



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ
ΕΠΙΧΩΜΑ ΟΔΟΠΟΪΑΣ»**



ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ - ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΕΜΜ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΖΑΧ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ

(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΓΕΩΡΓ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΧΑΝΙΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορά την διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας επιχώματος οδοποιίας.

Για τους ανθρώπους που με βοήθησαν, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, κατά την εξέλιξη της εργασίας αυτής αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αυτές οι γραμμές δεν είναι αρκετές. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της και ιδιαίτερα:

- Τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας, για την πολύτιμη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας καθώς και για την επίτευξη μιας άψογης συνεργασίας.
- Τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής, για τη πολύτιμη βοήθειά του. Η καθοδήγηση του, οι συμβουλές του και η εποικοδομητική κριτική του, υπήρξαν ιδιαίτερα πολύτιμες.
- Τον Καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής για τις επισημάνσεις του στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Τον κ. Βαβαδάκη Διονύσιο για την συνεχή υποστήριξή του και την πολύπλευρη βοήθειά του.
- Η ολοκλήρωση ενός κύκλου σπουδών δεν θα σήμαινε τίποτα για μένα ως άνθρωπο, αν δεν συνοδευόταν από μια ζωή με πολλούς καλούς φίλους και άξιους ανθρώπους κοντά μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ πολύ το Γιάννη, το Νίκο, το Χρήστο και την Χρύσα, που υπήρξαν φίλοι αναντικατάστατοι, και τη Σοφία που ήταν πάντα δίπλα μου.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται εξ' ολοκλήρου στην οικογένειά μου, με όλη την αγάπη μου. Όλος ο σεβασμός και η ευγνωμοσύνη μου ανήκουν σ' αυτούς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας επιχώματος στον οδικό άξονα Ηρακλείου – Μοιρών.

Οι γεωτεχνικές ιδιότητες των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών, προσδιορίστηκαν εργαστηριακά, και οι οριακές συνθήκες όσον αφορά την υδροφορία της περιοχής ορίσθηκαν με βάση τις παρατηρήσεις πεδίου.

Η κίνηση του νερού και η εκτίμηση της πίεσης του νερού των πόρων εκτιμήθηκε με βάση το λογισμικό **SEEP/W** σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής.

Η ευστάθεια του πρανούς του επιχώματος διερευνήθηκε, μέσω του λογισμικού **SLOPE/W**, χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο Bishop.

Η περιορισμένη δειγματοληψία και η έλλειψη επαρκών μετρήσεων όσον αφορά την πίεση των πόρων, έχρισε αναγκαία την παραμετρική και στατιστική ανάλυση προκειμένου να διερευνηθεί η βασική παράμετρος που οδήγησε στην αστοχία.

Από την έρευνα προέκυψε ότι τα δύο πιθανότερα αίτια της αστοχίας είναι α) οι έντονες βροχοπτώσεις που προηγήθηκαν της αστοχίας προκάλεσαν εμποτισμό της καστανοκίτρινης μάργας πάνω στη οποία εδράζεται το επίχωμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πίεσης πόρων και β) η ενεργοποίηση μικρότερης διατμητικής αντοχής με την αύξηση της παραμόρφωσης των γεωϋλικών και τελικά την εκδήλωση προοδευτικής αστοχίας του επιχώματος.

Η επιφάνεια ολίσθησης που εκτιμήθηκε από την ανάλυση της ευστάθειας, προσδιορίστηκε στη διεπιφάνεια της καστανοκίτρινης και της υποκείμενης κυανότεφρης μάργας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ.....	14
2.1. Τμήματα επιχωμάτων.....	16
2.2. Κατασκευή γαιωδών και βραχωδών επιχωμάτων.....	17
2.2.1. Προετοιμασία της επιφάνειας έδρασης	17
2.2.2. Διάστρωση των υλικών	19
2.2.3. Συμπύκνωση	20
2.3. Υλικά για την κατασκευή του επιχώματος – Καταλληλότητα – Ταξινόμηση– Αντιδιαβρωτική προστασία πρανών.....	22
2.4. Θεμελιώσεις επιχωμάτων.....	22
2.5. Πρανή επιχωμάτων	26
2.6. Κατολισθήσεις	27
2.6.1. Μορφές κατολισθήσεων	28
2.6.2. Μέθοδοι έρευνας κατολισθήσεων	29
2.6.3. Μέθοδοι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	32
2.6.4. Έλεγχος ευστάθειας πρανούς	33
2.7. Περιγραφή της αστοχίας.....	35
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	38
3.1. Γεωμορφολογία – Τοπογραφία	39
3.2. Γεωλογία – Στρωματογραφία – Τεκτονική.....	40
3.3. Υδρολογία.....	42
3.4. Υδρογεωλογία.....	44
3.5 Ορυκτολογική ανάλυση.....	45
4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	47

4.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	47
4.2. Κοκκομετρική καμπύλη.....	53
4.3. Προσδιορισμός ορίων Atterberg.....	54
4.3.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας (Casagrande test).....	57
4.3.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας.....	61
4.4. Ταξινόμηση με βάση το «Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης».....	63
4.5. Εκτίμηση βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης.....	66
5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	68
5.1. Διαδικασία.....	71
5.2. Υπολογισμός ρυθμού διάτμησης.....	73
5.3. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης.....	76
6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	79
6.1. Μέθοδοι επίλυσης εδαφικών πρανών.....	82
6.1.1. Τροποποιημένη μέθοδος Bishop.....	84
6.1.2. Μέθοδος Janbu.....	87
6.1.3. Μέθοδος Spencer.....	90
6.1.4. Μέθοδος Morgenstern and Price.....	93
6.2. Παραδοχές για το λογισμικό SLOPE/W.....	93
6.3. Εκτίμηση της πίεσης πόρων.....	94
6.4. Παραδοχές για το λογισμικό SEEP/W.....	96
6.5. Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης.....	97
6.6. Σχεδιασμός διατομής εγκάρσια στο σώμα του επιχώματος.....	97
6.7. Υδραυλικές παράμετροι επιχώματος και υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών.....	98
6.7.1. Υδραυλική αγωγιμότητα γεωϋλικών.....	99
6.7.2. Περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα όγκου γεωϋλικών.....	100
6.8. Σχεδιασμός του μοντέλου και δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.....	101

6.9. Ορισμός οριακών συνθηκών	103
6.10. Επίλυση – Αποτελέσματα μοντέλου βάσης	105
7. ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	107
7.1. Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης.....	107
7.2. Εδαφοτεχνικές παράμετροι επιχώματος και υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών	108
7.3. Ορισμός πιθανών επιφανειών ολίσθησης	109
7.4. Αποτελέσματα μοντέλου βάσης.....	112
7.5. Παραμετρική ανάλυση.....	113
7.6. Στατιστική ανάλυση.....	117
7.8. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης.....	119
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Φωτογραφίες	- 1 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποτελέσματα εργαστηριακών δόκιμων.....	- 9 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης.....	- 33 -

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας επιχώματος στην εθνική οδό Μοίρες – Ηράκλειο, η οποία έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 2010. Χαρακτηριστικές εικόνες της αστοχίας αυτής δίνονται στην **Φωτογραφία 1.1** και στο **Παράρτημα Α (Φωτογραφίες Α.1 έως και Α.14)**.



Φωτογραφία 1.1: Αστοχίας επιχώματος.

Η εξεταζόμενη αστοχία έλαβε χώρα στη χιλιομετρική θέση 21+575 της εθνικής οδού Μοίρες – Ηράκλειο σε μήκος 65m. Η οδός κατασκευάστηκε κατά την θερινή περίοδο του 2009 πάνω σε επίχωμα μέσου ύψους 4m. Το επίχωμα περιλαμβάνει αργιλο-μαργαϊκά υλικά προερχόμενα από εκσκαφή σε παρακείμενη θέση.

Η επιφάνεια της κατολίσθησης ακολουθεί την διεπιφάνεια μεταξύ της καστανοκίτρινης και κυανότεφρης μάργας, όπως εκτιμήθηκε με αυτοσχέδιο κλισίμετρο.

Είναι μια περιστροφικού τύπου τυπική κατολίσθηση. Συγκεκριμένα παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά αυτού του είδους ολίσθησης: εφελκυστικές ρωγμές στο πάνω μέρος του πρανούς, υποχώρηση του πάνω τμήματος (κεφάλι) με επιφάνεια διάρρηξης σχεδόν κατακόρυφη, διαδοχικά μέτωπα καθίζησης, διόγκωση του κάτω τμήματος (πόδι), αλλά και παράλληλη μικρή οριζόντια μετακίνηση (Περιφέρεια Κρήτης, 2010).

Ως πιθανή αιτία της αστοχίας, αρχικά εκτιμήθηκε η μειωμένη διατμητική αντοχή της καστανοκίτρινης μάργας (χαλαρού άργιλο-ιλυώδους εδάφους) σε σχέση με την υποκείμενη κυανότεφρη μάργα.

Υδατόρεμα, που διέρχεται εγκάρσια του δρόμου, εμφανίζει απορροή κατά τη διάρκεια του χειμώνα, που τροφοδοτείται από τα νερά της βροχής και από μικροπηγές διαλείπουσας ροής.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής πιθανόν αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στον εμποτισμό του επιχώματος.

Με βάση τα παραπάνω και προκειμένου να διερευνηθούν οι παράγοντες που προκάλεσαν την εξεταζόμενη αστοχία, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω στάδια εργασιών:

1. Συλλογή τοπογραφικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών κ.λπ. στοιχείων και παλαιότερων μελετών στην περιοχή ενδιαφέροντος.
2. Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων που περιλαμβάνουν κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμό ορίων Atterberg για την ταξινόμηση των γεωϋλικών στην θέση αστοχίας του επιχώματος, καθώς και δοκιμές άμεσης διάτμησης, σε δείγματα από τους υποκείμενους του επιχώματος γεωλογικούς σχηματισμούς.

3. Διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς και εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας με την χρήση των λογισμικών SEEP/W και SLOPE/W, για την διερεύνηση του μηχανισμού της αστοχίας.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε:

- i) Θεωρώντας τις γεωτεχνικές παραμέτρους που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά ως αξιόπιστες και προσπαθώντας να αναλυθεί η ευστάθεια στην διαπιστωμένη επιφάνεια ολίσθησης με ανάστροφη ανάλυση.
- ii) Θεωρώντας προοδευτική αστοχία, δηλαδή απομείωση της διατμητικής αντοχής της καστανοκίτρινης μάργας για την οποία θεωρήθηκε η ενεργοποίηση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Με ανάστροφη ανάλυση διαπιστώθηκε ότι επέρχεται αστοχία σε επιφάνεια ολίσθησης που διέρχεται από την διεπιφάνεια της καστανοκίτρινης και κυανότεφρης μάργας, όταν ο γεωλογικός σχηματισμός της καστανοκίτρινης μάργας είναι πλήρως κορεσμένος.

2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ

Επίχωμα νοείται, η υπερυψωμένη κατασκευή που δημιουργείται με διάστρωση και συμπύκνωση κατάλληλων εδαφικών υλικών, προϊόντων εκσκαφών ή δανείων, σε στρώσεις πάχους τέτοιου, ώστε με τα μέσα συμπύκνωσης που διατίθενται, να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπύκνωση. Η κατασκευή υλοποιείται σε τμήματα κατάλληλων διαστάσεων, ώστε να μπορεί να γίνει χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Γαιώδη επιχώματα: Είναι αυτά που κατασκευάζονται με διάστρωση και συμπύκνωση γαιωδών υλικών, που προέρχονται από γαιώδεις και ημιβραχώδεις εκσκαφές ορυγμάτων ή εκσκαφές δανειοθαλάμων.

Βραχώδη επιχώματα: Είναι αυτά που κατασκευάζονται με διάστρωση και συμπύκνωση βραχωδών υλικών, που προέρχονται κατά κύριο λόγο από εκσκαφές σε βράχο.

Εξυγίανση εδαφικών υλικών έδρασης επιχωμάτων με σταθεροποίηση υδραυλικών κονιών: Είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων εδαφικού υλικού, με την ανάμιξή του, (σε σχετικά μικρές ποσότητες) με υδραυλικές κονίες (τσιμέντου ή/ και ιπτάμενης τέφρας) ή με άσβεστο (υπό διάφορες μορφές όπως, σκόνης υδρασβέστου ή σκόνης μη σβησμένης ασβέστου ή υδαρούς πολτού ασβέστου), την συμπύκνωσή του υπό συνθήκες βέλτιστης υγρασίας και την συντήρησή του για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.

Τα επιχώματα κατασκευάζονται στα οδικά έργα για την έδραση της οδοστρώσεως, αποτελώντας αναπόσπαστο τμήμα της γεωτεχνικής κατασκευής.

Ειδικότερα, ισχύουν τα παρακάτω:

Στρώση Έδρασης Οδοστρώματος (ΣΕΟ): Είναι το αμέσως κάτω του οδοστρώματος διαμορφωμένο και συμπυκνωμένο, έδαφος ή υλικό επίχωσης, το οποίο εκτείνεται σε βάθος που επηρεάζεται από το μέγεθος των κυκλοφορούντων φορτίων.

Στρώση Στράγγισης Οδοστρώματος (ΣΣΟ) ή στρώση Αντιπαγετικής Προστασίας (ΑΠ): Είναι η αμέσως κάτω του οδοστρώματος κατάλληλα συμπυκνωμένη στρώση από ασύνδετο υλικό, η οποία έχει σκοπό να διευκολύνει την αποστράγγιση των υδάτων, που τυχόν συγκεντρώνονται κάτω από το οδόστρωμα.

Η ΣΣΟ αποτελεί μέρος της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος και κατασκευάζεται όταν κρίνεται απαραίτητη από τη μελέτη λόγω υδρογεωλογικών και κλιματολογικών συνθηκών (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Επίσης χρησιμεύει και για την προστασία του οδοστρώματος από επίδραση παγετού. Σημειώνεται ότι η στρώση αντιπαγετικής προστασίας (ΑΠ) σπανίως είναι απαραίτητη για τις ελληνικές συνθήκες και κατασκευάζεται μόνο μετά από μελέτη του κλίματος της περιοχής, που περιλαμβάνει κλιματολογικά στοιχεία τουλάχιστον πενταετίας.

2.1. Τμήματα επιχώματων

Τα επιχώματα οδικών και σιδηροδρομικών έργων αποτελούνται από τα τμήματα που δίδονται στον **Πίνακα 2.1**.

