kg(800N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	3600.00
Ύψος H_0 (mm)	22.17	Όγκος V_0 (cm ³)	79.81
Μάζα m (g)	96	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	11.80

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ	
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	40

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	80	kg
----------------------	----	----

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.003	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	231.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	177.64	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	247.90	kPa

Πίνακας Α3: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης για μή κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 40kg(400N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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

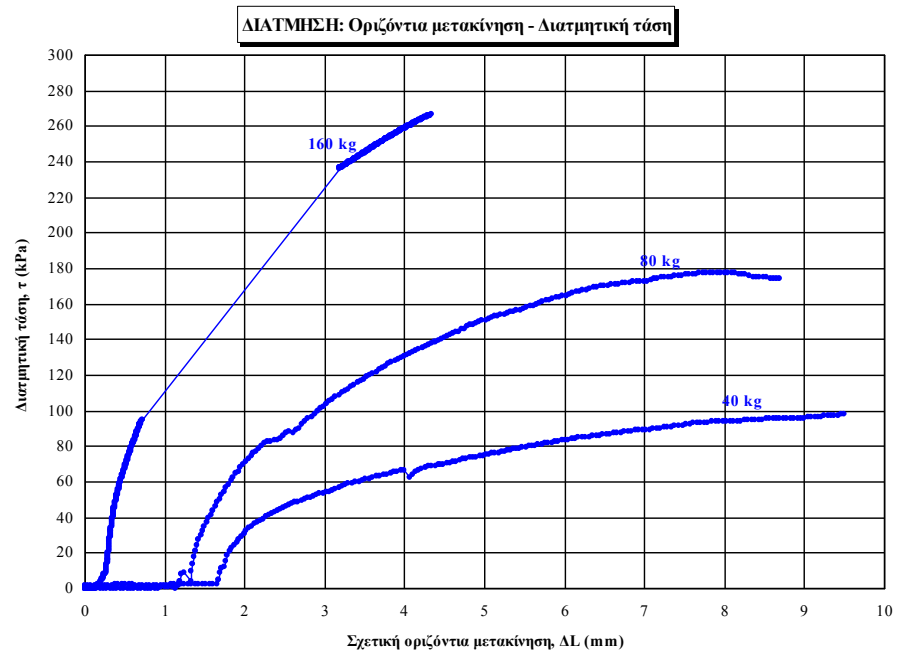
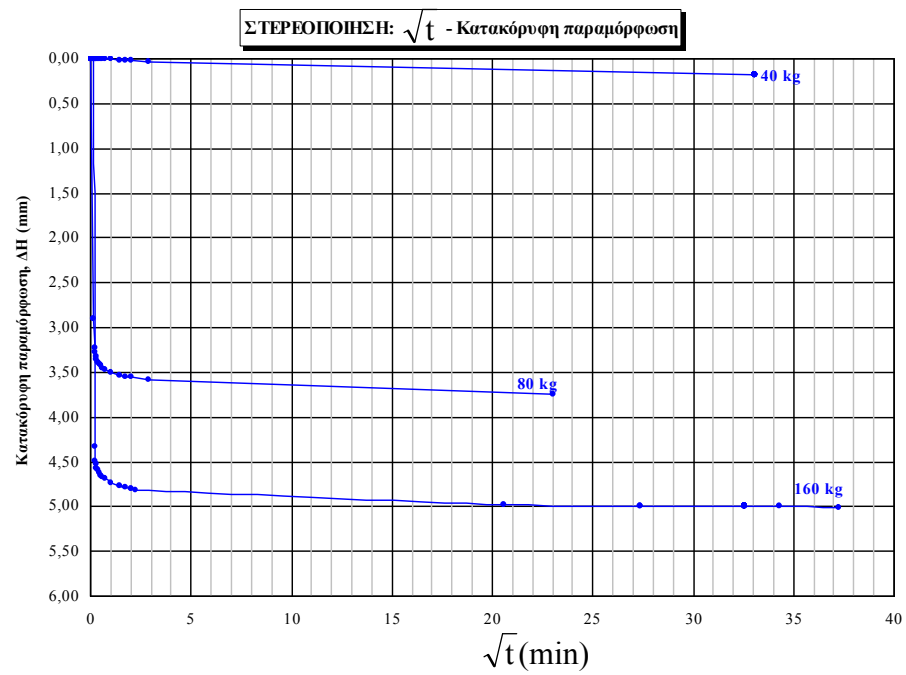
ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

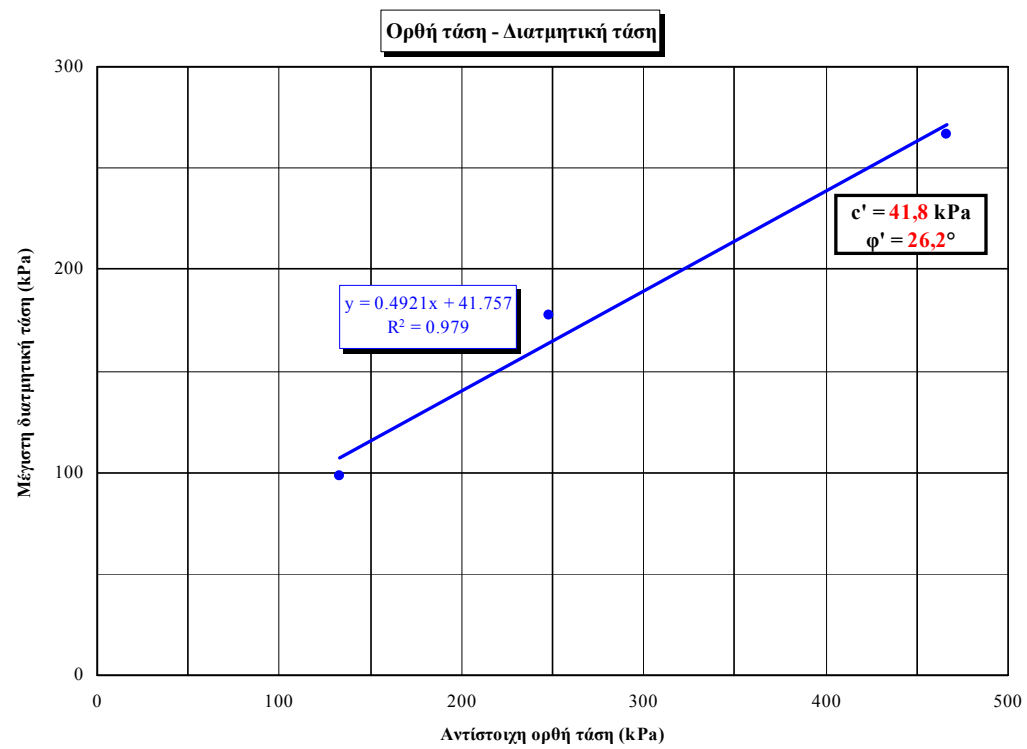
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	3600.00
Ύψος H_0 (mm)	21.72	Όγκος V_0 (cm ³)	78.19
Μάζα m (g)	100	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	12.55

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ	
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	40

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	40	kg
----------------------	----	----

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.003	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	122.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	98.16	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	133.10	kPa





Πίνακας Α4: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης σε κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 160kg(1600N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	3600.00
Ύψος H_0 (mm)	24.91	Όγκος V_0 (cm ³)	89.68
Μάζα m (g)	79	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	8.64

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ		ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗ	
Μάζα υποδοχέα (g)	42.90	Μάζα υποδοχέα (g)	42.02
Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	46.86	Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	50.28
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	45.85	Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	46.92
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	34.24	Περιεχόμενη υγρασία w (%):	68.57

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	160	kg
----------------------	-----	----

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.032	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	449.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	285.62	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	470.60	kPa

Πίνακας Α5: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης σε κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 80kg(800N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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)	TETP
	Ονομαστική/-ό διάμετρος/πλάτος (mm)	60.0

ΕΛΛΗΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A ₀ (mm ²)	3600.00
Ύψος H ₀ (mm)	25.58	Όγκος V ₀ (cm ³)	92.09
Μάζα m (g)	81	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	8.63

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ		ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗ	
Μάζα υποδοχέα (g)	41.49	Μάζα υποδοχέα (g)	48.24
Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	43.51	Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	58.11
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	42.96	Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	54.34
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	37.41	Περιεχόμενη υγρασία w (%):	61.80

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	80	kg
----------------------	----	----

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.032	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	231.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	123.56	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	236.42	kPa

Πίνακας Α6: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης σε κορεσμένο υλικό με επιβαλλόμενο φορτίο στερεοποίησης 40kg(400N).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία (WF ή ELE)	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