Πίνακας 2.1: Τμήματα επιχώματων οδικών και σιδηροδρομικών έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

ΟΝΟΜΑΣΙΑ		ΓΑΙΩΔΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ	ΒΡΑΧΩΔΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ
Θεμέλιο		Το τμήμα, που βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετά την εκρίζωση, τον καθαρισμό των ακατάλληλων υλικών και την κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας, ώστε να αγκυρώνεται το επίχωμα στο υποκείμενο έδαφος και επιπλέον στρώση πάχους 0,30 m πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.	Το κατώτερο μέρος του επιχώματος πάχους 0,30 m σε επαφή με το έδαφος στην αρχική του επιφάνεια (όταν δεν υπάρχουν επιφανειακά ακατάλληλα υλικά) και το τμήμα κάτω από αυτή, (μετά από τον ενδεχομένως απαιτούμενο καθαρισμό, εκρίζωση, ή/ και απομάκρυνση ακατάλληλων υλικών) και διαμόρφωση αναβαθμών για αγκύρωση.
Πυρήνας		Το τμήμα του επιχώματος μεταξύ θεμελίου και στέψης.	Το τμήμα του επιχώματος μεταξύ θεμελίου και μεταβατικού τμήματος.
Μεταβατικό τμήμα			Το τμήμα μεταξύ πυρήνα και στέψης, όπου η διαβάθμιση του υλικού των στρώσεων που το αποτελούν, πληροί ορισμένες απαιτήσεις (φίλτρο) και τοποθετείται για την αποφυγή διεύδυσης του υλικού της στέψης στο υποκείμενο βραχώδες τμήμα. Το πάχος του είναι 1,0 m, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά στους λοιπούς όρους δημοπράτησης.
Στέψη	Οδικό έργο	Το μέρος του επιχώματος κάτω από τη Στρώση Έδρασης του Οδοστρώματος (ΣΕΟ), που εκτείνεται σε βάθος, από την πάνω επιφάνεια της ΣΕΟ, ίσο προς 0,80 - 1,00 m σύμφωνα με την εκάστοτε μελέτη.	Το μέρος του επιχώματος πάνω από το μεταβατικό τμήμα που κατασκευάζεται από γαιώδη υλικά όπως στα γαιώδη επιχώματα και αποτελεί (ολόκληρο ή μέρος του) τη ΣΕΟ.
	Σιδηροδρομικό έργο	Το μέρος του επιχώματος κάτω από τη Στρώση Διαμόρφωσης (ΣΔ), που εκτείνεται σε βάθος (από την άνω επιφάνειά της) ίσο προς 1,00 m.	Το μέρος του επιχώματος πάνω από το μεταβατικό τμήμα, που κατασκευάζεται από γαιώδη υλικά, όπως στα γαιώδη επιχώματα και ταυτίζεται με τη ΣΔ.

2.2. Κατασκευή γαιωδών και βραχωδών επιχωμάτων

Η κατασκευή των επιχωμάτων περιλαμβάνει κατά σειρά τα ακόλουθα στάδια / διεργασίες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006):

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

2.2.1. Προετοιμασία της επιφάνειας έδρασης

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

Ως ακατάλληλα επιφανειακά υλικά, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται πριν από τη διάστρωση των υλικών του επιχώματος, θεωρούνται τα ακόλουθα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006):

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

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

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

Σε εδάφη κορεσμένα και/ή ευπαθή στο νερό, το τμήμα του θεμελίου των επιχωμάτων πρέπει να κατασκευάζεται από ευχερώς αποστραγγιζόμενα υλικά (κατηγοριών E2, E3, E4 ή A1.A2 κατά AASHTO ή βραχώδη προϊόντα ορυγμάτων), σε συνδυασμό με αποστραγγιστικές στρώσεις για την αποφυγή ανόδου του νερού των τριχοειδών. Παράλληλα θα πρέπει να εξασφαλίζεται η λειτουργία «φίλτρου» μεταξύ του θεμελίου και του υπερκείμενου πυρήνα του επιχώματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

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

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

Βαθμίδες αγκύρωσης κατασκευάζονται επίσης και στις περιπτώσεις διαπλάτυνσης επιχωμάτων, καθώς και στις περιπτώσεις κατασκευής του επιχώματος σε δυο φάσεις (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006):

- Όταν είναι αναγκαία η κατασκευή βραχώδους επιχώματος απ' ευθείας σε εδάφη ασταθή, διαταραγμένα ή πάνω σε μαλακές αργίλους, λαμβάνονται μέτρα για την εξυγίανση της στρώσης έδρασης, με στερεοποίηση ή απομάκρυνση του υπάρχοντος υλικού.

- Όταν υπάρχει βράχος κοντά στη στάθμη έδρασης του επιχώματος αυτού, μπορεί να απομακρύνεται το υπερκείμενο του βράχου υλικό και η έδραση του επιχώματος να γίνεται κατ' ευθείαν πάνω στον βράχο.

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

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

2.2.2. Διάστρωση των υλικών

Η διάστρωση γίνεται σε επάλληλες στρώσεις ομοιόμορφου πάχους παράλληλες προς την επιφάνεια θεμελίωσης και σε όλο το πλάτος του επιχώματος. Οι επάλληλες στρώσεις του υλικού επίχωσης θα διαμορφώνονται με πάχος έως 0,2 m.

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

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

Οι εργασίες ορυγμάτων θα πρέπει να εκτελούνται μόνο σε περιόδους, που δεν βρέχει, ώστε να είναι δυνατή χωρίς κινδύνους διαβροχής η παράλληλη εργασία

χρησιμοποίησης των προϊόντων ορυγμάτων για την κατασκευή επιχωμάτων χωρίς προσωρινή απόθεση, εάν αυτό καταστεί δυνατόν (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

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

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

2.2.3. Συμπύκνωση

Για την συμπίκνωση του επιχώματος, χρησιμοποιούνται ελκυόμενοι δονητικοί ή αυτοκινούμενοι δονητικοί οδοστρωτήρες (towed vibratory rollers ή self propelled vibratory rollers), με στατικό γραμμικό φορτίο του τύμπανου και του φερόμενου τμήματος του πλαισίου μεγαλύτερο από 25 kg/cm (κατηγορία V2 και άνω των Γαλλικών Προδιαγραφών Οδοποιίας) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

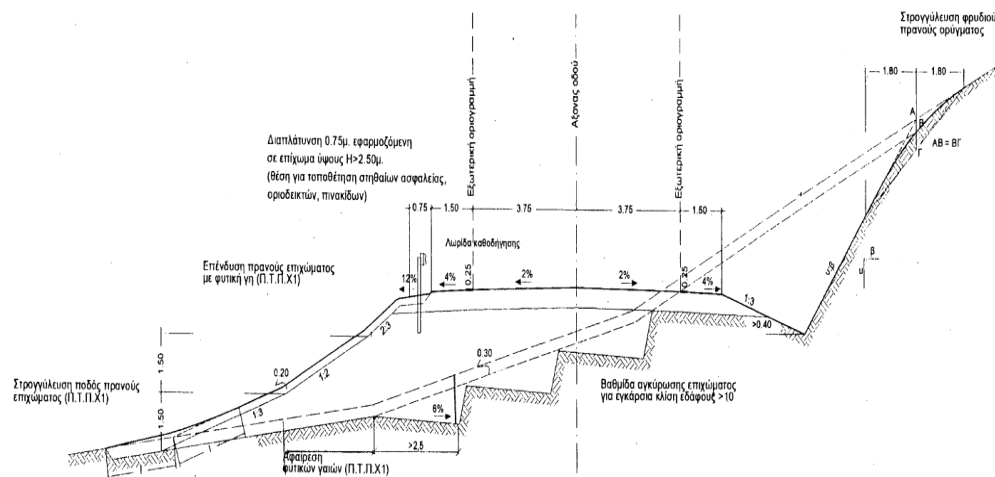
Η συμπίκνωση θεωρείται ότι ολοκληρώνεται, όταν μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων των μηχανημάτων συμπίκνωσης, που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, δεν μετράται υποχώρηση μεγαλύτερη από 0,5 cm στο θεμέλιο, τον πυρήνα και το μεταβατικό τμήμα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

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

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

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

Στο **Σχήμα 2.1** δίνεται παράδειγμα διατομής επιχώματος και ο τρόπος κατασκευής του.



Σχήμα 2.1: Τοπική διατομή επιχώματος (Κανελλαΐδης κ.ά, 2001).

2.3. Υλικά για την κατασκευή του επιχώματος – Καταλληλότητα – Ταξινόμηση– Αντιδιαβρωτική προστασία πρανών.

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

Προς τούτο, προτείνεται να ακολουθείται αρχικά μία κατάταξη καταλληλότητας υλικών με βάση την κοκκομετρική του διαβάθμιση και τα όρια Atterberg (κατάταξη οδοποιίας κατά AASHTO, **Πίνακας 2.2**) και εναλλακτικά με την μέθοδο των κατηγοριών E (**Πίνακας 2.3**).

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

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

2.4. Θεμελιώσεις επιχωμάτων

Για τον έλεγχο των συνθηκών θεμελίωσης των επιχωμάτων καθορίζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας των επί μέρους στρώσεων του υπεδάφους και γίνεται μια συντηρητική θεώρηση για τα υλικά του σώματος του επιχώματος.

Πίνακας 2.2: Κατάταξη καταλληλότητας εδαφικών υλικών για κατασκευή επιχωμάτων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

ΓΕΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ⁽¹⁾			ΚΟΚΚΩΔΗ ΥΛΙΚΑ (35% ή λιγότερο διερχόμενο από το κόσκινο No. 200)						ΙΛΥΩΔΗ-ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (περισσότερο από 35% διερχόμενο από το κόσκινο No. 200)			
ΟΜΑΔΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ: % ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΚΟΣΚΙΝΟ...												
No. 10	50 max											
No. 40	30 max	50 max	51 min									
No. 200	15 max	25 max	15 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ: ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΚΟΣΚΙΝΟ No. 40...												
ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΟΣ				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	
ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ⁽²⁾	
ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΑΔΟΣ	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	Βραχώδη κομμάτια, λεπτά χαλίκια και άμμος		Ιλυώδη ή Αργιλικά Χαλίκια και Αμμος					Ιλυώδη Εδαφικά Υλικά		Αργιλικά Εδαφικά Υλικά		
ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΥΛΙΚΟΥ	ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ έως ΚΑΛΑ							ΜΕΤΡΙΑ έως ΦΤΩΧΑ και ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΑ				

⁽¹⁾ Διαδικασία ταξινόμησης: Με τα διαθέσιμα αποτελέσματα, προχωρούμε από αριστερά προς τα δεξιά στον πίνακα και η σωστή ομάδα θα βρεθεί με τη μέθοδο του αποκλεισμού. Η πρώτη ομάδα από τα αριστερά, μέσα στην οποία τα αποτελέσματα θα ταιριάζουν είναι η σωστή ταξινόμηση.

⁽²⁾ Ο δείκτης πλαστικότητας της υποομάδας A-7-5 είναι ίσος ή μικρότερος του LL μείον 30. Ο δείκτης πλαστικότητας της υποομάδας A-7-6 είναι μεγαλύτερος του LL μείον 30.

Πίνακας 2.3: Ταξινόμηση γαιωδών εδαφικών υλικών για κατασκευή σώματος επιχωμάτων (δεν περιλαμβάνονται βραχώδη προϊόντα) (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

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

LL = Όριο Υδαρότητας (E105-86 Μέθοδος)

PI = Δείκτης Πλαστικότητας (E105-86 Μέθοδος 6)

#200 = Κόσκινο με άνοιγμα βροχίδας 0,074 mm

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

ΔΙΟΓΚΩΣΗ = Προσδιορίζεται κατά το στάδιο της δοκιμής CBR

ΟΡΓΑΝΙΚΑ = Κατά τη μέθοδο AASHTO T194

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

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

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

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

Σε περίπτωση εδάφους θεμελίωσης, που αποτελείται από χαλαρά κοκκώδη κορεσμένα υλικά, γίνεται έλεγχος για ρευστοποίηση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, Μέρος 5 και ΕΑΚ 2000. Επιπλέον, υπολογίζεται το δυναμικό της ρευστοποίησης (Iwasaki et al., 1982), έτσι ώστε να ποσοτικοποιείται η σοβαρότητα του κινδύνου ρευστοποίησης και να εκτιμάται η αναγκαιότητα σχεδιασμού κατάλληλων μέτρων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

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

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

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

2.5. Πρανή επιχωμάτων

Όλα τα πρανή επιχωμάτων ύψους μεγαλύτερου από 10 m (καθώς και ορισμένες ειδικές περιπτώσεις ανεξαρτήτως ύψους) μελετώνται με υπολογισμό της ευστάθειας. Το πρανές της εξωτερικής επιφάνειας των επιχωμάτων πρέπει να μελετάται έτσι ώστε να είναι ευσταθές έναντι ολίσθησης μεγάλου βάθους, που διέρχεται από τη θεμελίωση, ή ολίσθησης μικρού βάθους εντός του επιχώματος.

Στην επιφάνεια της οδού εφαρμόζεται μια πρόσθετη κατακόρυφη φόρτιση 20 kPa, ενιαία κατανεμημένη, η οποία παριστά την φόρτιση κυκλοφορίας (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Τα οπλισμένα πρανή επιχωμάτων πρέπει να εξετάζονται, ώστε το συνολικό ύψος του επιχώματος να ανταποκρίνεται στους Περιβαλλοντικούς Όρους. Επίσης, πρέπει να εναρμονίζονται με τις απαιτήσεις του HA 68/94 (Μέθοδοι Σχεδιασμού της Ενίσχυσης Πρανών Οδικών Οδών), που εκδόθηκε από το Βρετανικό Υπουργείο Μεταφορών.

Η ανάλυση ευστάθειας επιχωμάτων (σε συνδυασμό με τον υπόγειο φρεάτιο ορίζοντα) πρέπει να γίνεται για τις συνθήκες και τους συνδυασμούς φορτίσεων, τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής καθώς και τους ελάχιστους επιτρεπόμενους συντελεστές ασφαλείας που δίνονται στον **Πίνακα 2.4**.

Ο συνδυασμός φόρτισης 3 πρέπει οπωσδήποτε να ελέγχεται στις περιπτώσεις όπου το ανάχωμα είναι θεμελιωμένο πάνω σε επικλινές έδαφος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

Πίνακας 2.4: Έλεγχοι ευστάθειας πρανών επιχωμάτων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2003).

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΛΑΦΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
1	Βραχυπρόθεσμες στατικές	Αστράγγιστες συνθήκες (συνεκτικά εδάφη)	1,2
2	Μακροπρόθεσμες με σεισμό	Βελτιωμένη αστράγγιστη λόγω στερεοποίησης (συνεκτικά εδάφη)	1,0
3	Μακροπρόθεσμες με ανώτατη στάθμη υπόγειου ορίζοντα 50ετίας	Ενεργές παράμετροι αντοχής	1,3

2.6. Κατολισθήσεις

Με τη γενική έννοια του όρου, κατολίσθηση είναι κάθε αλλαγή, μεγάλη ή μικρή, της επιφάνειας μιας κλιτύος, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού, με ρήξη ή όχι της συνέχειάς της, αργή ή ξαφνική που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας και οφείλεται σε φυσικά ή τεχνητά αίτια. Η κατολίσθηση εκφράζει το αποτέλεσμα αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους και είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την πλήρη παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου (Αντωνίου, 2005).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν μια κατολίσθηση είναι οι ακόλουθοι (Αντωνίου, 2005):

- Γεωλογικοί (φύση εδάφους ή πετρώματος, δομή και γεωμετρία γεωλογικών σχηματισμών)
- Τοπογραφικοί – γεωμορφολογικοί
- Υδρολογικοί, κλιματολογικοί και υδρογεωλογικοί
- Μηχανικοί

Η αστάθεια οφείλεται σε έναν ή σε συνδυασμούς από τους παρακάτω (Αντωνίου, 2005):

- Αλλαγή της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους και του υλικού. Στις περιπτώσεις εκσκαφών στη βάση πρανών για διάνοιξη οδών ή λόγω διάβρωσης των υλικών του πρανούς μπορεί να επέλθει αστοχία. Επιπλέον στα βραχώδη πρανή η ύπαρξη δομικών ασυνεχειών και ο δυσμενής προσανατολισμός τους σε σχέση με τον προσανατολισμό του πρανούς οδηγεί πολύ συχνά σε αστοχία.
- Ανθρώπινη επέμβαση μέσω επιβολής φόρτισης στην κορυφή του πρανούς (επιχώματα, κτίρια κλπ).
- Σεισμική φόρτιση. Ιδιαίτερα σε πρανή, που αποτελούνται από χαλαρά ή μικρής συνεκτικότητας υλικά, κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού επέρχεται μείωση της αλληλοεμπλοκής μεταξύ των κόκκων ή μείωση της συνοχής και το πρανές οδηγείται σε αστοχία.
- Η παρουσία υψηλής στάθμης υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ή και επιφανειακού νερού. Η μόνιμη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, που βρίσκεται μέσα στο πρανές, ασκεί υδροστατικές πιέσεις, που μειώνουν την ευστάθεια του πρανούς, ενώ στα βραχώδη πρανή η εναλλαγή των φάσεων του νερού (νερό, πάγος κλπ), αυξάνει το εύρος των ασυνεχειών και ασκεί πιέσεις ενώ παράλληλα διευκολύνει και την κυκλοφορία του νερού σε βαθύτερα σημεία. Επιπλέον, όταν νερό κινείται μεταξύ περατού και λιγότερο περατού στρώματος, λειτουργεί ως «λιπαντικό» μέσο, που βοηθά στην αστοχία.

2.6.1. Μορφές κατολισθήσεων

Το 1978 ο Varnes πρότεινε πέντε κύριες μορφές κατολισθήσεων (Αντωνίου, 2005):

- Κατάπτωση: Ελεύθερη πτώση τεμαχών βραχώμαζας.
- Ανατροπή: Τεμάχη βραχώμαζας περιστρέφονται γύρω από ένα σημείο που βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους του τεμάχους.

- Ολίσθηση: α) Περιστροφική: Η βραχομάζα περιστρέφεται πέριξ ενός σημείου, που βρίσκεται πάνω από το κέντρο βάρους. β) Επίπεδη: Η βραχομάζα κινείται κατά μήκος ενός επιπέδου.

Πλευρική εξάπλωση: Διακρίνονται δύο τύποι πλευρικών διατάσεων:

- αυτές στις οποίες δεν υπάρχει μια σαφώς καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης ή ζώνη πλαστικής ροής που να ελέγχει τη κίνηση και
 - εκείνες στις οποίες προκαλείται κατακερματισμός και διάταση του συνεκτικού
- γεωυλικού.Ροή: α) Σε βραχομάζα: Συνεχείς ερπυστικές μετακινήσεις επιφανειακά και σε βάθος, που αφορούν εξαιρετικά αργές και διαφορικές μετατοπίσεις σχετικώς υγιών τεμαχών. β) Σε έδαφος: Η μετακινούμενη μάζα προσομοιάζεται με ένα παχύρρευστο υγρό.
 - Σύνθετη μορφή: Συνδυασμός δύο ή περισσότερων από τους προαναφερθέντες τύπους αστοχιών.

2.6.2. Μέθοδοι έρευνας κατολισθήσεων

Χρειάζεται απαραίτητα να γίνει εκτεταμένη και ολοκληρωμένη Γεωλογική και Γεωτεχνική Έρευνα για τη μελέτη μιας κατολίσθησης. Πρέπει να μελετηθεί η γεωλογική δομή της περιοχής, τα πετρογραφικά και φυσικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών καθώς και οι τοπικά επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Zaruba και Mencl (1976), απαιτείται να γίνουν τα ακόλουθα (Αντωνίου, 2005):

- Αρχική έρευνα, προκειμένου να οριοθετηθεί η περιοχή, που πρέπει να μελετηθεί, και στη συνέχεια να ορισθούν οι θέσεις των γεωτρήσεων, των φρεάτων, ο κάρναβος των γεωφυσικών μετρήσεων, εφόσον απαιτηθούν κλπ.
- Λεπτομερής τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής, λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση, ακόμη και με χρήση αεροφωτογραφιών. Ταυτόχρονα, στο

εργαστήριο πραγματοποιούνται οι απαραίτητες δοκιμές εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής. Το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται με πλήρη Γεωτεχνική Μελέτη και προτείνονται μέτρα αποκατάστασης της αστοχίας.

- Το τρίτο στάδιο αφορά γεωλογικό έλεγχο των προτεινόμενων διορθωτικών εργασιών υπαίθρου.
- Το τελευταίο στάδιο αναφέρεται σε παρακολούθηση με μετρήσεις οργάνων της αποτελεσματικότητας των μέτρων αποκατάστασης.

Η χρήση των αεροφωτογραφιών έχει άμεση εφαρμογή στην έρευνα μιας κατολισθαίνουσας περιοχής, καθώς αποτυπώνει τρισδιάστατα την περιοχή. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα να ορισθούν ακριβώς τα όρια της κατολίσθησης (φρύδι, πρανές μπροστά από το φρύδι, πόδι κατολίσθησης κ.λπ.). Το μέγεθος της μετακίνησης μπορεί να μετρηθεί από τη μετατόπιση γραμμικών στοιχείων, όπως οδικό ή σιδηροδρομικό δίκτυο, επιφανειακά στραγγιστήρια κ.λπ..

Συνεπώς, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένας τεχνικογεωλογικός χάρτης της περιοχής, όπου και θα σημειώνονται με κατάλληλους συμβολισμούς όλα τα στοιχεία, που υποδηλώνουν τη θέση και την έκταση της κατολισθαίνουσας μάζας, καθώς και συγκεκριμένα φαινόμενα στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. μικρές συγκεντρώσεις νερού σε πλαγίες, ισοϋψείς με χαρακτηριστικές μορφές, βυθίσματα, εμφάνιση νερού υπό μορφή πηγών, που είναι συνήθως βασικός παράγοντας για την αστοχία ενός πρανούς κ.λπ.) (Αντωνίου, 2005).

Με την ολοκλήρωση των προτεινόμενων διορθωτικών εργασιών υπαίθρου χρειάζεται συστηματική παρακολούθησή τους μέσω τοπογραφικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα με τις συμβατικές γεωδαιτικές μεθόδους επιλέγονται σημεία μέσα στη μάζα, που είχε κατολισθήσει καθώς και σημεία εκτός αυτής, που παραμένουν σταθερά και γίνονται μετρήσεις αναφορικά με τη σχετική τους μετακίνηση.

Οι μετρήσεις είναι δυνατό να γίνουν σε τακτά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, σε περιόδους κατά τις οποίες επικρατούν έντονα φαινόμενα βροχοπτώσεων, ή μετά

από εκδήλωση σεισμού. Είναι προφανές ότι τα σημεία, που χαρακτηρίζονται σταθερά, πρέπει σαφώς να βρίσκονται εκτός κατολίσθησης και πάνω σε σταθερό γεωλογικό υπόβαθρο.

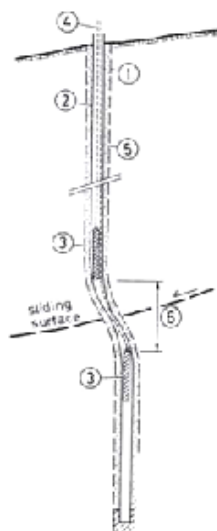
Επίσης είναι δυνατή και η χρήση της μεθόδου της φωτογραμμετρίας, όπου λαμβάνεται διαδοχική σειρά φωτογραφιών από δύο ή και περισσότερα σταθερά σημεία, που επικαλύπτουν την περιοχή ενδιαφέροντος και με απλή επίθεση είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μετακίνησης.

Τα επιφανειακά σημάδια εκδήλωσης μιας κατολίσθησης είναι η περιοχή του «φρυδιού» και η περιοχή του «πόδα» της, ενώ η μορφή της επιφάνειας ολίσθησης καθορίζει την έκτασή της σε βάθος.

Όταν η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται μέχρι και 2 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε η κατολίσθηση ονομάζεται «επιφανειακή». Όταν το βάθος ολίσθησης δεν υπερβαίνει τα 5 m, η κατολίσθηση ονομάζεται «μέσου βάθους», ενώ για βάθος μέχρι και 20 m, ονομάζεται «βαθιά». Τέλος για βάθος πάνω από 20 m, ονομάζεται «πολύ βαθιά» (Αντωνίου, 2005).

Η ολίσθηση μπορεί να συμβεί κατά μήκος ενός μόνο επιπέδου ή κατά μήκος περισσότερων επιπέδων. Ο προσδιορισμός του επιπέδου αστοχίας γίνεται συνήθως μέσω γεωτρήσεων.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της επιφάνειας ολίσθησης μπορεί να γίνει χρήση δύο μεταλλικών σωλήνων, που συνδέονται μεταξύ τους με συρματοσχοινο. Συγκεκριμένα ορύσσεται μια γεώτρηση και εισάγεται ένας πλαστικός σωλήνας μέχρι τον πυθμένα της, που έχει μικρότερη διάμετρο από τη γεώτρηση, και το ενδιάμεσο κενό πληρείται με άμμο (βλέπε **Σχήμα 2.2**).



Σχήμα 2.2: Ακριβής προσδιορισμός επιφάνειας ολίσθησης πρανούς. (1) γεώτρηση, (2) πλαστικός προστατευτικός σωλήνας, (3) μεταλλικός σωλήνας, (4) συρματόσχοινα, (5) κενό πληρωμένο με άμμο, (6) κάμψη σωλήνα (Zaruba, 1969).

Στη συνέχεια εισάγονται οι δύο μεταλλικοί σωλήνες – ο ένας αρκετά χαμηλά – και παραμένουν στη θέση αυτή, μέχρι να ενεργοποιηθεί πάλι η κατολίσθηση. Με την ενεργοποίηση ο πλαστικός σωλήνας κάμπτεται ακριβώς πάνω στο επίπεδο ολίσθησης, χωρίς όμως να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διεύθυνσης κάμψης, ενώ οι μεταλλικοί σωλήνες αδυνατούν να κατέλθουν σε μεγαλύτερα βάθη (Αντωνίου, 2005).

2.6.3. Μέθοδοι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

Τα άμεσα μέτρα, που μπορεί να γίνουν προκειμένου να αντιμετωπισθεί μια κατολίσθηση, είναι τα ακόλουθα (Αντωνίου, 2005):

- Τοποθέτηση φορτίου στη βάση της ολισθαίνουσας μάζας ή αφαίρεση φορτίου από την κεφαλή της κατολίσθησης.
- Συλλογή και απομάκρυνση όλων των επιφανειακών υδάτων, που ρέουν μέσα στην περιοχή, που ολίσθησε, με χρήση επιφανειακών στραγγιστηρίων, που

κατασκευάζονται είτε παράλληλα με το φρύδι του πρανούς, είτε πάνω στην ολισθαίνουσα μάζα.

- Διάνοιξη μέσα στην ολισθαίνουσα μάζα συστήματος κύριων και δευτερευουσών αποστραγγιστικών στοών για τη συλλογή των υπόγειων υδάτων (με φυσική ροή).
- Διάνοιξη φρεάτων για άντληση των υπόγειων υδάτων με στόχο την ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Επιπλέον μέτρα, που θα μπορούσαν να ληφθούν για την αντιμετώπιση μιας κατολίσθησης, είναι και τα εξής (Αντωνίου, 2005):

- Κατασκευή τοίχου αντιστήριξης στη βάση του πρανούς. Οι τοίχοι βαρύτητας συνεισφέρουν μόνο με το βάρος τους στη συγκράτηση της ολισθαίνουσας μάζας (αντίσταση στην ολίσθηση), ενώ αντίθετα, αν ο τοίχος αντιστήριξης εδράζεται πάνω σε πασσάλους, τότε και αυτοί μπορούν να παραλάβουν οριζόντια φορτία, ενώ επιπλέον προστατεύουν το πρανές και από πιθανές επιφάνειες ολίσθησης, που αναπτύσσονται σε μεγαλύτερα βάθη.
- Κατασκευή τοίχου αντιστήριξης στη βάση του πρανούς ή πασσαλότοιχου και ταυτόχρονη χρήση αγκυρίων.
- Μείωση κλίσης του πρανούς (π.χ. δημιουργία αναβαθμίδων) ή ολική μείωση της κλίσης.
- Αποφυγή εξωτερικών φορτίσεων στην κορυφή αλλά και στο σώμα του πρανούς.

2.6.4. Έλεγχος ευστάθειας πρανούς

Για οποιοδήποτε τμήμα του έργου, το οποίο διέρχεται ή απειλείται από υπάρχουσες κατολίσθήσεις, εκτελείται ειδική Μελέτη Ευστάθειας. Κατά την ειδική αυτή μελέτη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα (Αντωνίου, 2005):

- Έλεγχος συνολικής ευστάθειας στην κρίσιμη διεπιφάνεια ολίσθησης με έλεγχο των παραμέτρων παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

- Έλεγχος τοπικής αστάθειας στον πόδα της κατολίσθησης, όπου η πιθανή διάβρωση από ροή νερού μπορεί να προκαλέσει υποσκαφή (με απότομη κλίση) και να οδηγήσει σε κλιμακωτή διάβρωση προς τα ανάντη, με μεταγενέστερη εξέλιξη σε ολική αστάθεια.
- Έλεγχος ευστάθειας, που διαμορφώνεται από φόρτιση ή αποφόρτιση της κατολίσθησης από επιχώματα, τεχνικά έργα και εκσκαφές για τη νέα χάραξη.
- Έλεγχος ευστάθειας της μάζας, που μπορεί να επιβαρύνει τεχνικά έργα ή ανάλογα να επιβάλλει πλάγιες φορτίσεις σε αυτά.
- Έλεγχος προσωρινής αστάθειας κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Η ύπαρξη υπόγειου ύδατος παίζει καθοριστικό ρόλο και πρέπει να υπολογίζεται (Αντωνίου, 2005):

- Υπόγεια νερά όπως μετρώνται στις γεωτεχνικές έρευνες.
- Η επίδραση έργων διευθέτησης ποταμών στη στάθμη των υδάτων κατά τη διάρκεια πλημμυρών.
- Οι κανονικές μέσες ετήσιες διακυμάνσεις, όπως μετρώνται από πιεζόμετρα ή προβλέπονται βάσει εμπειρίας από παρόμοιες καταστάσεις.
- Η ανώτατη στάθμη υπογείου ορίζοντα 50-ετίας, βάσει υδρογεωλογικών εκτιμήσεων.
- Η επίδραση έργων αποστράγγισης και ελέγχου επιφανειακών υδάτων για την ταπείνωση της στάθμης του υπογείου ορίζοντα στις παραπάνω περιπτώσεις.
- Αστοχία των έργων αποστράγγισης και ελέγχου επιφανειακών υδάτων.

2.7. Περιγραφή της αστοχίας

Η αστοχία του επιχώματος εκδηλώθηκε στην εθνική οδό Μοιρών – Ηρακλείου τον Ιανουάριο του 2010, μετά από περίοδο έντονων βροχοπτώσεων.

Η επιφάνεια αστοχίας ακολουθεί την διεπιφάνεια μεταξύ της καστανοκίτρινης και της υποκείμενης κυανότεφρης μάργας όπως εκτιμήθηκε από Υπηρεσιακούς Παράγοντες της Περιφέρειας Κρήτης με αυτοσχέδιο κλισίμετρο.

Η αστοχία παρουσιάζει χαρακτηριστικά περιστροφικής ολίσθησης με εφελκυστικές ρωγμές στο πάνω μέρος του πρανούς, μέτωπο (επιφάνεια διάρρηξης) σχεδόν κατακόρυφο, διαδοχικά μέτωπα (απότομες κρημνώδεις επιφάνειες μέσα στη μάζα της ολίσθησης), και διόγκωση του κάτω τμήματος της (πόδι).

Παρατηρήθηκε επίσης εκτεταμένη μετακίνηση της ανώτερης εδαφικής στρώσης κατάντη του ποδός του επιχώματος και δημιουργία εγκάρσιων τοξοειδών ρωγμών (φρυδιών) καθώς και εμφάνιση μικροπηγών σε διάφορα σημεία.