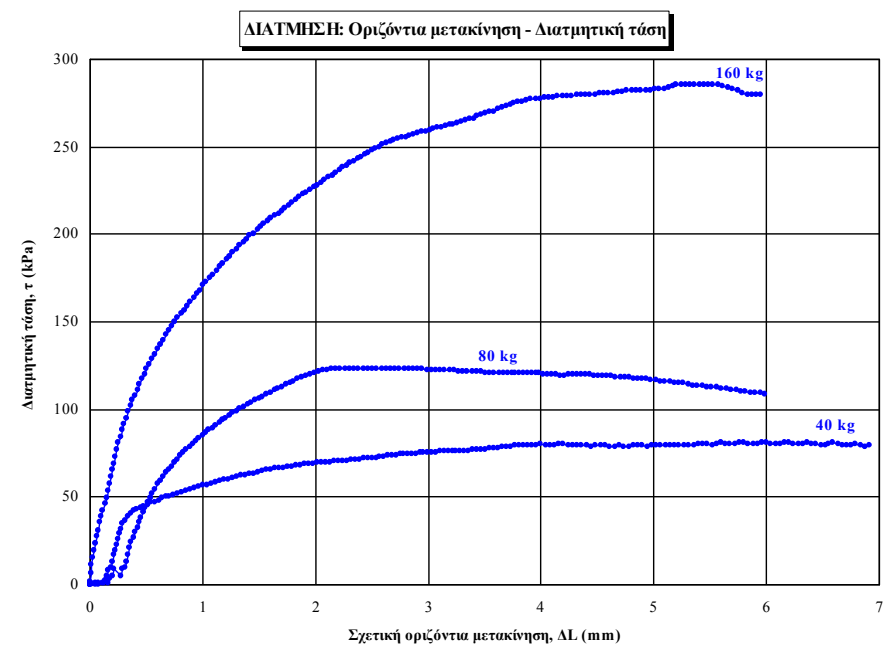
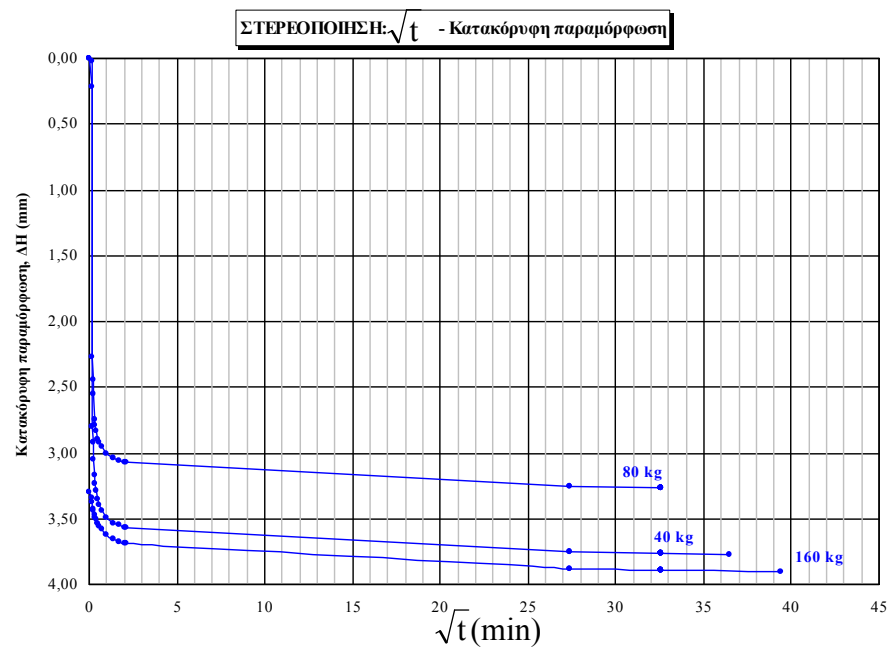
ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Ιλύς
Προετοιμασία δείγματος	Συμπύκνωση με ράβδο σε 3 στρώματα

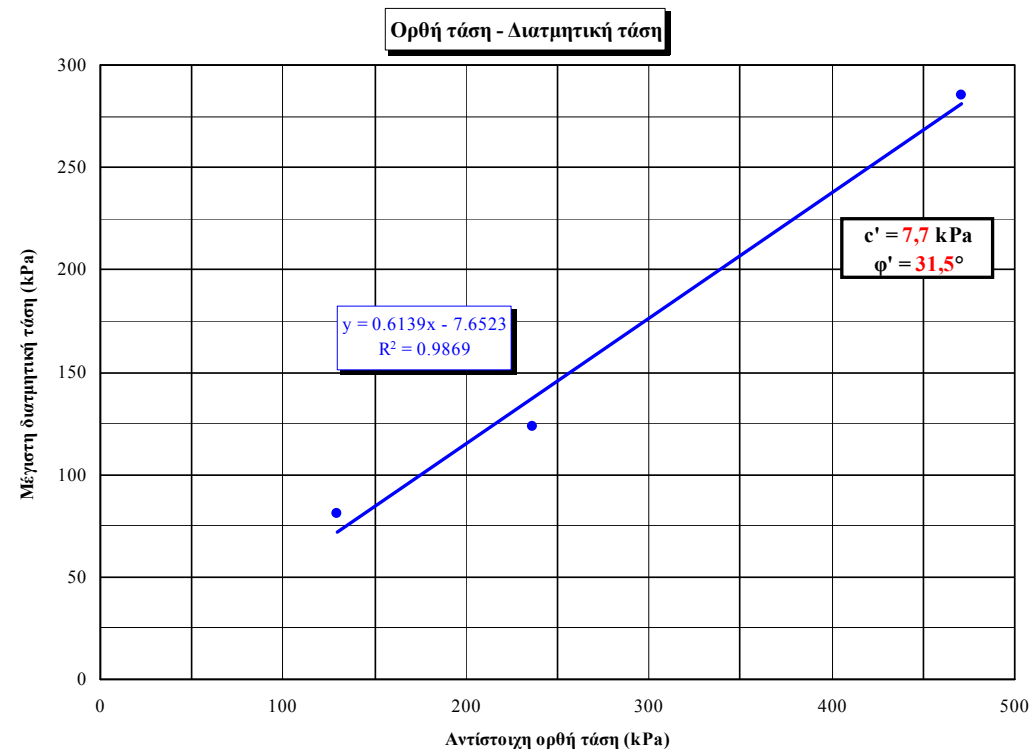
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60.0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	3600.00
Ύψος H_0 (mm)	24.32	Όγκος V_0 (cm ³)	87.55
Μάζα m (g)	112	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	12.55

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ		ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗ	
Μάζα υποδοχέα (g)	42.80	Μάζα υποδοχέα (g)	40.52
Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	52.26	Μάζα υποδοχέα + δείγματος (g)	51.85
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	49.68	Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγματος (g)	47.61
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	37.50	Περιεχόμενη υγρασία w (%):	59.80

ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ :	40	kg
-----------------------------	-----------	-----------

Ρυθμός φόρτισης στην διάτμηση =	0.032	mm/min
Αρχικά επιβαλλόμενη ορθή τάση =	122.56	kPa
Μέγιστη διατμητική τάση =	81.24	kPa
Αντίστοιχη ορθή τάση =	129.23	kPa





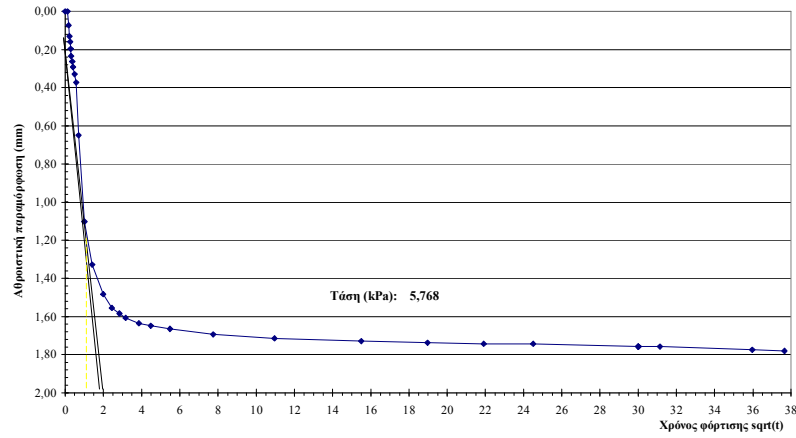
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Πίνακας Α7: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