Οι πρώτες ενδείξεις του φαινομένου της αστοχίας παρουσιάστηκαν το τελευταίο δεκαήμερο του Δεκεμβρίου 2009 με εμφάνιση διαμήκων – παραλλήλων με τον άξονα της οδού - τριχοειδών ρωγμών στην επιφάνεια κυκλοφορίας (κατάστρωμα) της οδού.

(Φωτογραφία 2.1)

Οι ρωγμές αυτές προοδευτικά διευρύνθηκαν παρά την κατ' επανάληψη σφράγιση τους, προκειμένου να αποτραπεί η εξέλιξη του φαινομένου από ενδεχόμενη διείσδυση όμβριων υδάτων στο σώμα της οδού.

Ταχεία εξέλιξη του φαινομένου εκδηλώθηκε μετά από τα έντονα καιρικά φαινόμενα (βροχόπτωση), που εκδηλώθηκαν στην περιοχή τον Ιανουάριο το 2010 (Περιφέρεια Κρήτης, 2010).



Φωτογραφία 2.1: μέτωπο αστοχίας και τριχοειδείς ρωγμές στην επιφάνεια κυκλοφορίας (κατάστρωμα) της οδού.

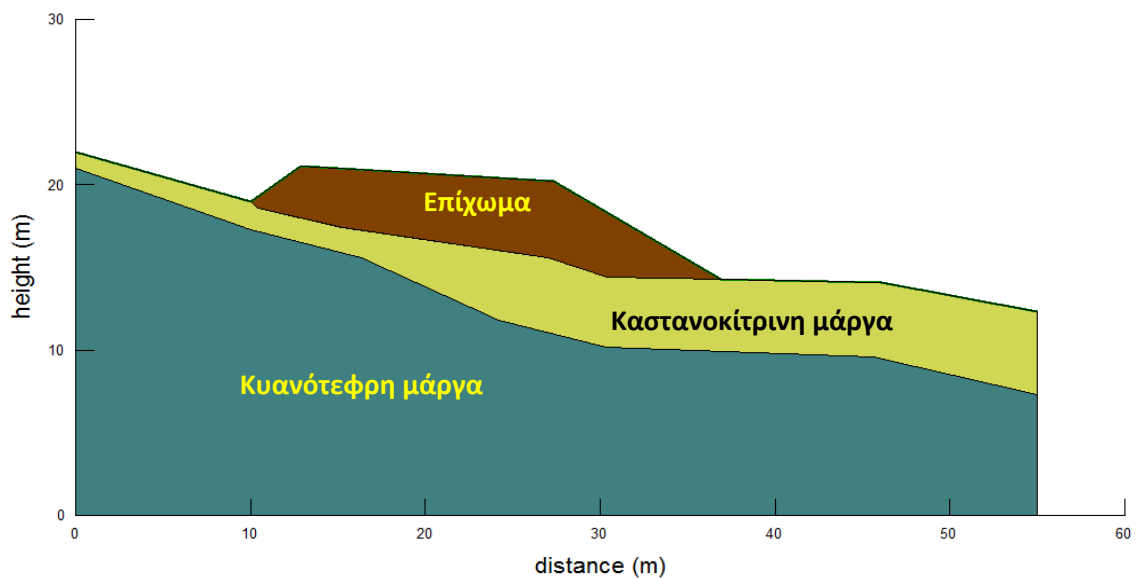
Η γεωτεχνική έρευνα περιλάμβανε τη λήψη δειγμάτων (καρότα) και την εκτέλεση των επιτόπου δοκιμών. Οι παραπάνω εργασίες εκτελέστηκαν από εξειδικευμένο γραφείο μετά από εντολή της Διευθύνουσας το έργο Υπηρεσίας (ΔΕΚΕ).

Από τα στοιχεία της γεωτεχνικής έρευνας προκύπτει ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση κατολίσθησης από κάτω προς τα πάνω (**Σχήμα 2.3**) είναι (Περιφέρεια Κρήτης, 2010):

- Άνω Μειοκαινική τεφροκύανος μάργα με ενστρώσεις ψαμμιτών μικρού πάχους. Ο σχηματισμός αυτός κατατάσσεται στα σκληρά εδάφη, παρουσιάζει πολύ υψηλή διατμητική αντοχή, όπως επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμής πρότυπης διείσδυσης ($SPT > 50$ ως και άρνηση διείσδυσης). Επίσης παρουσιάζει πολύ μικρή υδροπερατότητα.
- Άνω Μειοκαινική καστανοκίτρινη μάργα (άργιλο-ιλυώδης έδαφος) πάχους από 1,5 έως 4m. Ο σχηματισμός αυτός είναι σχετικά χαλαρός και με μικρή

υδροπερατότητα. Παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στην διατμητική αντοχή (συνοχή) ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού του. Βάσει των αποτελεσμάτων της επιτόπου δοκιμής πρότυπης διείσδυσης (τιμές SPT μικρότερες από 12), η συγκεκριμένη στρώση, όντας κορεσμένη, παρουσιάζεται ως ένα μαλακό έως μέσης συνεκτικότητας έδαφος.

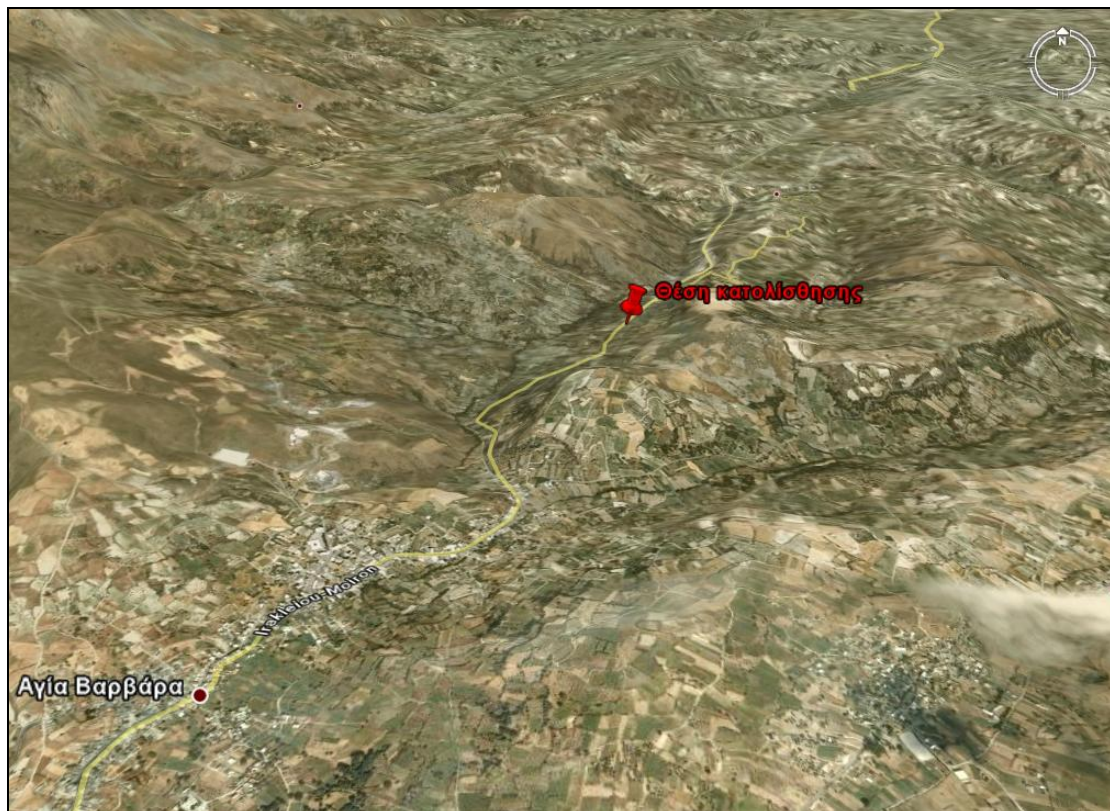
- Τεχνητό επίχωμα πάχους από 3-6 m
- Οδοστρωσία 0,5 m



Σχήμα 2.3: τομή επιχώματος και υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

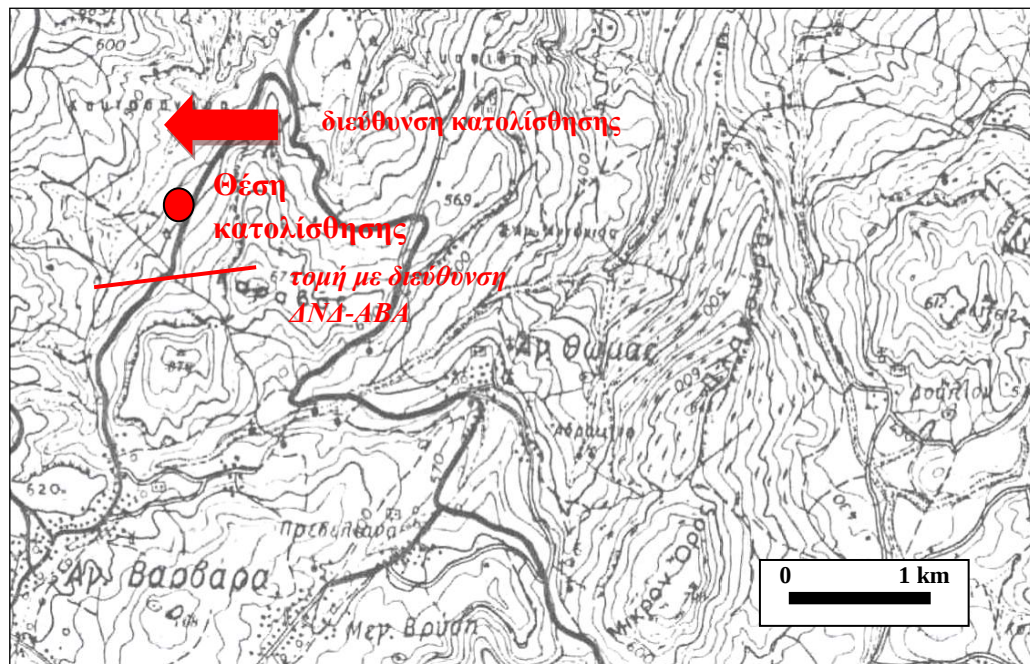
Η αστοχία εκδηλώθηκε στον οδικό άξονα της εθνικής οδού Μοίρες – Αγ. Βαρβάρα και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1: Θέση εκδήλωσης της εξεταζόμενης κατολίσθησης (Τρισδιάστατη δορυφορική εικόνα από GoogleEarth, προοπτική από νότια).

3.1. Γεωμορφολογία – Τοπογραφία

Η ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος είναι ορεινή – ημιορεινή, με έντονες χαραδρώσεις – πτυχώσεις και γενικά ισχυρό ανάγλυφο, όπως διακρίνεται στον τοπογραφικό χάρτη στο **Σχήμα 3.2**.



Σχήμα 3.2: Απόσπασμα τοπογραφικού χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος (ΓΥΣ, 1972).

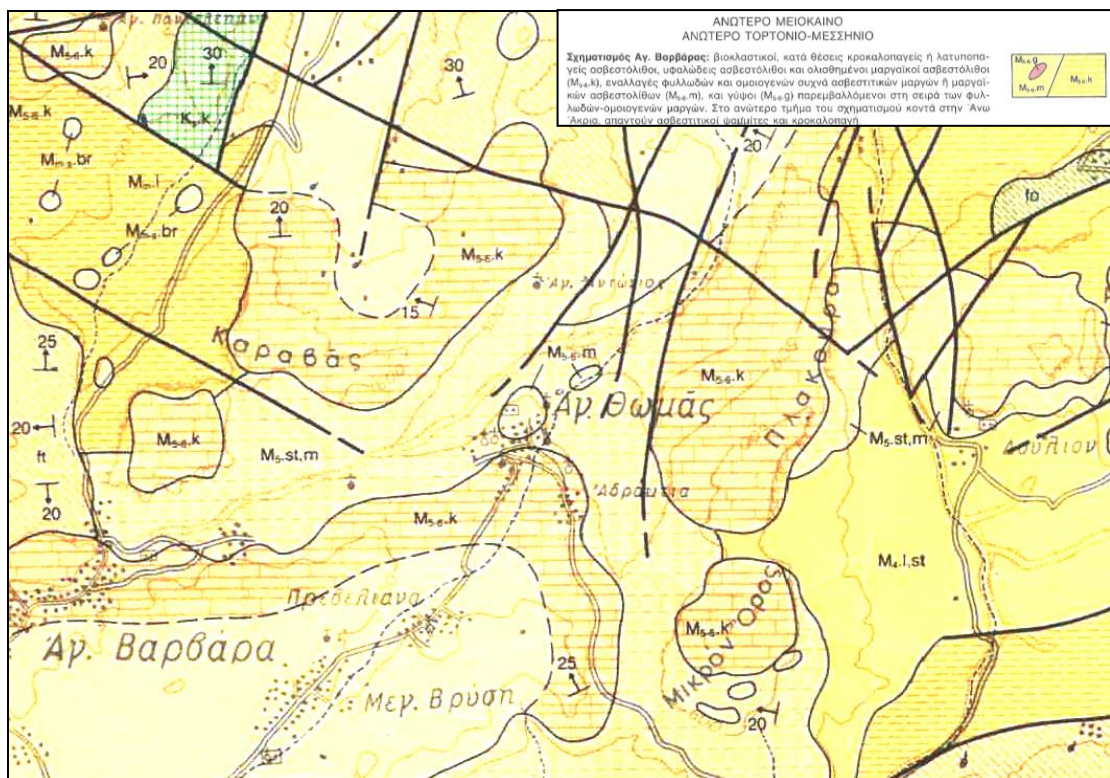
Τα απόλυτα υψόμετρα της ευρύτερης περιοχής κυμαίνονται από 200 m έως και 800 m. Στη θέση της κατολίσθησης το απόλυτο υψόμετρο είναι 525 m.

Στο **Σχήμα 3.2** διακρίνεται η περιοχή της κατολίσθησης, η διεύθυνση κατά την οποία αυτή εκδηλώθηκε και η τομή κατά την οποία αυτή εξετάσθηκε στην παρούσα εργασία (βλέπε κεφ. 6 και 7).

3.2. Γεωλογία – Στρωματογραφία – Τεκτονική

Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος χαρακτηρίζεται από λεπιοειδή ανάπτυξη αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων–γεωλογικών ενοτήτων, που κάθε ένα από αυτά συνίσταται από διαφορετικούς λιθολογικούς σχηματισμούς, με διαφορετική μεταμορφική και παραμορφωτική ιστορία (Φυτρολάκης, 1980).

Στην περιοχή ενδιαφέροντος οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται, αφορούν τις τελευταίες αυτές ενότητες (Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμοί – βλέπε **Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5**) και περιγράφονται από τους νεότερους προς τους παλαιότερους ως εξής (Φυτρολάκης, 1980):



Σχήμα 3.3: Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, 1992).

Ανώτερο Μειόκαινο

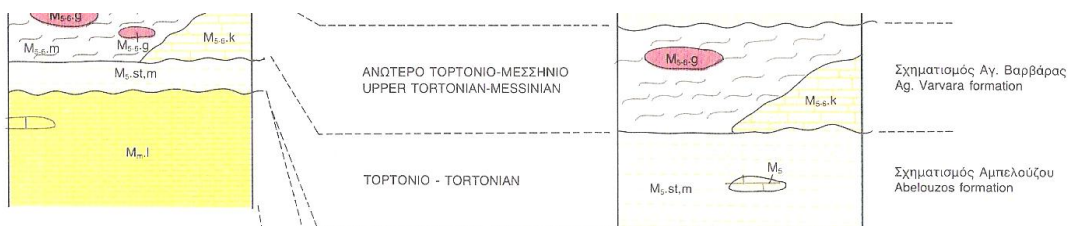
➤ Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας

Βιοκλαστικοί, κατά θέσεις κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, υφαλώδεις ασβεστόλιθοι και ολισθημένοι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, εναλλαγές φυλλωδών και ομοιογενών συχνά ασβεστιτικών μαργών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων και γύψοι παρεμβλλόμενοι στη σειρά των φυλλωδών – ομοιογενών μαργών.

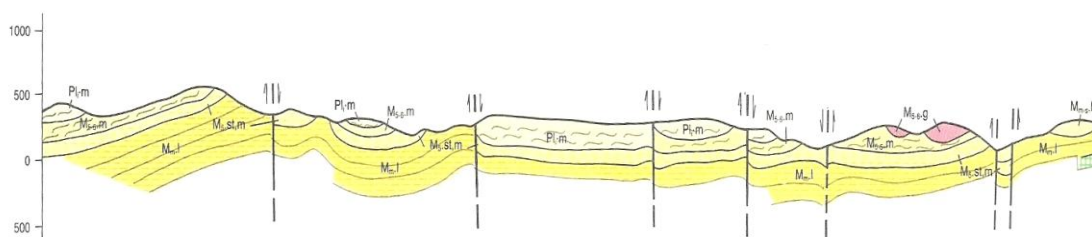
Τορτόνιο

➤ Σχηματισμός Αμπελούζου

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



Σχήμα 3.4: Στρωματογραφική στήλη Νεογενών σχηματισμών στην περιοχή ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, 1992).



Σχήμα 3.5: Γεωλογική τομή με διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ βόρεια της περιοχής ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, 1992).

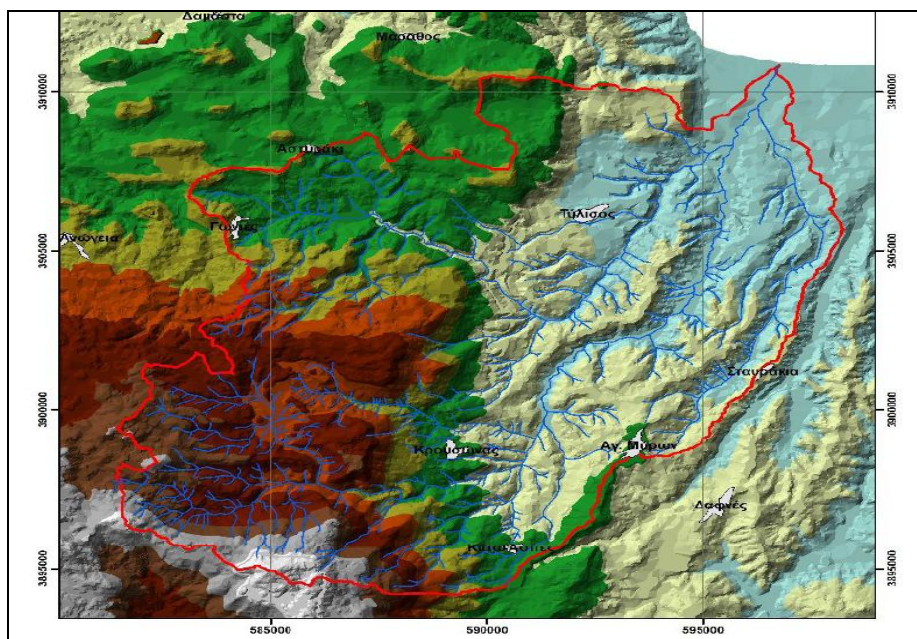
Όπως παρατηρείται και από την μελέτη του γεωλογικού χάρτη της περιοχής (Σχήμα 3.5), η έντονη τεκτονική της περιοχής ενδιαφέροντος χαρακτηρίζεται από κύρια ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Δευτερεύουσες ρηγματώσεις εντοπίζονται σε διευθύνσεις ΝΝΔ-ΒΒΑ.

Ακόμη η ύπαρξη ασβεστολιθικών σχηματισμών διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην αστοχία του επιχώματος. Η έντονη βροχόπτωση του υδρολογικού έτους (2008-2009→160mm, 2009-2010→380mm) και την ύπαρξη διαλείπουσας πηγής στην ανάντη πλευρά του επιχώματος οδήγησαν στον κορεσμό των σχηματισμών και προκάλεσαν την αστοχία.

3.3. Υδρολογία

Η περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται στην υδρολογική λεκάνη Γαζανού χείμαρρου. Ξεκινάει από τις Ανατολικές παρυφές του Ψηλορείτη και το υδρογραφικό της δίκτυο είναι δενδριτικού τύπου με σχετικά αραιούς κλάδους, που ακολουθούν τις κύριες τεκτονικές γραμμές της περιοχής.

Οι κλάδοι αυτοί αναπτύσσονται σχεδόν μονόπλευρα στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, ακολουθώντας τις μορφολογικές κλίσεις των παρυφών του Ψηλορείτη (Σχήμα 3.6).

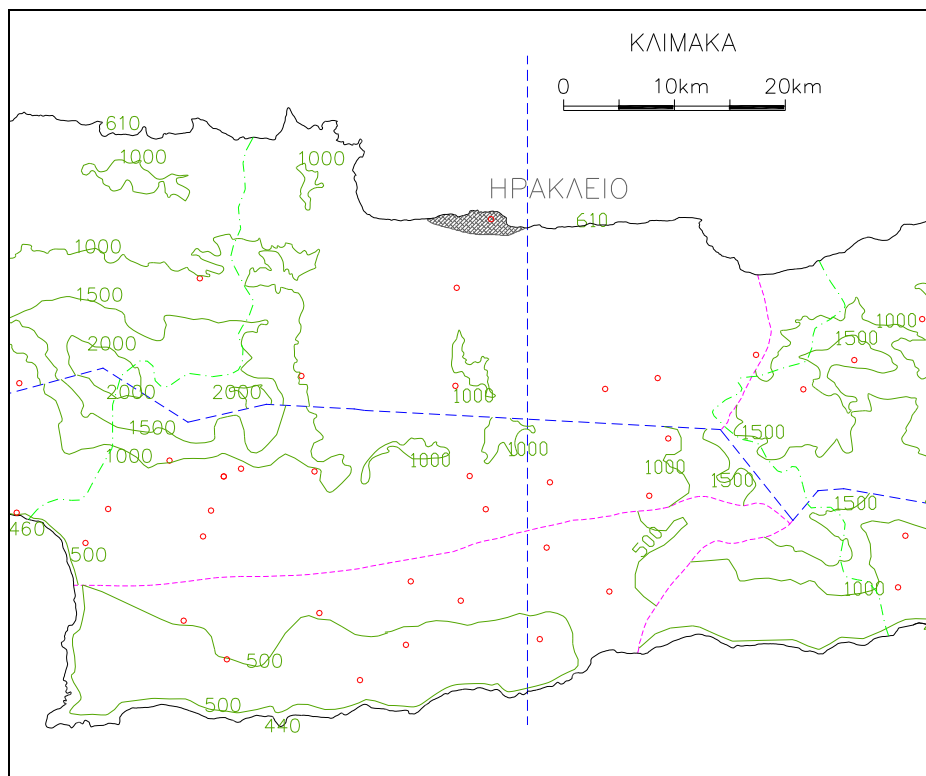


Σχήμα 3.6: Υδρογραφικό δίκτυο και λεκάνη απορροής Γαζανού (Δολαψάκης – Ντολακογιώργου, 2007).

Στην μελέτη «Φυσιογραφική κατανομή και υπολογισμός του συνολικού όγκου βροχόπτωσης στο νησί Κρήτη (Διάκριση μικροκλιματικών ζωνών)» (Καπετανάκης, 2001) γίνεται ανάλυση της κατανομής των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων για το σύνολο της Κρήτης με την χρησιμοποίηση 77 βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών και τον χωρισμό σε μικροκλιματικές ζώνες (βορράς – νότος, δυτική – ανατολική Κρήτη κ.λπ.).

Η διόρθωση – συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων για χρονική περίοδο 20 ετών (1975-95) γίνεται με την μέθοδο της διπλής μάζας και καταλήγει στην αποτύπωση ισοϋέτων καμπυλών.

Στο **Σχήμα 3.7** φαίνεται η μέση ετήσια χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων στον Νομό Ηρακλείου, σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη.



***Σχήμα 3.7: Μέση ετήσια χωρική κατανομή βροχοπτώσεων στον Νομό Ηρακλείου
(Απόσπασμα χάρτη, Καπετανάκης, 2001).***

Παρατηρείται, ότι για την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (κεντρικό – δυτικό τμήμα του Νομού Ηρακλείου) η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται από **750** έως και **1000 mm**.

3.4. Υδρογεωλογία

Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωολογικοί σχηματισμοί, που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι οι καστανοκίτρινες μάργες του Νεογενούς. Επίσης υπάρχουν σημαντικές εμφανίσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων με ενδιαστρώσεις γύψων και περιορισμένης έκτασης αλλουβιακές αποθέσεις σε στρωματογραφική σειρά στην περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του ΒΔ τμήματος του Ν. Ηρακλείου.

Σχετικά με την υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, που απαντώνται στην περιοχή, μπορεί να ειπωθεί, ότι είναι κυρίως ημιπερατοί και πιο συγκεκριμένα (Ντούλης, 2008):

- Σχηματισμοί μέτριας έως χαμηλής διαπερατότητας ($10^{-7} < k < 10^{-5}$ m/sec).

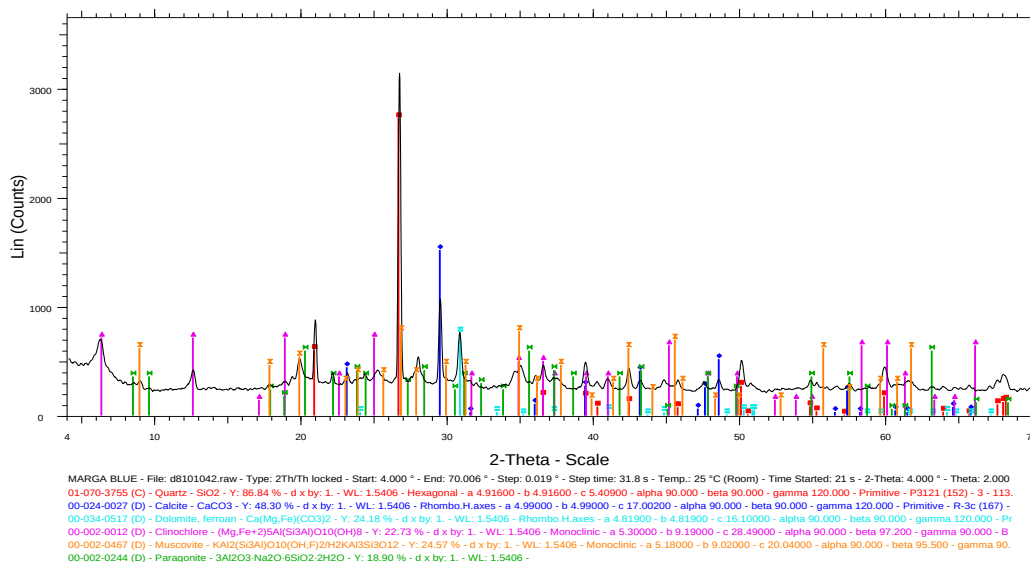
Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα αργιλικά κορήματα (SM), ο ελουβιακός μανδύας (EL), τα πλευρικά κορήματα (SC) και οι διαταραγμένες μάργες (ms.o).

- Σχηματισμοί χαμηλής διαπερατότητας ($k < 10^{-7}$ m/sec).

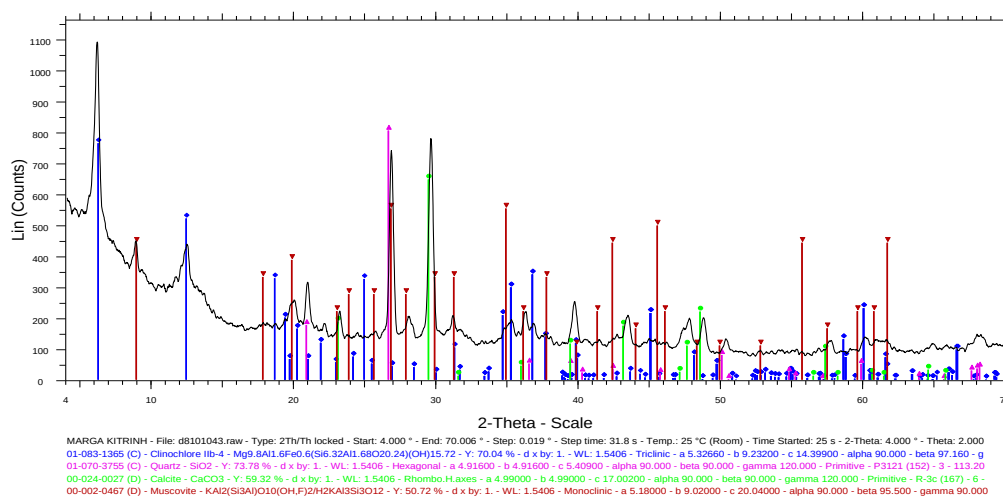
Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι μάργες και τα λατυποπαγή της μάργας.

3.5 Ορυκτολογική ανάλυση

Για τα δύο δείγματα έγινε ορυκτολογική ανάλυση τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.8 και 3.9.



Σχήμα 3.8: Ορυκτολογική ανάλυση κυανότερης μάργας.



Σχήμα 3.9: Ορυκτολογική ανάλυση καστανοκίτρινης μάργας.

Η κύρια ορυκτολογική δομή της κυανότεφρης μάργας αποτελείται από χαλαζία και ασβεστίτη ενώ ακόμη προσδιορίστηκαν δολομίτης, μοσχοβίτης κ.ά. ορυκτά. Η ορυκτολογική δομή της καστανοκίτρινης μάργας αποτελείται από χαλαζία και ασβεστίτη ενώ ακόμη προσδιορίστηκαν μοσχοβίτης κ.ά. ορυκτά.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα δείγματα των μαργών που αναλύθηκαν απαντώνται στο σχηματισμό του Αμπελούζου.

4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησής του. Στο εργαστήριο γίνεται με:

- (1) Την μηχανική μέθοδο (χρήση κοσκίνων) – για εδάφη με διάμετρο (μέγεθος) κόκκων $> 0,075$ mm.
- (2) Την υδρομετρική μέθοδο (αραιόμετρο – καθίζηση σε υγρό περιβάλλον) – για κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No. 200 ($< 0,0075$ mm) και μέχρι διαμέτρου 0,001 mm περίπου.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε με την μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Η διαδικασία είναι ίδια με αυτήν της κοσκίνισης εν ξηρώ, με μόνη διαφορά ότι γίνεται σε υγρό περιβάλλον (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984).

Η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης προτιμήθηκε, γιατί τα δείγματα που λήφθηκαν, είχαν μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε σε όλα τα δείγματα και έχει ως εξής:

Λαμβάνεται ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος ξηρού εδάφους, σύμφωνα με τις προδιαγραφές E105-86. Το δείγμα ζυγίζεται και διέρχεται από μια σειρά κοσκίνων (βλέπε **Φωτογραφία 4.1-α**), που είναι διαβαθμισμένα από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα μεγέθη.



(α)



(β)

Φωτογραφία 4.1: Σειρά κοσκίνων (α) και αραιόμετρο (β) του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκαν.

Τελευταίο τοποθετείται πάντα το κόσκινο Νο. 200 και κάτω από αυτό ο συλλέκτης του κλάσματος, που διέρχεται από το κόσκινο αυτό.