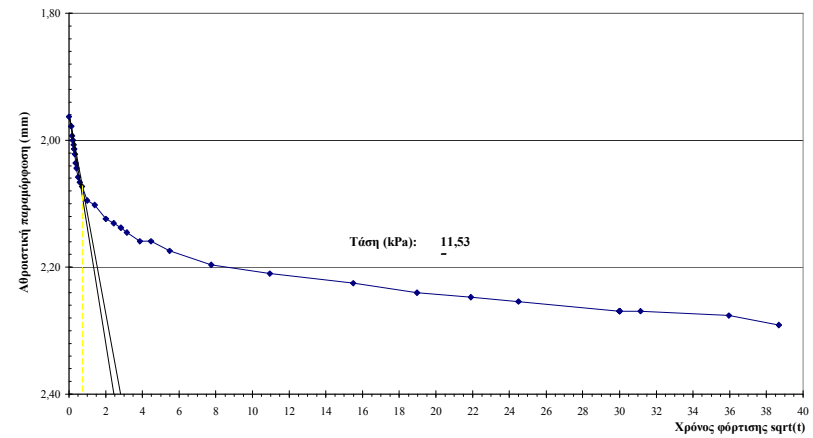
		ΔΕΙΓΜΑ: 1	Φορτίο (Kg) στο άγκιστρο	Τάση P (kPa)	ΔH (mm) από έναρξη δοκιμής	Δε=ΔH/Hs	ε=ε _o -Δε	Τάση P (kPa)	ε =(ΔH/H _o)	Δε	ΔP (kPa)	E (kN/m ²)	Cc & Cs	α _v (m ² /kN)	m _v (m ² /MN)
			0,25	5,77	1,781	0,30704	2,12367	5,768	0,0895	-	-	-	-	-	-
Διάμετρος δοκιμίου D (mm):	73,58		0,5	11,54	2,291	0,39496	2,03575	11,537	0,1151	0,026	5,768	225	0,292	1,52E-02	4,8795
Ύψος δοκιμίου H _o (mm):	19,90		1	23,07	2,780	0,47927	1,95145	23,074	0,1397	0,025	11,537	469	0,280	7,31E-03	2,4071
Επιφάνεια δοκιμίου A (mm ²):	4251,58		2	46,15	3,247	0,55978	1,87094	46,148	0,1632	0,023	23,074	983	0,267	3,49E-03	1,1822
Όγκος δοκιμίου (mm ³):	84606,46		4	92,30	3,816	0,65787	1,77284	92,295	0,1918	0,029	46,148	1.614	0,326	2,13E-03	0,7404
Ισοδ. ύψος κόκκων H _e (mm):	5,8005		8	184,59	4,364	0,75234	1,67837	184,590	0,2193	0,028	92,295	3.352	0,314	1,02E-03	0,3692
Αρχική υγρασία w _i (%):	61		16	369,18	5,013	0,86423	1,56648	369,180	0,2519	0,033	184,590	5.660	0,372	6,06E-04	0,2263
Τελική υγρασία w _f (%):	52		32	738,36	5,765	0,99387	1,43684	738,361	0,2897	0,038	369,180	9.770	0,431	3,51E-04	0,1368
Πυκνότητα νερού ρ _w (Mg/m ³):	1,00		64	1476,72	6,575	1,13351	1,29720	1476,721	0,3304	0,041	738,361	18.140	0,464	1,89E-04	0,0776
Αρχικός λόγος κενών e _o :	2,431		32	738,36	6,524	1,12472	1,30599	738,361	0,3278	-0,003	-738,361	288.105	0,029	1,19E-05	0,0052
Φαινόμενο βάρος γ (kN/m ³):	11,83		16	369,18	6,481	1,11731	1,31340	369,180	0,3257	-0,002	-369,180	170.853	0,025	2,01E-05	0,0087
Κορ. φαν. βάρος γ _{sat} (kN/m ³):	14,30		8	184,59	6,437	1,10972	1,32099	184,590	0,3235	-0,002	-184,590	83.485	0,025	4,11E-05	0,0178
Αρχ. μάζα δοκιμίου m _o (g):	102,00		4	92,30	6,393	1,10214	1,32857	92,295	0,3213	-0,002	-92,295	41.743	0,025	8,22E-05	0,0354
Τελ. μάζα δοκιμίου m _f (g):	96,53														
Ξηρή μάζα δοκιμίου m _d (g):	63,38														
Ειδ. βάρ. κόκκων G _s (g/cm ³):	2,57														
Αρχ. βαθμός κορεσμού S _i :	64%														
Τελ. βαθμός κορεσμού S _f :	55%														
Μέγιστη διαδρομή στράγγισης d (mm)	sqrt t ₉₀	t ₉₀	C _v (mm ² /min)	C _v (m ² /year)	C _v (m ² /sec)	C _v (cm ² /sec)	k (m/year)	k (m/sec)							
9.50	1.15	1.3225	57.93	30.45	9.655E-07	9.655E-03	-	-							
8.93	0.68	0.462	146.31	76.90	2.439E-06	2.439E-02	3681.10	1.17E-04							
8.68	0.55	0.303	211.32	111.07	3.522E-06	3.522E-02	2622.68	8.32E-05							
8.44	0.43	0.185	326.95	171.84	5.449E-06	5.449E-02	1992.95	6.32E-05							
8.18	0.60	0.360	157.78	82.93	2.630E-06	2.630E-02	602.35	1.91E-05							
7.91	0.53	0.281	188.65	99.15	3.144E-06	3.144E-02	359.07	1.14E-05							
7.61	0.62	0.38	127.61	67.07	2.127E-06	2.127E-02	148.91	4.72E-06							
7.26	0.68	0.462	96.54	50.74	1.609E-06	1.609E-02	68.11	2.16E-06							
6.87	0.50	0.250	159.86	84.02	2.664E-06	2.664E-02	63.97	2.03E-06							
6.68															
6.70															
6.72															
6.74															

Διαγράμματα αθροιστικής παραμόρφωσης - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου t για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης

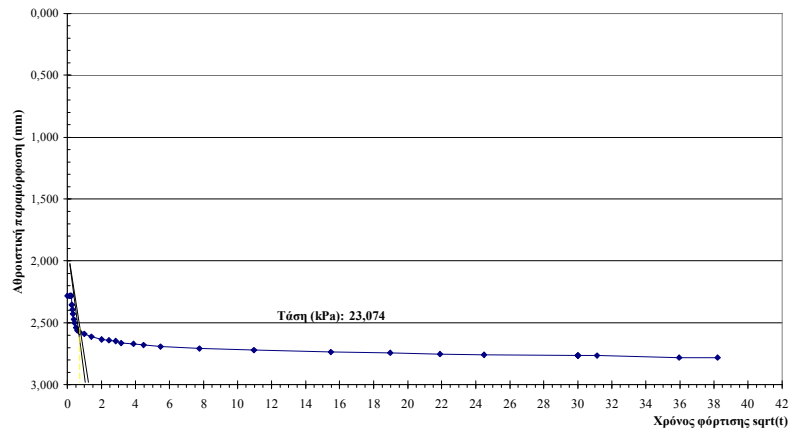
Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1



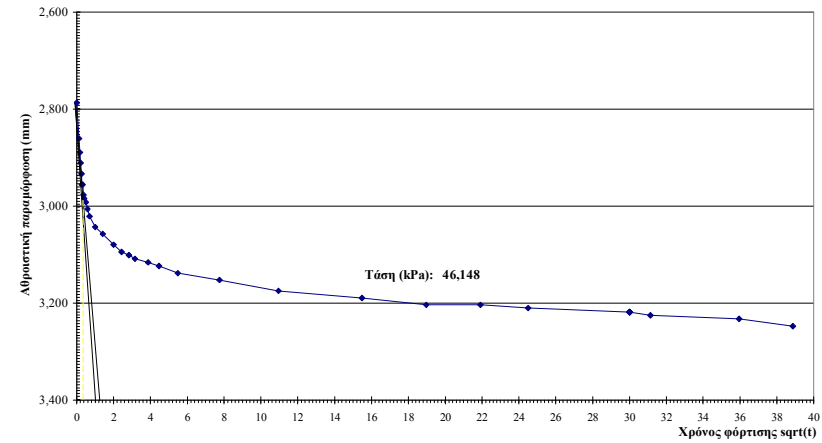
Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1

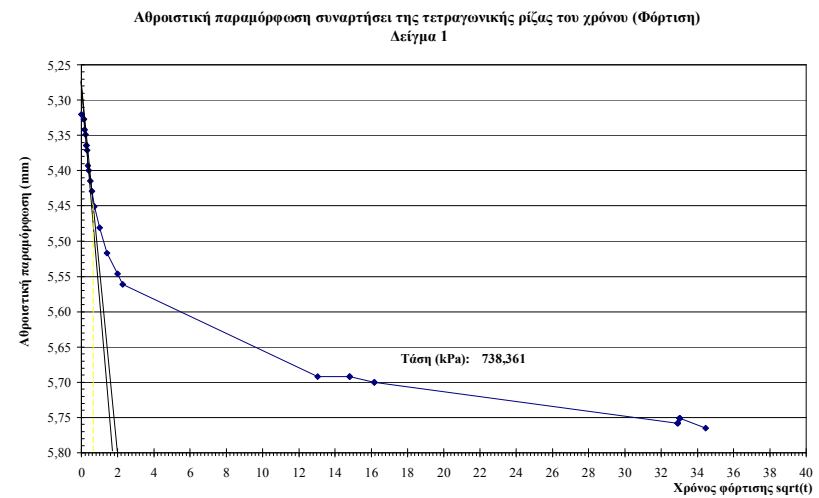
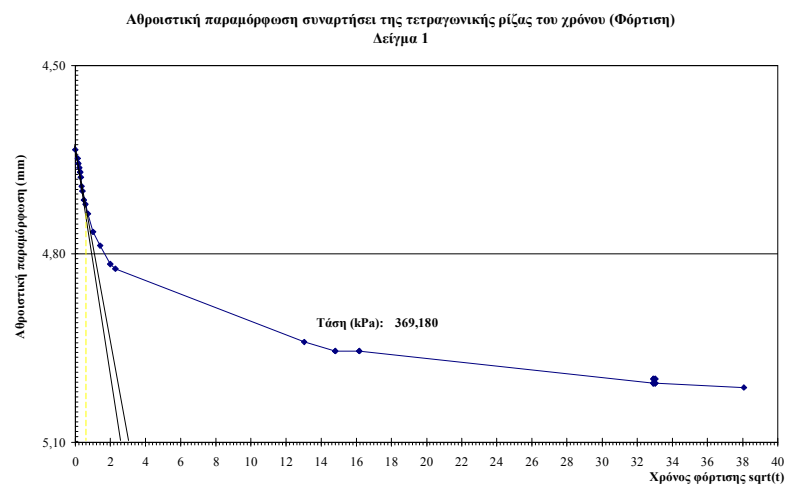
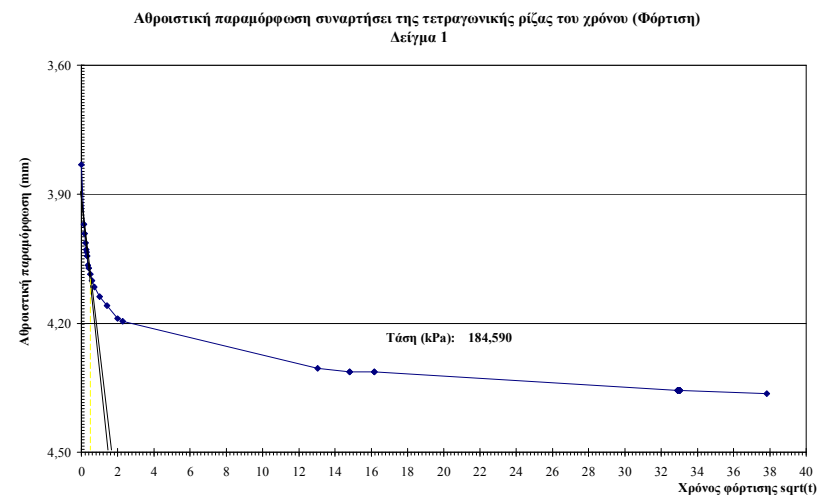
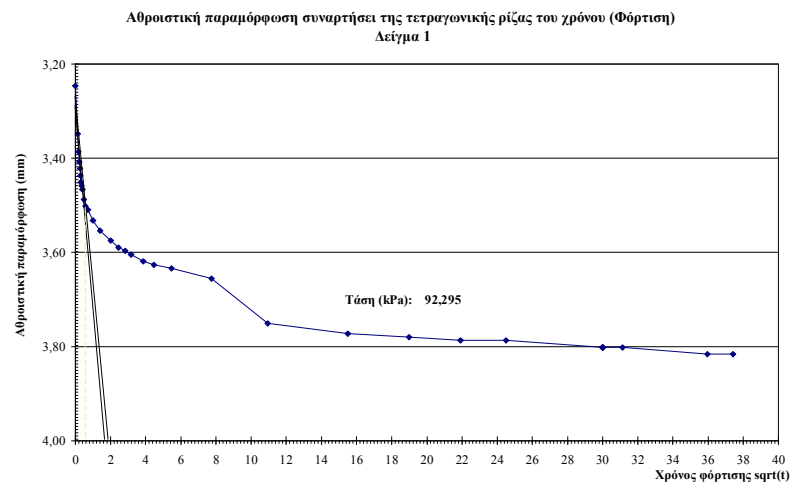


Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1

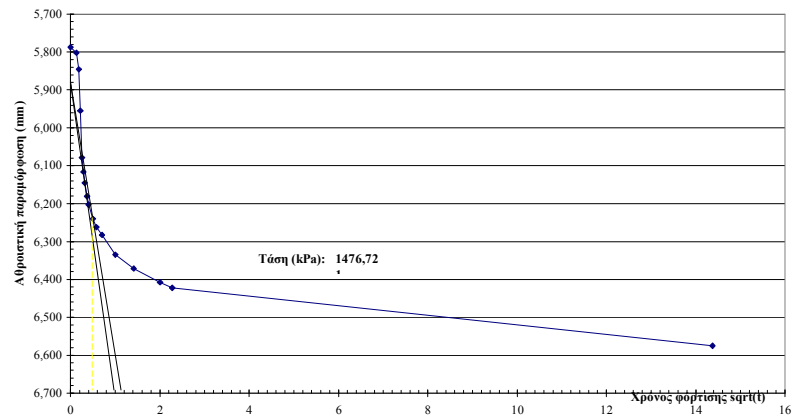


Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1

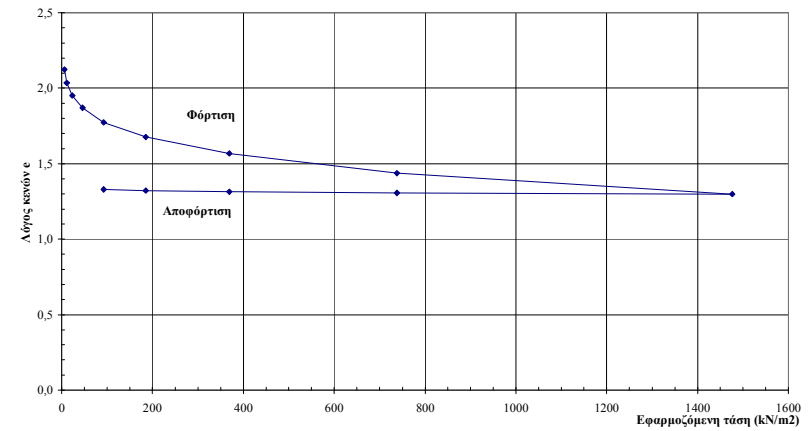




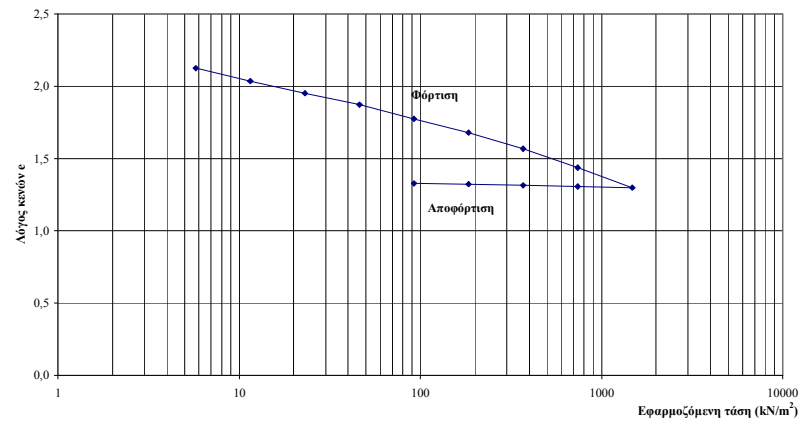
Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1



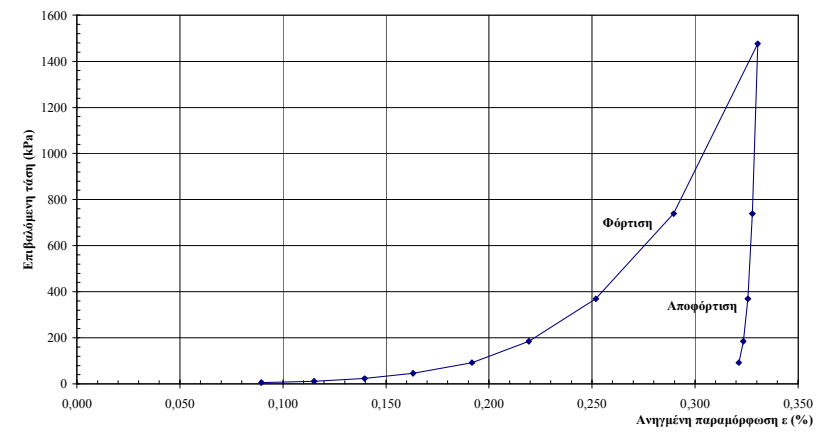
Διάγραμμα λόγω κενών ϵ συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
Δείγμα 1

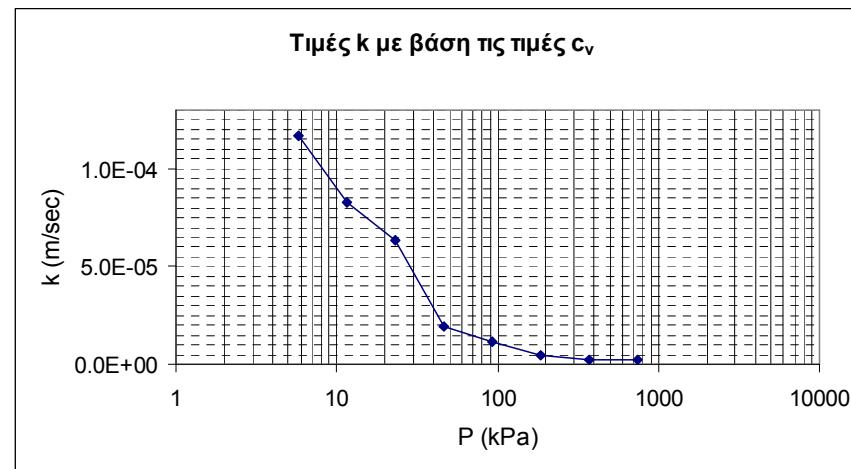
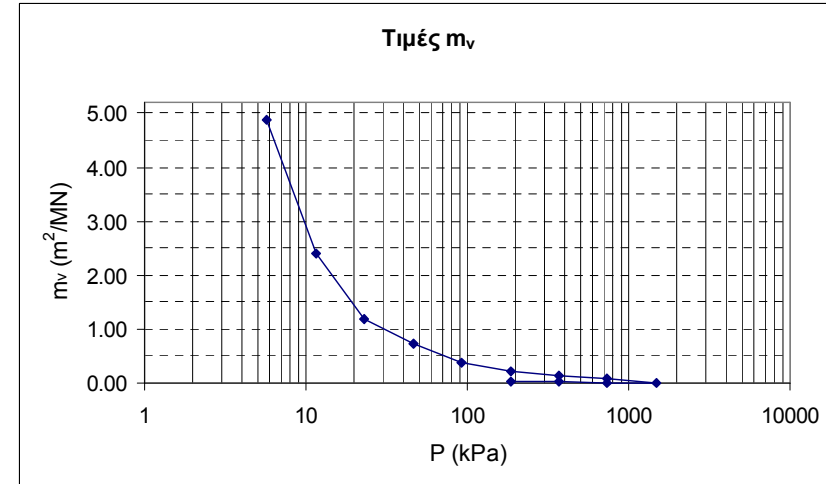
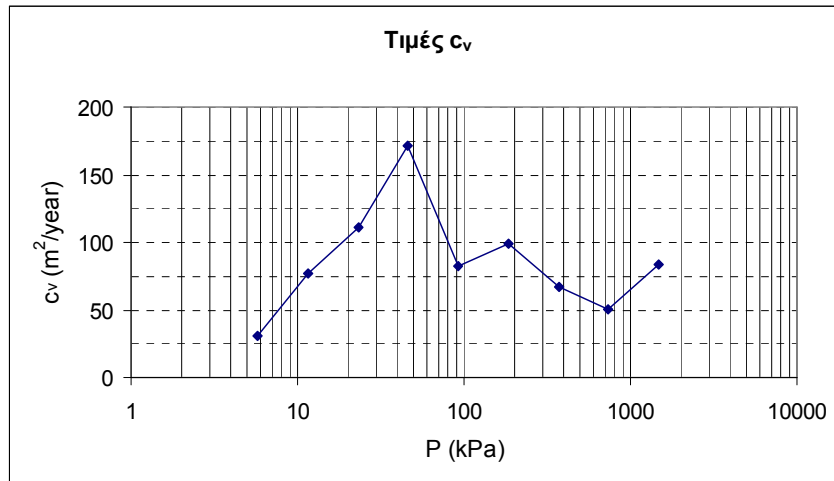