Τα δείγματα αυτά περνώντας από τα κόσκινα διαβρέχονται με απιονισμένο νερό και δονούνται για τον διαχωρισμό τους. Τα δείγματα ξεραίνονται και ζυγίζεται το κλάσμα, που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο. Το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων συγκρίνεται με το αρχικό βάρος του δείγματος, που κοσκινίστηκε, προκειμένου να εξακριβωθεί, αν υπήρξε απώλεια υλικού κατά την διάρκεια της δόνησης.

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της υγρής κοσκίνισης για τα δύο δείγματα μάργας, που εξετάσθηκαν.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα υγρής κοσκίνισης σε δείγμα «κυανότεφρης μάργας».

Αρχικό βάρος ξηρού δείγματος: 230 g								
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος κοσκίνου (mm)	Βάρος κοσκίνου (g)	Βάρος ταψιού (g)	Βάρος κοσκίνου + ταψιού + ξηρού υλικού (g)	Βάρος κοσκίνου + συγκρ. υλικού (g)	Βάρος συγκρ. υλικού (g)	Συγκρ. υλικό (%)	Διερχ. υλικό (%)
4	4,75	468,55	312,97	794,54	481,57	13,02	5,69	94,31
10	2	428,78	311,58	747,25	435,67	6,89	3,01	91,30
16	1,18	405,87	342,70	750,22	407,52	1,65	0,72	90,58
40	0,425	350,14	516,90	869,36	352,46	2,32	1,01	89,56
60	0,250	321,52	439,90	762,62	322,72	1,20	0,52	89,04
140	0,106	310,55	438,72	755,13	316,41	5,86	2,56	86,48
200	0,075	299,52	118,19	300,62	300,62	1,10	0,48	86,00
Συλλέκτης		283,36	438,90	919,02	480,12	196,76	86,00	0,00
Άθροισμα	-				-	228,80	100,00	-

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα υγρής κοσκίνισης σε δείγμα «καστανοκίτρινης μάργας».

Αρχικό βάρος ξηρού δείγματος: 222 g								
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος κοσκίνου (mm)	Βάρος κοσκίνου (g)	Βάρος ταψιού (g)	Βάρος κοσκίνου + ταψιού + ξηρού υλικού (g)	Βάρος κοσκίνου + συγκρ. υλικού (g)	Βάρος συγκρ. υλικού (g)	Συγκρ. υλικό (%)	Διερχ. υλικό (%)
4	4,75	468,55	418	902	484	15,45	7,03	92,97
10	2	428,78	439	879	440	11,22	5,11	87,86
16	1,18	405,87	440	850	410	4,13	1,88	85,98
40	0,425	350,14	435	792	357	6,86	3,12	82,86
60	0,250	321,52	342	670	328	6,48	2,95	79,91
140	0,106	310,55	313	628	315	4,45	2,03	77,88
200	0,075	299,52	408	714	306	6,48	2,95	74,94
Συλλέκτης		283,36	119	567	448	164,64	74,94	0,00
Άθροισμα	-				-	219,71	100	

Ακόμη χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα (40g) ξηρού εδαφικού δείγματος, που διέρχεται από το κόσκινο No. 200, όπως ορίζεται από τις προδιαγραφές ASTM D422, η οποία τοποθετείται σε ογκομετρικό κύλινδρο, που πληρούται με απιονισμένο νερό

μέχρι τα 1000 ml με αντικρωκιδωτικό 5% κ.β. για να αποφευχθούν τυχόν συσσωματώματα. Η καθίζηση των εδαφικών κόκκων στο διάλυμα που προκύπτει μετά από ανάδευση είναι πιθανό να διαρκέσει πολλές ώρες ή και ημέρες.

Κατά την διάρκεια της καθίζησης καταγράφεται, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η μάζα των εδαφικών κόκκων, που βρίσκονται «εν αιωρήσει». Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιείται το αραιόμετρο (ή πυκνόμετρο ή υδρόμετρο) (βλέπε **Φωτογραφία 4.1-β**). Ταυτόχρονα καταγράφονται και μετρήσεις θερμοκρασίας (T) του διαλύματος.

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

$$u = \frac{d^2 \cdot (\rho_S - \rho_F)}{1800 \cdot \eta} \quad [4.1]$$

όπου, u: ταχύτητα καθίζησης (cm/sec),
 d: διάμετρος εδαφικών κόκκων (mm),
 ρ_S : πυκνότητα εδαφικών κόκκων (g/cm³),
 ρ_F : πυκνότητα υγρού μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η καθίζηση (g/cm³),
 και
 η : ιξώδες του διαλύματος (g·sec/cm²).

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

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

$$w_d = \frac{R \cdot a \cdot 100}{W} \quad [4.2]$$

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

R : διορθωμένη ένδειξη του αραιομέτρου (g),

a : συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας εδαφικών κόκκων (από πίνακες), και

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

Σημειώνεται, ότι το w_d αντιστοιχεί στο ποσοστό του δείγματος, που διέρχεται από το κόσκινο Νο. 200. Αυτό το ποσοστό θα πρέπει να μετατραπεί επί του συνόλου του αρχικού δείγματος (πριν την κοσκίνηση). Επίσης η αρχική ένδειξη του αραιομέτρου (R_0) διορθώνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$R = R_0 + C_M + C_T + C_D \quad [4.3]$$

όπου, C_M : διόρθωση μηνίσκου (= +0.50 g για το συγκεκριμένο αραιόμετρο),

C_D : διόρθωση παράγοντα διασποράς (= -7.92 g για το συγκεκριμένο αραιόμετρο), και

C_T : διόρθωση θερμοκρασίας (g), η οποία για το συγκεκριμένο αραιόμετρο ακολουθεί τη σχέση:

$$C_T = 0,31 \cdot T - 4,35 \quad [4.4]$$

όπου, T : θερμοκρασία διαλύματος (°C).

Στους Πίνακες 4.3 και 4.4 φαίνονται τα αποτελέσματα των αραιομετρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν στα δύο εξεταζόμενα δείγματα μάργας.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αραιομέτρησης σε δείγμα «κυανότεφρης μάργας».

Βάρος ξηρού δείγματος, W (g)					40.00
Πυκνότητα εδαφικών κόκκων, ρ_s (g/cm ³)					2.135
Συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας εδαφικών κόκκων, a					1,171
Χρόνος, t (min)	Αρχική ανάγνωση αραιομέτρου, R ₀ (g)	Θερμοκρασία, T (°C)	Διορθωμένη ανάγνωση αραιομέτρου, R (g)	Διάμετρος κόκκων «εν αιωρήσει», d (mm)	Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος (%)
0	35	28,7	32,13	0,0750	86,00
1	35	28,7	32,13	0,0689	80,90
2	34	28,7	31,13	0,0347	78,38
4	32	28,7	29,13	0,0249	73,34
8	30	28,7	27,13	0,0178	68,31
15	28	28,6	25,10	0,0132	63,19
30	25	28,6	22,10	0,0095	55,64
60	21	28,4	18,03	0,0069	45,41
120	20	28,3	17,00	0,0049	42,81
240	15	28,1	11,94	0,0036	30,07
950	9	27,7	5,82	0,0019	14,65

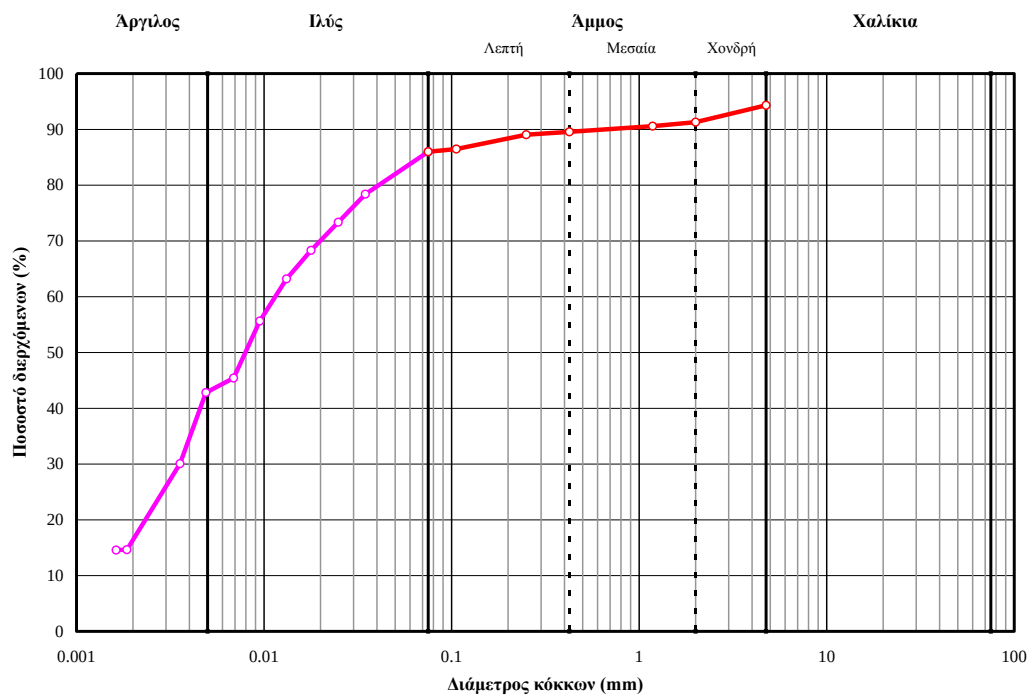
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα αραιομέτρησης σε δείγμα «καστανοκίτρινης μάργας».

Βάρος ξηρού δείγματος, W (g)					40.00
Πυκνότητα εδαφικών κόκκων, ρ_s (g/cm ³)					2.510
Συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας εδαφικών κόκκων, a					1,035
Χρόνος, t (min)	Αρχική ανάγνωση αραιομέτρου, R ₀ (g)	Θερμοκρασία, T (°C)	Διορθωμένη ανάγνωση αραιομέτρου, R (g)	Διάμετρος κόκκων «εν αιωρήσει», d (mm)	Ποσοστό επί του συνόλου του δείγματος (%)
0	42	22,6	37,24	0,0750	74,94
1	41	22,6	36,24	0,0613	68,58
2	39	22,6	34,24	0,0310	64,79
4	35	22,6	30,24	0,0226	57,22
8	30	22,5	25,21	0,0165	47,70
15	25	22,5	20,21	0,0124	38,24
30	21	22,5	16,21	0,0090	30,67
60	16	22,5	11,21	0,0065	21,21
120	13	22,5	8,21	0,0047	15,53
240	11	21,9	6,02	0,0034	11,39
950	10	21,0	4,74	0,0017	8,97

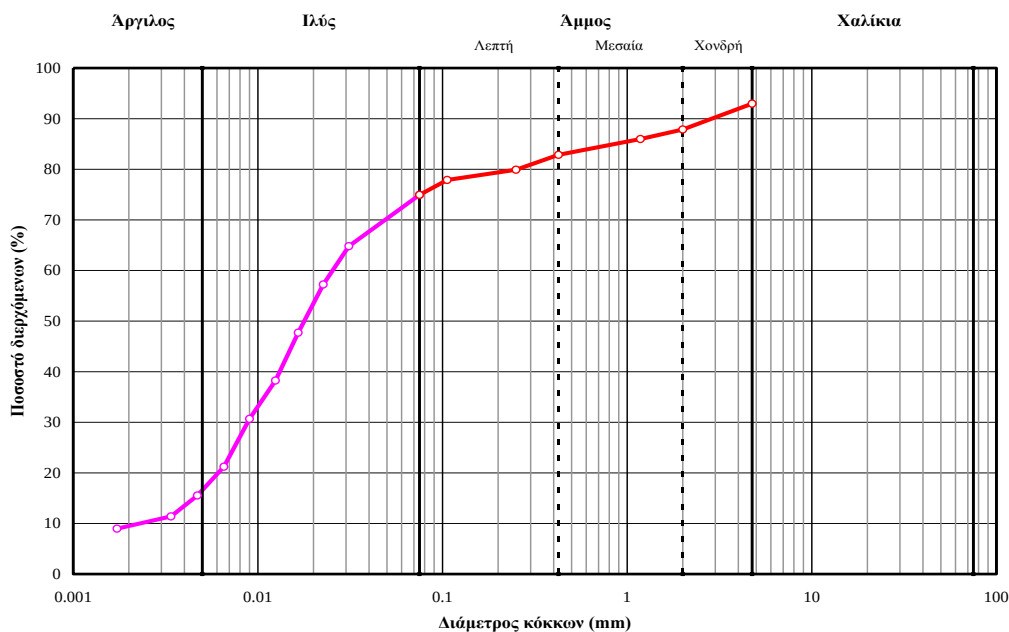
4.2. Κοκκομετρική καμπύλη

Με βάση τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης σχεδιάστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες (ASTM D422) των δύο δειγμάτων μάργας (βλέπε **Σχήματα 4.1 και 4.2**), όπου στον οριζόντιο άξονα (λογαριθμικός) απεικονίζεται η διάμετρος των κόκκων (d), ενώ στον κατακόρυφο άξονα (γραμμικός) απεικονίζονται τα ποσοστά διερχόμενων (ή αιωρούμενων) κόκκων επί του συνόλου του δείγματος.

Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει το συμπέρασμα, ότι τα δύο δείγματα μας είναι καλά διαβαθμισμένα.



Σχήμα 4.1: Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος «κνανότεφρης μάργας».



Σχήμα 4.2: Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος «καστανοκίτρινης μάργας».

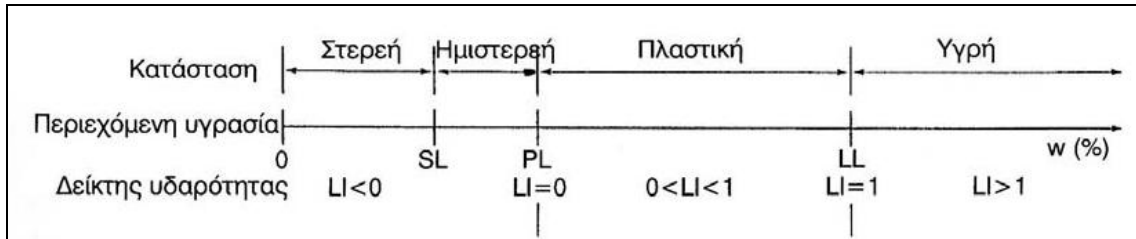
4.3. Προσδιορισμός ορίων Atterberg

Ένα από τα χαρακτηριστικά διάκρισης των συνεκτικών εδαφών, είναι ότι μπορούν να υποστούν πλαστική παραμόρφωση χωρίς θραύση. Φυσικά η πλαστικότητα, που επιδεικνύουν, εξαρτάται μεταξύ άλλων από την περιεκτικότητα σε νερό.