Διάγραμμα λόγω κενών ϵ συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
Δείγμα 1



Διάγραμμα ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης
Δείγμα 1

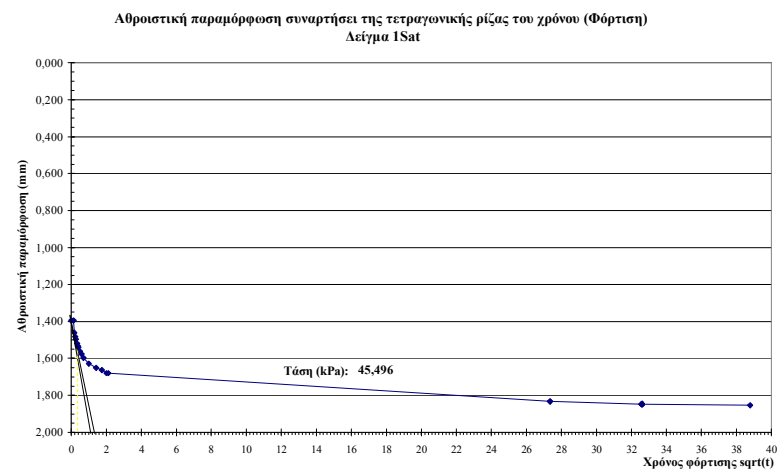
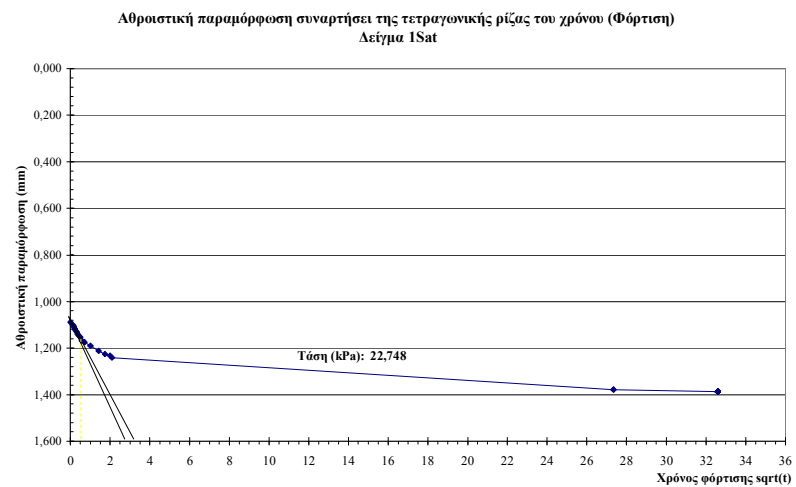
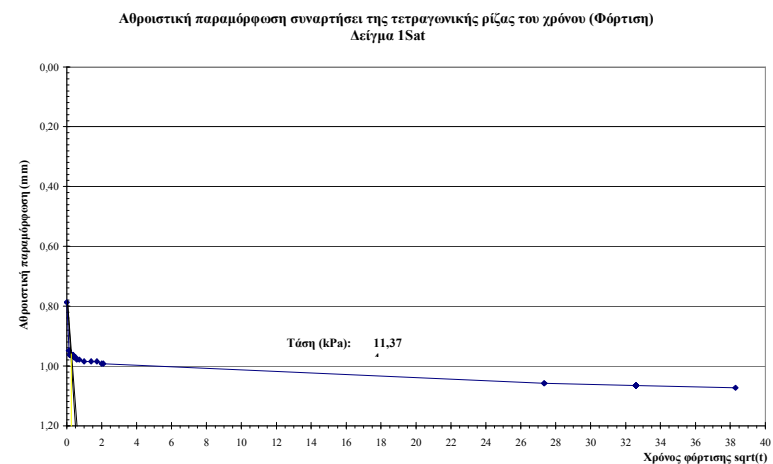
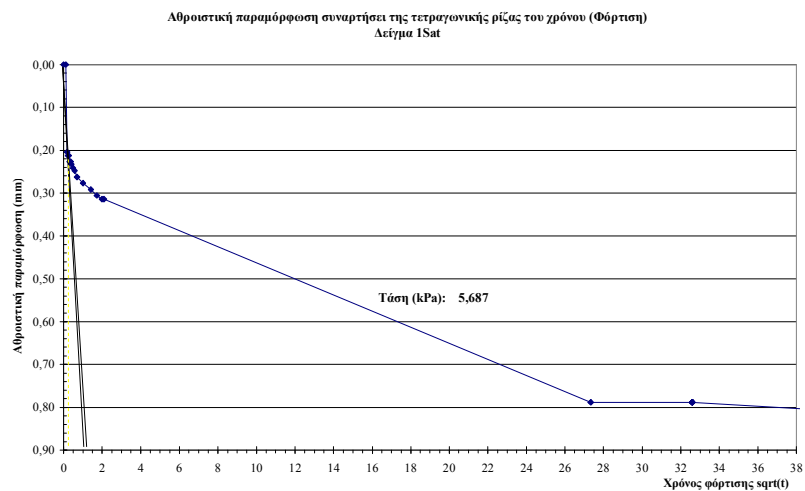


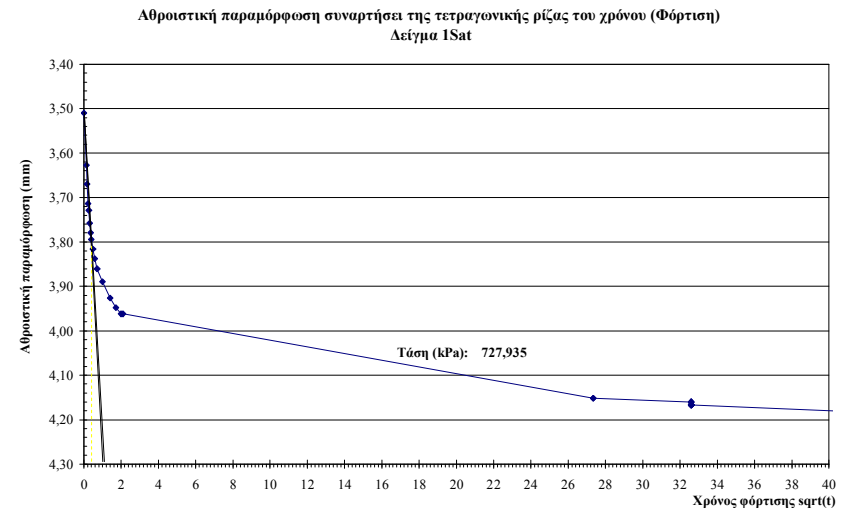
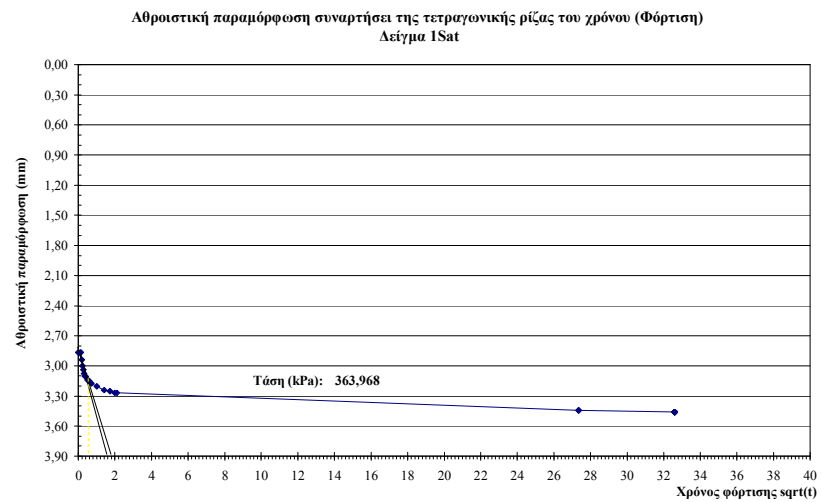
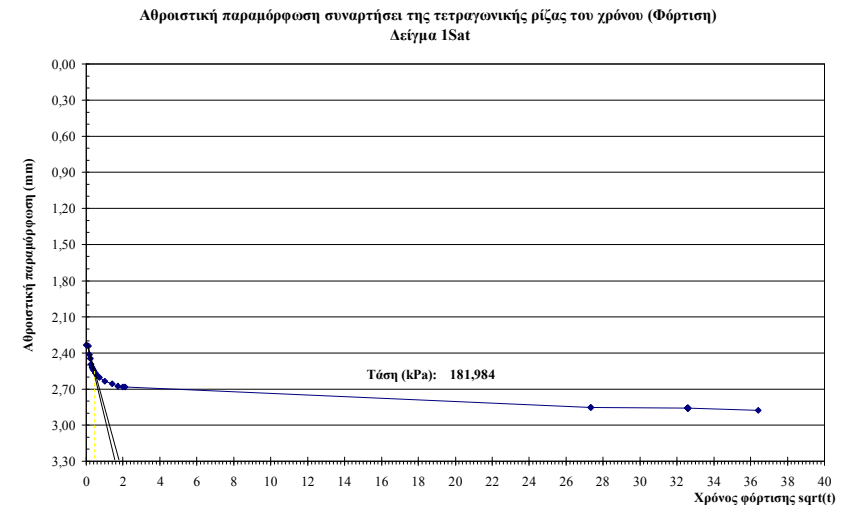
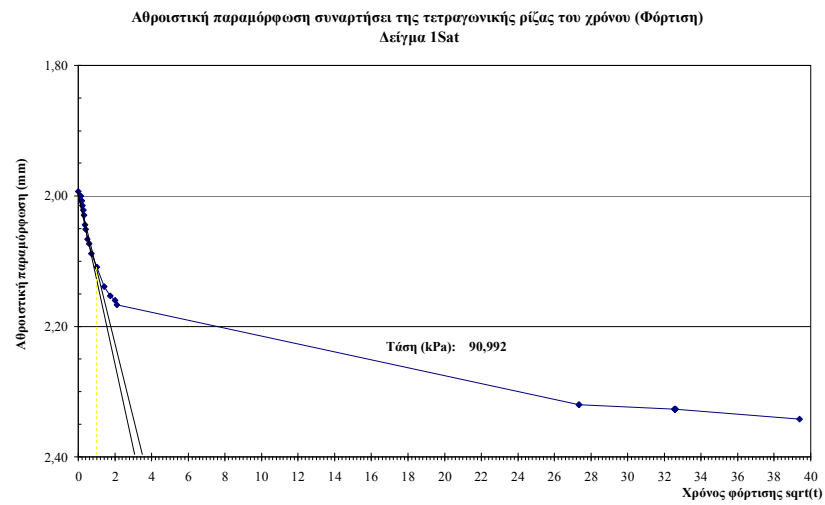


Πίνακας Α8: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για κορεσμένο εδαφικό υλικό.

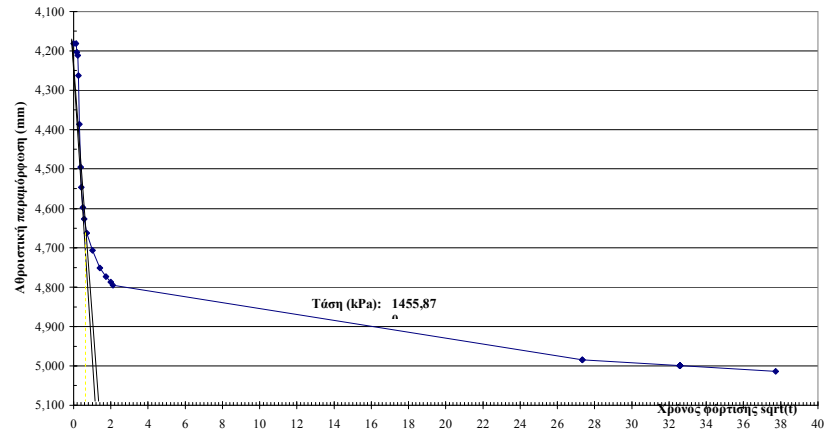
		ΔΕΙΓΜΑ: 1Sat	Φορτίο (Kg) στο άγκιστρο	Τάση P (kPa)	ΔH (mm) από έναρξη δοκιμής	Δε=ΔH/Hs	e=e _o -Δe	Τάση P (kPa)	ε =(ΔH/H _o)	Δε	ΔP (kPa)	E (kN/m ²)	Cc & Cs	α _v (m ² /kN)	m _v (m ² /MN)
			0,25	5,69	0,810	0,12573	1,94772	5,687	0,0409	-	-	-	-	-	-
Διάμετρος δοκιμίου D (mm):	74,10		0,5	11,37	1,073	0,16656	1,90690	11,374	0,0542	0,013	5,687	428	0,136	7,18E-03	2,4353
Υψος δοκιμίου H _o (mm):	19,80		1	22,75	1,387	0,21530	1,85815	22,748	0,0701	0,016	11,374	717	0,162	4,29E-03	1,4742
Επιφάνεια δοκιμίου A (mm ²):	4312,47		2	45,50	1,854	0,28779	1,78566	45,496	0,0936	0,024	22,748	964	0,241	3,19E-03	1,1149
Όγκος δοκιμίου (mm ³):	85386,95		4	90,99	2,342	0,36354	1,70992	90,992	0,1183	0,025	45,496	1.846	0,252	1,66E-03	0,5977
Ισοδ. ύψος κόκκων H _s (mm):	6,4423		8	181,98	2,875	0,44627	1,62718	181,984	0,1452	0,027	90,992	3.380	0,275	9,09E-04	0,3355
Αρχική υγρασία w _i (%):	20		16	363,97	3,459	0,53692	1,53653	363,968	0,1747	0,029	181,984	6.170	0,301	4,98E-04	0,1896
Τελική υγρασία w _f (%):	15		32	727,94	4,181	0,64900	1,42446	727,935	0,2112	0,036	363,968	9.981	0,372	3,08E-04	0,1214
Πυκνότητα νερού ρ _w (Mg/m ³):	1,00		64	1455,87	5,014	0,77830	1,29515	1455,870	0,2532	0,042	727,935	17.303	0,430	1,78E-04	0,0733
Αρχικός λόγος κενών e _o :	2,073		32	727,94	4,962	0,77023	1,30323	727,935	0,2506	-0,003	-727,935	277.175	0,027	1,11E-05	0,0048
Φαινόμενο βάρος γ (kN/m ³):	9,88		16	363,97	4,919	0,76355	1,30990	363,968	0,2484	-0,002	-363,968	167.594	0,022	1,83E-05	0,0080
Κορ. φαιν. βάρος γ _{sat} (kN/m ³):	14,82		8	181,98	4,875	0,75672	1,31673	181,984	0,2462	-0,002	-181,984	81.893	0,023	3,75E-05	0,0162
Αρχ. μάζα δοκιμίου m _o (g):	86,00		4	90,99	4,838	0,75098	1,32247	90,992	0,2443	-0,002	-90,992	48.693	0,019	6,31E-05	0,0272
Τελ. μάζα δοκιμίου m _f (g):	82,00														
Ξηρή μάζα δοκιμίου m _d (g):	71,40														
Ειδ. βάρ. κόκκων G _s (g/cm ³):	2,57														
Αρχ. βαθμός κορεσμού S _r :	25%														
Τελ. βαθμός κορεσμού S _r :	18%														
Μέγιστη διαδρομή στράγγισης d (mm)	sqrt t ₉₀	t ₉₀	C _v (mm ² /min)	C _v (m ² /year)	C _v (m ² /sec)	C _v (cm ² /sec)	k (m/year)	k (m/sec)							
9.70	0.30	0.0900	886.08	465.72	1.477E-05	1.477E-01	-	-							
9.43	0.20	0.040	1884.91	990.71	3.142E-05	3.142E-01	23668.06	7.51E-04							
9.29	0.63	0.397	184.20	96.81	3.070E-06	3.070E-02	1400.08	4.44E-05							
9.09	0.42	0.176	397.19	208.76	6.620E-06	6.620E-02	2283.36	7.24E-05							
8.85	1.00	1.000	66.43	34.92	1.107E-06	1.107E-02	204.73	6.49E-06							
8.60	0.47	0.221	283.64	149.08	4.727E-06	4.727E-02	490.71	1.56E-05							
8.32	0.58	0.34	174.35	91.64	2.906E-06	2.906E-02	170.45	5.40E-06							
7.99	0.43	0.185	292.79	153.89	4.880E-06	4.880E-02	183.26	5.81E-06							
7.60	0.74	0.548	89.48	47.03	1.491E-06	1.491E-02	33.80	1.07E-06							
7.41															
7.43															
7.45															
7.47															

Διαγράμματα αθροιστικής παραμόρφωσης - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου t για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης