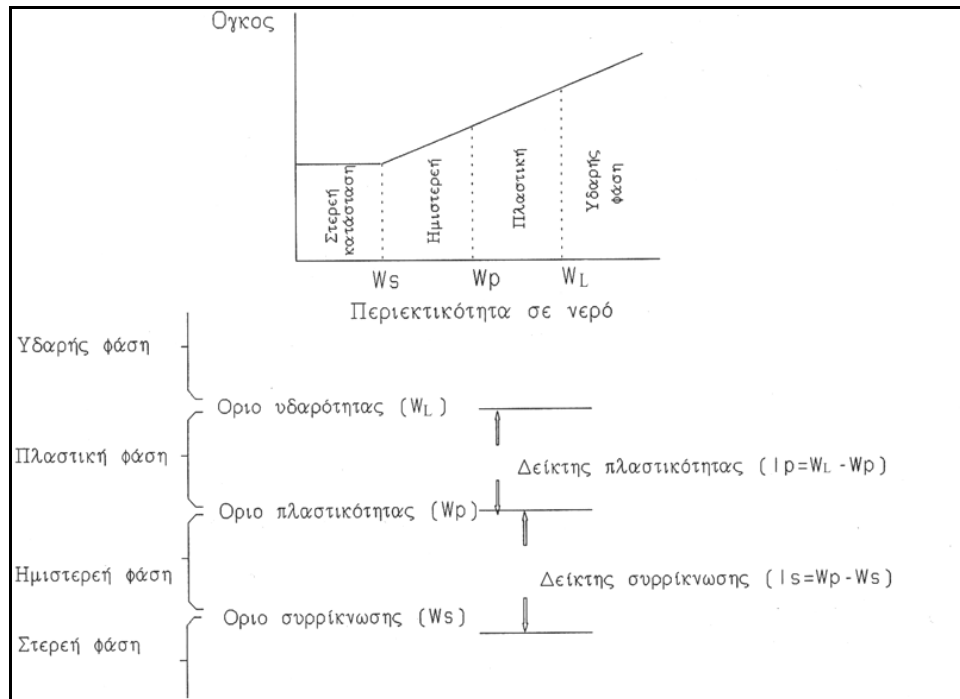
Το όριο υδαρότητας θεωρείται σαν η περιεκτικότητα σε νερό, στην όποια το έδαφος παρουσιάζει μια συγκεκριμένη αντοχή σε διάτμηση.

Αυτή η αυθαίρετη οριακή τιμή χαρακτηρίζει το έδαφος, το οποίο εάν τοποθετηθεί στο κύπελλο της συσκευής Casagrande, έχει διαιρεθεί με ένα συγκεκριμένων διαστάσεων εργαλείο αυλάκωσης, απαιτεί 25 χτυπήματα για να εκδηλωθεί ροή του εδάφους και να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12,7 mm. Η περιεκτικότητα σε νερό, που διαχωρίζει την υδαρή από την πλαστική κατάσταση του εδάφους, καλείται όριο υδαρότητας LL (ή w_L).

Αν η υγρασία του εδάφους μειωθεί σταδιακά κάτω από το όριο υδαρότητας, τότε ο όγκος και η πλαστικότητα του μειώνονται αντίστοιχα (βλέπε **Σχήματα 4.3 και 4.4**).



Σχήμα 4.3: Μεταβολή της συμπεριφοράς αργιλικού εδάφους ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984).



Σχήμα 4.4: Σχέσεις φυσικής κατάστασης και όγκου με τα όρια Atterberg (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984).

Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας, το έδαφος θα σταματήσει να επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά και θα αρχίσει να παραμορφώνεται δύσκολα (θα γίνει δηλαδή

δύσκαμπτο). Η κατάσταση αυτή, στην οποία περιέρχεται, χαρακτηρίζεται σαν ημιστερεή.

Τέλος, με περαιτέρω μείωση της υγρασίας, θα εμφανίσει ψαθυρή θραύση (στερεή κατάσταση). Η περιεκτικότητα σε νερό, που αντιστοιχεί στο όριο μεταξύ της πλαστικής και ημιστερεής κατάστασης, καλείται όριο πλαστικότητας PL (ή w_p) (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984).

Η διαφορά μεταξύ του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας, καλείται δείκτης πλαστικότητας PI (ή I_p) και ορίζεται με τη σχέση:

$$PI = LL - PL \quad [4.5]$$

Αμμώδη εδάφη επιδεικνύουν όριο υδαρότητας (LL) της τάξης του 20% και δείκτη πλαστικότητας (PI) από 0 μέχρι 5. Ιλείς και άργιλοι μπορεί να παρουσιάζουν όριο υδαρότητας από 80 – 100%, ενώ άργιλοι με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά υλικά είναι δυνατόν να εμφανίσουν ακόμα υψηλότερες τιμές (> 100%).

Ανάλογα με τον δείκτη πλαστικότητας (PI), το έδαφος χαρακτηρίζεται όπως υποδεικνύει ο **Πίνακας 4.5**.

Πίνακας 4.5: Βαθμός πλαστικότητας εδαφών (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984).

PI	Χαρακτηρισμός
0 – 5	Μη πλαστικό
5 – 15	Λίγο πλαστικό
15 – 40	Πλαστικό
> 40	Πολύ πλαστικό

Ένας άλλος δείκτης, που μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε ανάλογα με τη φυσική περιεχόμενη υγρασία του εδάφους, αν θα επιδείξει πλαστικότητα, αν θα είναι ψαθυρό ή ακόμη και αν θα συμπεριφερθεί σαν παχύρρευστο υγρό, είναι ο δείκτης υδαρότητας

(LI). Ορίζεται από το λόγο της διαφοράς μεταξύ του περιεχομένου φυσικού ύδατος (w) και του ορίου πλαστικότητας προς τον δείκτη πλαστικότητας.

Δίδεται από τη σχέση:

$$LI = \frac{w - PL}{PI} \quad [4.6]$$

Η επίδραση του LI στη συμπεριφορά ενός αργιλικού εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Εάν $LI = 1$, το έδαφος είναι από πλευράς υγρασίας στο όριο υδαρότητας ($w = LL$) και όταν $LI = 0$, στο όριο πλαστικότητας ($w = PL$).

4.3.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας (Casagrande test)

Για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Casagrande, που διακρίνεται στην **Φωτογραφία 4.3**.



Φωτογραφία 4.3: *Συσκευή Casagrande του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, που χρησιμοποιήθηκε.*

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Λαμβάνεται δείγμα βάρους τουλάχιστον 200 g από το γεωυλικό, που έχει αναμιχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο ανοίγματος Νο. 40 (425 μm). Το υλικό τοποθετείται στην κάψα, προστίθεται μικρή ποσότητα νερού και αναμειγνύεται καλά με την σπάτουλα, μέχρις ότου δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη, παχύρρευστη μάζα (πάστα).

Το δείγμα τοποθετείται στο κύπελλο της συσκευής Casagrande, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια. Το μέγιστο πάχος του στρώματος πρέπει να είναι περίπου 1 cm.

Το εδαφικό δείγμα χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη σύροντας το εργαλείο αυλάκωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου. Περιστρέφεται ο χειροκίνητος στρόφαλος της συσκευής με ρυθμό 2 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο και μετρώνται οι πτώσεις, που απαιτούνται, έως ότου οι δυο πλευρές του δείγματος ενωθούν στην βάση της χαραγής και σε μήκος 12,7 mm.

Εάν ο αριθμός των περιστροφών, που απαιτούνται, είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνεται με τη σπάτουλα ποσότητα δείγματος από την περιοχή της επαφής (της κλειστής πλέον αύλακας). Η ποσότητα αυτή τοποθετείται σε γυάλινο υποδοχέα, μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις, και στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας.

Στη συνέχεια, μεταβάλλεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, είτε προσθέτοντας νερό στο ίδιο ή σε άλλο δείγμα, το οποίο παρασκευάζεται ανάλογα. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρις ότου προσδιοριστεί ένας αριθμός τουλάχιστον τεσσάρων τιμών περιεκτικότητας σε νερό, για τις οποίες ο αριθμός των πτώσεων του κυπέλλου, που απαιτούνται για να κλείσει η αύλακα, είναι μεταξύ 5 και 40.

Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται τα ξηρά τους βάρη. Η απώλεια βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

Από τις μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, προέκυψαν τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στους **Πίνακες 4.6** και **4.7**.

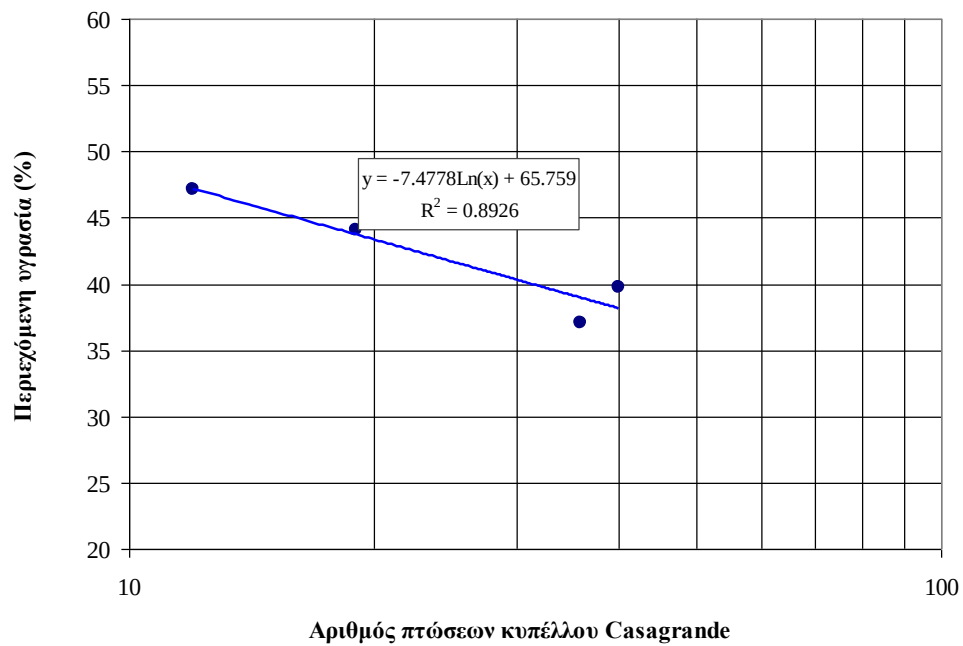
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίου υδαρότητας «κυνάντεφρης μάργας».

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός πτώσεων κυπέλλου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια υγρασίας (g)	Ποσοστό υγρασίας (%)
1	40	42,49	47,83	46,31	5,34	3,82	1,52	39,8
2	36	43,79	48,23	47,03	4,44	3,24	1,2	37,0
3	19	41,36	47,6	45,69	6,24	4,33	1,91	44,1
4	12	40,27	46,14	44,26	5,87	3,99	1,88	47,1

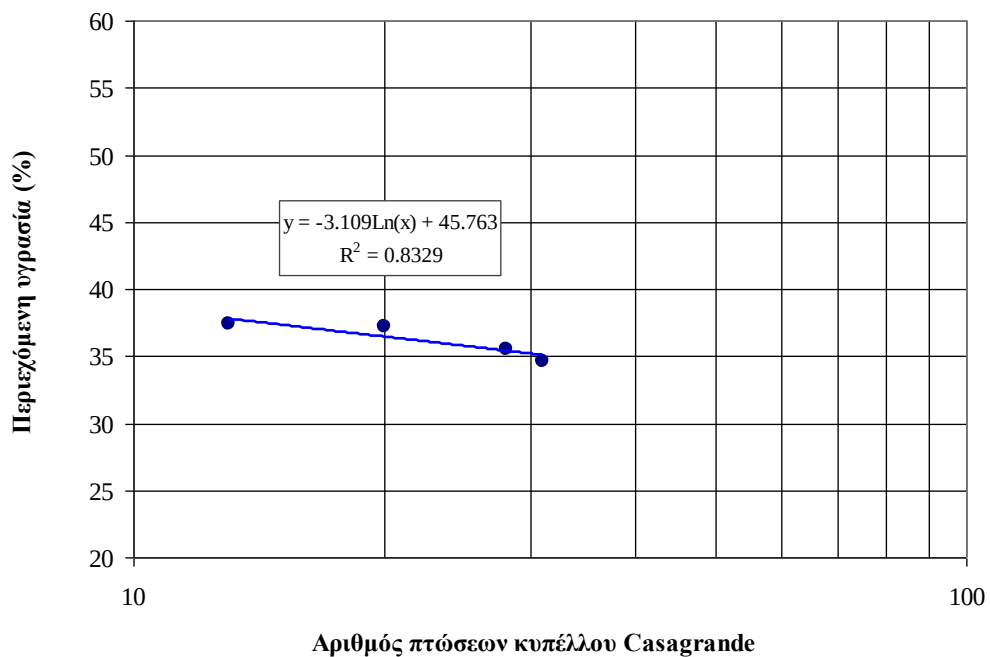
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίου υδαρότητας «καστανοκίτρινης μάργας».

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός πτώσεων κυπέλλου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια υγρασίας (g)	Ποσοστό υγρασίας (%)
1	31	40,61	43,76	42,95	3,15	2,34	0,81	34,6
2	28	44,31	48,62	47,49	4,31	3,18	1,13	35,5
3	20	42,52	47,65	46,26	5,13	3,74	1,39	37,2
4	13	40,41	46,25	44,66	5,84	4,25	1,59	37,4

Από τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων κατασκευάστηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα του αριθμού των πτώσεων του κυπέλλου της συσκευής Casagrande και της περιεχόμενης υγρασίας (**Σχήματα 4.5** και **4.6**), από όπου και υπολογίστηκε το όριο υδαρότητας κάθε δείγματος ως η υγρασία, που αντιστοιχεί στις 25 πτώσεις.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα υπολογισμού ορίου υδαρότητας «κυανότεφρης μάργας».



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα υπολογισμού ορίου υδαρότητας «καστανοκίτρινης μάργας».

Από τα διαγράμματα:

- το όριο υδαρότητας της «κυανότεφρης μάργας» είναι: **LL = 42,6%**.
- το όριο υδαρότητας της «καστανοκίτρινης μάργας» είναι: **LL = 35,9%**.

4.3.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Ελήφθησαν περίπου 20 g εδαφικού υλικού, που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο Νο. 40. Το δείγμα τοποθετείται μέσα στην κάψα και προστίθεται νερό ενώ αναμειγνύεται με τη σπάτουλα, ώστε να αποκτήσει πλαστικότητα. Η μάζα κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και μιας γυάλινης πλάκας ή άλλης ομαλής επιφάνειας με την απαιτούμενη πίεση, ώστε να σχηματισθεί ραβδίσκος ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm σε όλο το μήκος του. Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση ραβδίσκου διαμέτρου 3 mm, το δείγμα αναπλάθεται προσθέτοντας περισσότερο νερό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Εάν το έδαφος διαμορφώνει ραβδίσκο με διάμετρο μικρότερη των 3 mm, αναπλάθεται σε βώλο και η διαδικασία κυλίνδρωσης επαναλαμβάνεται σε ομαλή επιφάνεια, που καλύπτεται με τραχείας υφής χαρτί. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, προσεγγίζεται τελικά μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκος, κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρός του κάτω από 3 mm, θρυμματίζεται. Τα θρύμματα τοποθετούνται σε υποδοχέα (τριβλίο Petri) και μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας. Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται τα ξηρά τους βάρη. Η απώλεια βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

Από τις μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας, προέκυψαν τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στους **Πίνακες 4.8 και 4.9**.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίου πλαστικότητας «κυανότεφρης μάργας».

Αριθμός δοκιμίου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια υγρασίας (g)	Ποσοστό υγρασίας (%)
1	39,14	40,62	40,37	1,48	1,23	0,25	20,33
2	41,36	42,28	42,12	0,92	0,76	0,16	21,05
3	41,56	42,59	42,41	1,03	0,85	0,18	21,18
4	42,88	43,34	43,25	0,46	0,37	0,09	24,32

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίου πλαστικότητας «καστανοκίτρινης μάργας».

Αριθμός δοκιμίου	Βάρος υποδοχέα (g)	Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια υγρασίας (g)	Ποσοστό υγρασίας (%)
1	40,31	41,33	41,16	1,02	0,85	0,17	20,00
2	41,34	42,29	42,16	0,95	0,82	0,13	15,85
3	41,45	42,46	42,31	1,01	0,86	0,15	17,44
4	41,01	42,30	42,10	1,29	1,09	0,20	18,35

Τελικά, το όριο πλαστικότητας υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των μετρήσεων υγρασίας:

- το όριο πλαστικότητας της «κυανότεφρης μάργας» βρέθηκε: **PL = 21,7%**.
- το όριο πλαστικότητας της «καστανοκίτρινης μάργας» βρέθηκε: **PL = 17,9%**.