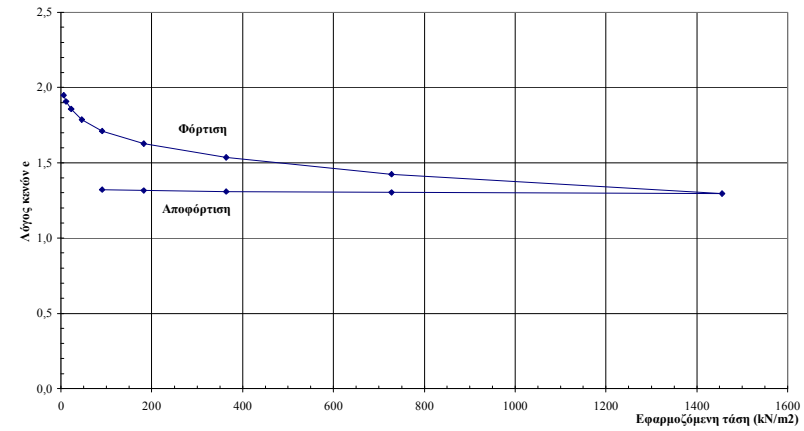




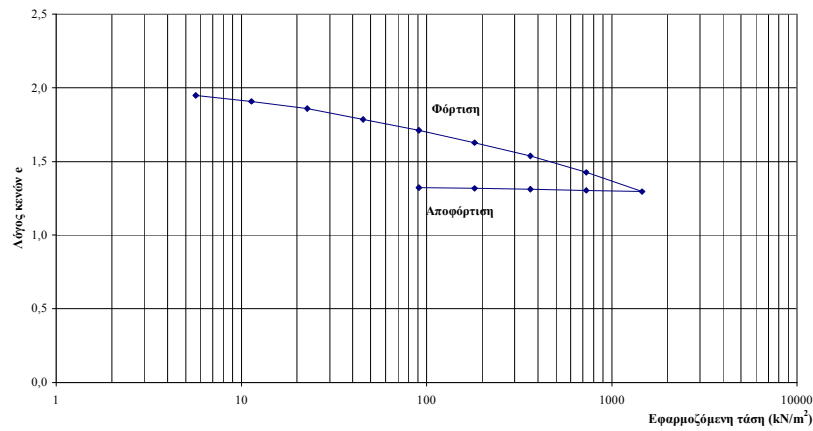
Αθροιστική παραμόρφωση συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Φόρτιση)
Δείγμα 1Sat



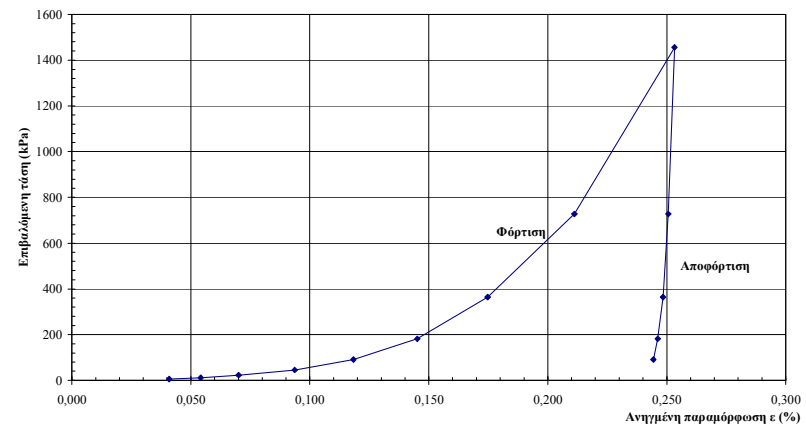
Διάγραμμα λόγου κενών e συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
Δείγμα 1Sat

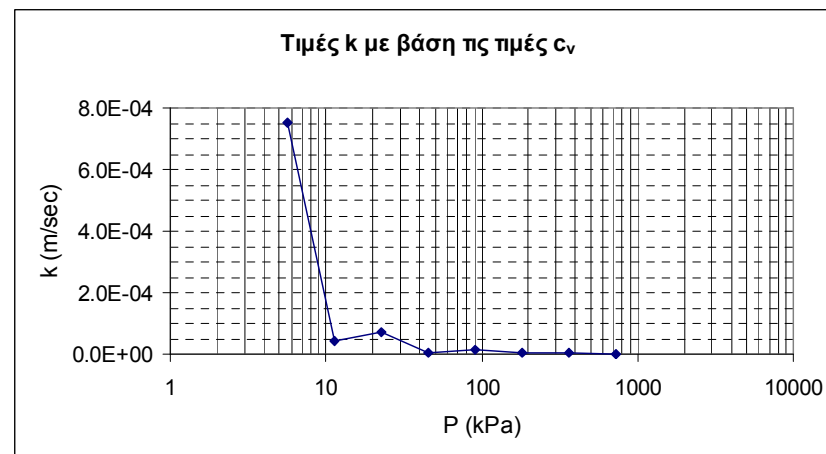
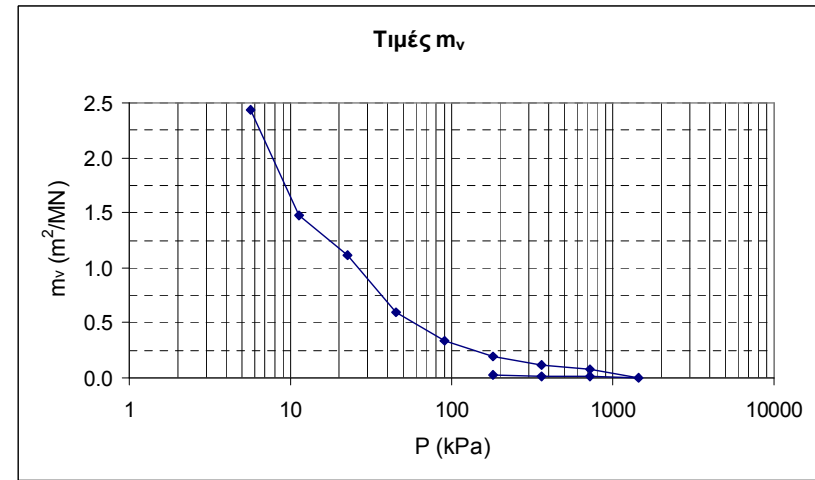
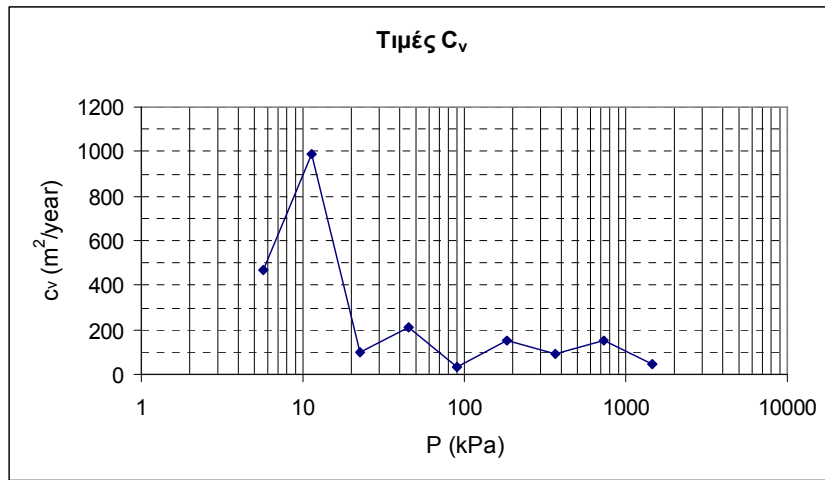


Διάγραμμα λόγου κενών e συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
Δείγμα 1Sat



Διάγραμμα ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης
Δείγμα 1Sat

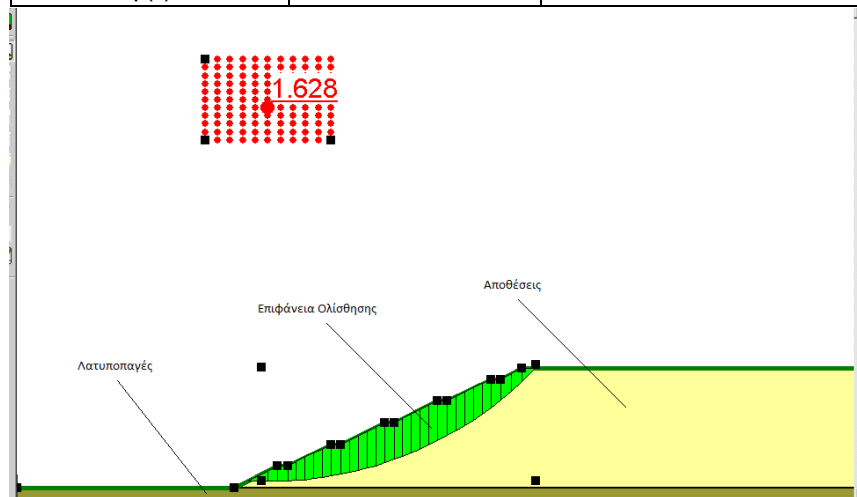




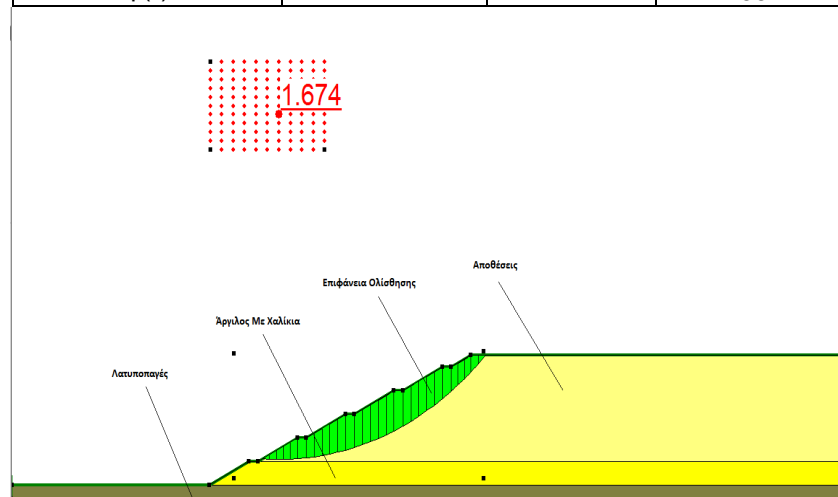
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SLOPE

Πίνακας Α9: Αποτελέσματα σχεδιασμού απόθεσης με τη χρήση slope για μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.

	Λατυποπαγές	Αποθέσεις
Μον. βάρος(kN/m^3)	19.5	18
c(kPa)	10	41.8
$\varphi(^{\circ})$	30	26.2

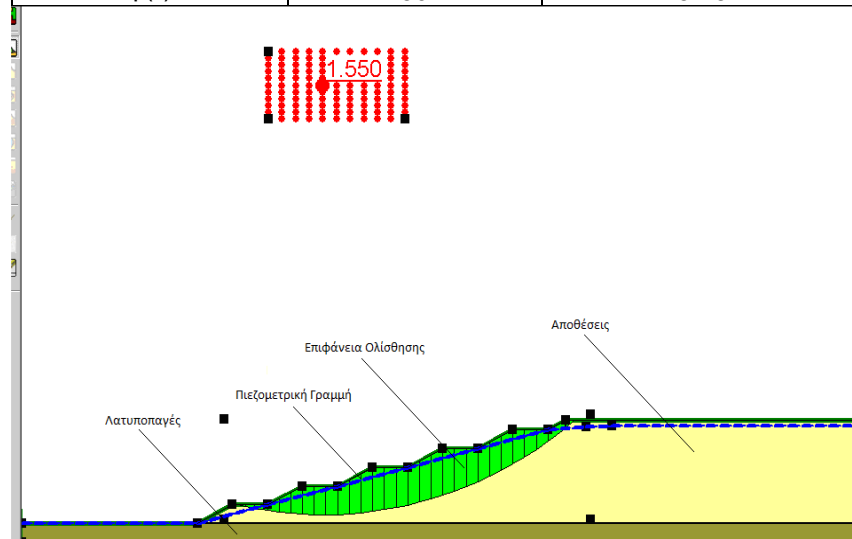


	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Άργιλος με χαλίκια
Μον. βάρος(kN/m^3)	19.5	18	20.4
c(kPa)	10	41.8	25
$\varphi(^{\circ})$	30	26.2	35

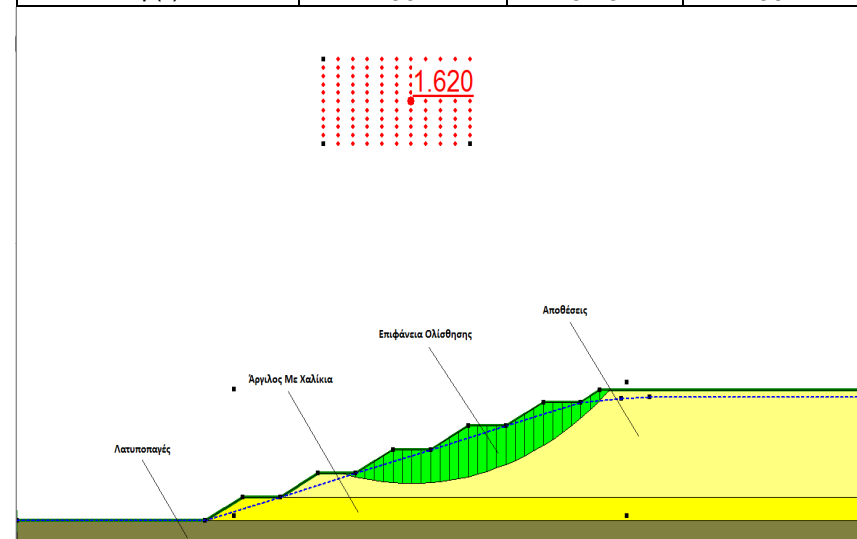


Πίνακας Α10: Αποτελέσματα σχεδιασμού απόθεσης με τη χρήση slope για κορεσμένο εδαφικό υλικό.

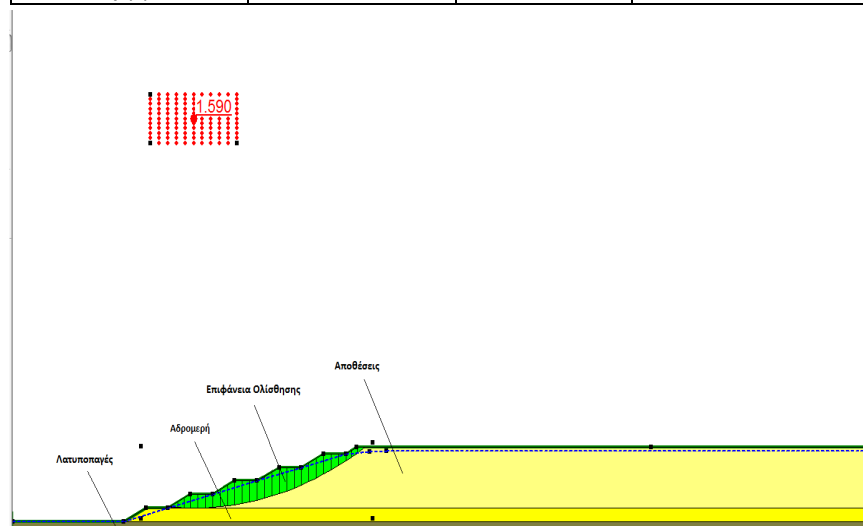
	Λατυποπαγές	Αποθέσεις
Μον. βάρος(kN/m^3)	19.5	20/18(above water pressure)
c(kPa)	10	7.7
$\varphi(^{\circ})$	30	31.5



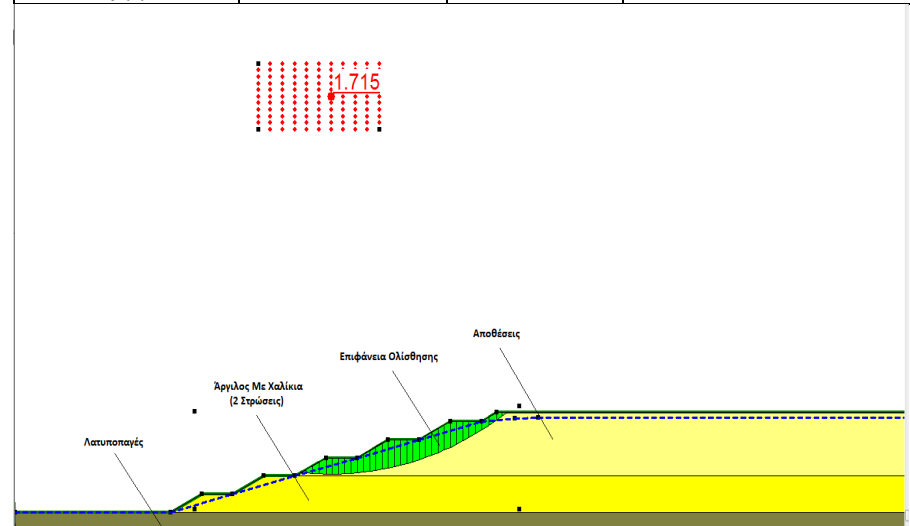
	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Άργιλος με χαλίκια
Μον. βάρος(kN/m^3)	19.5	20/18	22.4/20.4
c(kPa)	10	7.7	25
$\varphi(^{\circ})$	30	31.5	35



	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Αδρομερή
Μον. βάρος (kN/m ³)	19.5	20/18	20.5/18.5
c(kPa)	10	7.7	30
φ(°)	30	31.5	30



	Λατυποπαγές	Αποθέσεις	Άργιλος με χαλίκια (2 στρώσεις)
Μον. βάρος (kN/m ³)	19.5	20/18	22.4/20.4
c(kPa)	10	7.7	25
φ(°)	30	31.5	35



Πίνακας A11: Αποτελέσματα καθίζησης με βάση την ελαστική θεωρία για μή κορεσμένο εδαωικό υλικό.

97

Πίνακας A12: Αποτελέσματα καθίζησης με βάση τη στερεοποίηση για κορεσμένο εδαφικό υλικό.

$m_v(m^2/MN)$	0.15	
$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20	
$\gamma_w(kN/m^3)$	9.81	
$H(m)$	20	
$H/2(m)$	10	
$H_6/2(m)$	5	Όπου H_6 =πάχος 6 ^{ου} στρώματος
Layer	$\Delta\sigma'(kN/m^2)$	$\Delta\sigma' = (\gamma_{sat} * H) - u$ (στο μέσο του κάθε στρώματος)
6	50,95	
5	203,8	
4	560,45	
3	1120,9	
2	1885,15	
1	2853,2	
Layer	$S_c(mm)$	$S_c = \Delta\sigma' * m_v * H$
6	76,425	
5	611,4	
4	1681,35	
3	3362,7	
2	5655,45	
1	8559,6	
Total(m)	19,95	