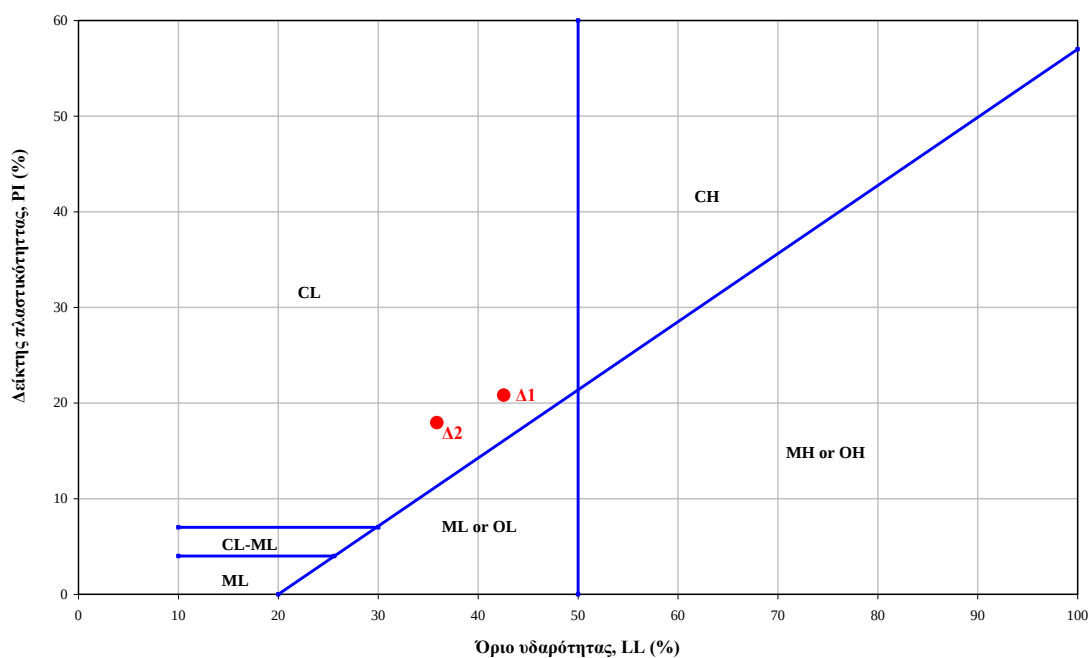
Βάση του **Πίνακα 4.5** τα δυο δείγματα χαρακτηρίζονται ως πλαστικά.

4.4. Ταξινόμηση με βάση το «Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης»

Για την ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών χρησιμοποιείται κυρίως το «Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS)» Σχήμα 4.8. Χρησιμοποιήθηκαν σαν κριτήρια διαχωρισμού τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης και τα όρια Atterberg.

Οι συμβολισμοί, που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνουν ένα κύριο και ένα δευτερεύον γράμμα. Το κύριο γράμμα αναφέρεται στο κοκκομετρικό μέγεθος, που επικρατεί, κατά βάρος. Το δεύτερο γράμμα, για τα χονδρόκοκκα εδάφη (χάλικες, άμμος), υποδεικνύει τη διαβάθμισή τους ή την παρουσία λεπτόκοκκου υλικού (αργίλου ή ιλύος) σαν δευτερεύον συστατικό.

Στα λεπτόκοκκα εδάφη (ιλύς, άργιλος), το δεύτερο γράμμα έχει σχέση με τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας και καθορίζεται από το «Διάγραμμα Πλαστικότητας Casagrande» (βλέπε Σχήμα 4.7).



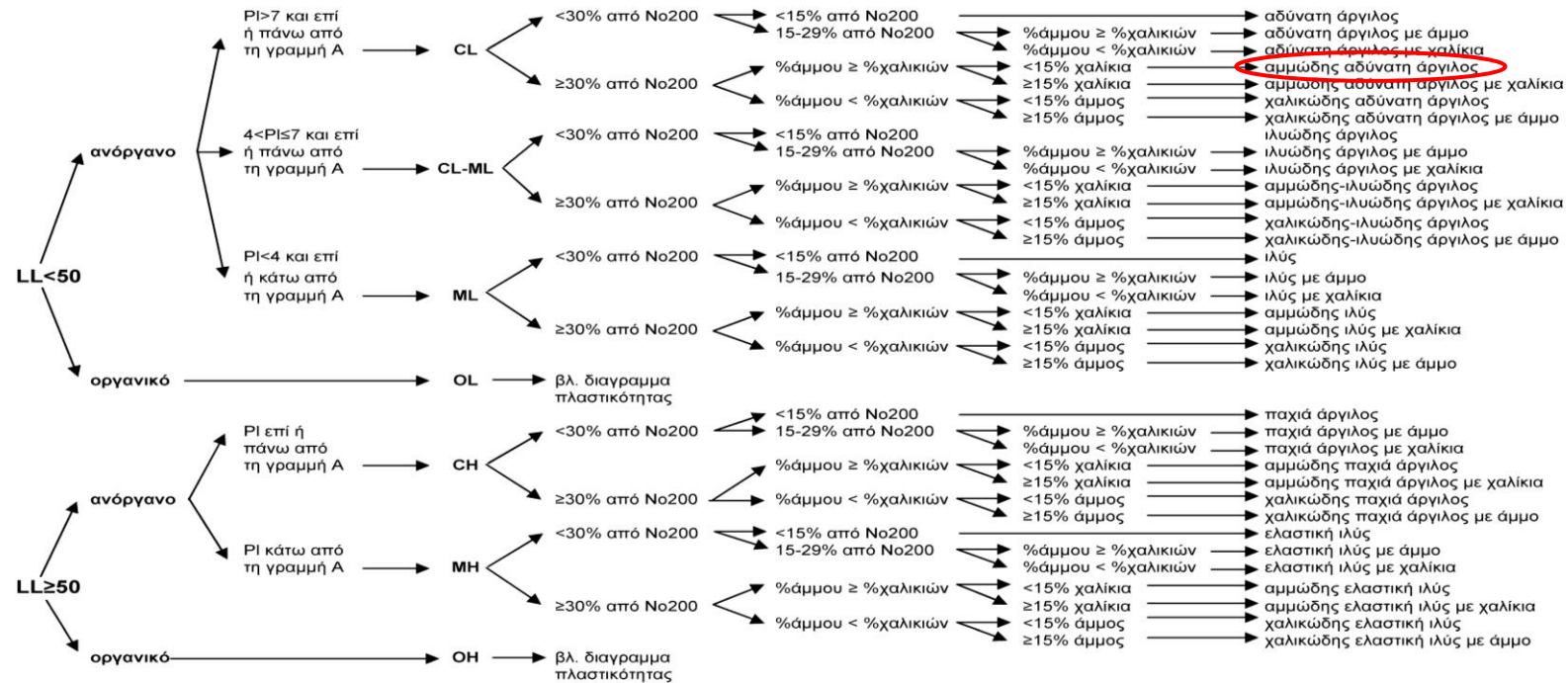
Σχήμα 4.7: Θέση δειγμάτων «κυανότεφρης μάργας» (Δ1) και «καστανοκίτρινης μάργας» (Δ2) στο «Διάγραμμα Πλαστικότητας Casagrande».

Συγκεκριμένα, το δείγμα λεπτόκοκκου εδάφους (ή το λεπτόκοκκο κλάσμα του εδάφους) προβάλλεται ως σημείο με συντεταγμένες LL και PI και ταξινομείται ανάλογα με την θέση του στο διάγραμμα πλαστικότητας.

Όπως λοιπόν φαίνεται στο Σχήμα 4.8, από την προβολή των δύο εξεταζόμενων δειγμάτων μάργας στο διάγραμμα πλαστικότητας, και τα δύο δείγματα χαρακτηρίζονται ως «**CL**».

Τελικά, με βάση την κοκκομετρία, τα όρια Atterberg και τον χαρακτηρισμό από το διάγραμμα πλαστικότητας, και χρησιμοποιώντας το κατάλληλο διάγραμμα ροής του «Ενοποιημένου Συστήματος Ταξινόμησης» (Σχήμα 4.8), και τα δύο δείγματα ταξινομούνται ως «**αμμώδης αδύνατη άργιλος**».

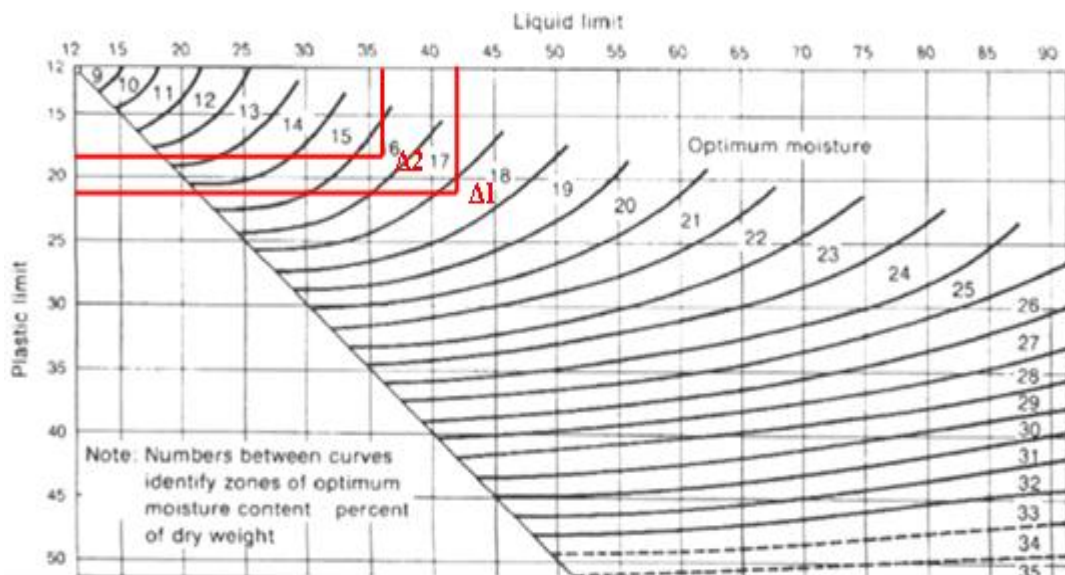
Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι βάσει του Πίνακα 2.2 τα υλικά μας ταξινομούνται από εξαιρετικά ως καλά για την κατασκευή επιχωμάτων, και βάσει του Πίνακα 2.3 η καστανοκίτρινη μάργα ως κατάλληλη και η κυανότεφρη μάργα ως αποδεκτή για την κατασκευή του σώματος του επιχώματος.



Σχήμα 4.8: Ταξινόμηση εξεταζόμενων δειγμάτων: Διάγραμμα ροής του «Ενοποιημένου Συστήματος Ταξινόμησης (USCS)» για λεπτόκοκκο έδαφος (50% ή περισσότερο διέρχεται από το κόσκινο No. 200).

4.5. Εκτίμηση βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης

Με βάση τα όρια Atterberg και χρησιμοποιώντας το νομόγραμμα στο **Σχήμα 4.9** (Στειακάκης, 2008, από Craig, 1984), υπολογίστηκε η τιμή του OMC (αναμενόμενη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης). Από την τιμή αυτή είναι δυνατό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την ομοιογένεια των μελετώμενων γεωυλικών.



Σχήμα 4.9: Νομόγραμμα προσδιορισμού OMC «κvanότεφρης μάργας» (Δ1) και «καστανοκίτρινης μάργας» (Δ2).

Στον **Πίνακα 4.10** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των ορίων Atterberg και του OMC και για τα δύο δείγματα μάργας που εξετάστηκαν.

Πίνακας 4.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσδιορισμού ορίων Atterberg και OMC.

Παράμετρος	Τιμή	
	Κυανότεφρη μάργα	Καστανοκίτρινη μάργα
LL (Όριο υδαρότητας)	42,6	35,9
PL (Όριο πλαστικότητας)	21,7	17,9
PI (Δείκτης πλαστικότητας)	20,9	18,0
OMC (Αναμενόμενη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης)	17,2	15,5

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η παραμόρφωση μιας εδαφικής μάζας οφείλεται κατά κύριο λόγο στην σχετική ολίσθηση των σωματιδίων, που την αποτελούν. Κατά συνέπεια, η αντίσταση του εδάφους σε διατμητική παραμόρφωση εξαρτάται από την διατμητική αντίσταση, που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων. Η μικρότερη δύναμη, που απαιτείται για την σχετική μετακίνησή τους, εκφράζει την διατμητική αντοχή του εδάφους (Στειακάκης, 2008).

Η διατμητική αντοχή οφείλεται:

1. Στις ελκτικές δυνάμεις, που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από τους δεσμούς, που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ των κόκκων (συγκόλληση), και μπορεί να λεχθεί ότι προσδίδουν στο έδαφος διατμητική αντοχή ανάλογης φύσης με αυτή των στερεών σωμάτων. Το αίτιο αυτό εκδήλωσης διατμητικής αντοχής ονομάζεται «**συνοχή**» του εδάφους.
2. 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, «**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 αντοχής, που οφείλεται στην συνοχή, και αυτής, που οφείλεται στην εσωτερική τριβή.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους, τη στιγμή της θραύσης του κατά ολίσθηση, δίνεται από τη σχέση του Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad [5.1]$$

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

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

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad [5.2]$$

ή

$$\tau' = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi' \quad [5.3]$$

όπου, σ' : η ενεργή κάθετη τάση, που ασκείται στο επίπεδο διάτμησης ($= \sigma - u$),
 u : η πίεση του νερού των πόρων, και
 c' , 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 μια από τις παρακάτω μορφές διάτμησης (Στειακάκης, 2008):

- Απευθείας 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 μετριέται η απαιτούμενη για τη 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 (συσκευές ελεγχόμενης παραμόρφωσης) (Στειακάκης, 2008).

Η δεύτερη μέθοδος είναι η συνηθέστερη και σύμφωνα με αυτήν λειτουργεί η μηχανή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

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 την δοκιμή.

Η μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων της διατμητικής αντοχής των γεωλογικών σχηματισμών είναι αυτή της «βραδείας δοκιμής στερεοποιημένου δοκιμίου», θεωρώντας ότι προσδίδει καλύτερα τις συνθήκες αντοχής μακροχρόνια, προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη πίεσης του νερού των πόρων.

Η συσκευή διάτμησης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, η οποία και χρησιμοποιήθηκε, είναι της εταιρείας Wykem Farrance και φαίνεται στην **Φωτογραφία 5.1**.



Φωτογραφία 5.1: Συσκευή διάτμησης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκε.

5.1. Διαδικασία

Οι δοκιμές βραδείας διάτμησης στερεοποιημένου δοκιμίου έγιναν σε τρία (3) δείγματα «κυανότεφρης μάργας», τα Δ1α, Δ1β και Δ1γ και σε τρία (3) δείγματα «καστανοκίτρινης μάργας», τα Δ2α, Δ2β και Δ2γ. Όλα τα δείγματα διατμήθηκαν σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία κατά τα πρότυπα ASTM D-3080:

Συναρμολογούνται τα τμήματα του υποδοχέα και μετρώνται οι διαστάσεις του (βάθος, πλάτος / μήκος ή διάμετρος), ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εγκάρσιας διατομής A και της πυκνότητας του εδαφικού δοκιμίου. Τοποθετείται ο πορόλιθος βάσης και το έδαφος υπό μορφή στρώσεων μέχρι 5 mm από την κορυφή του υποδοχέα.

Επιπεδώνεται η επιφάνεια του εδάφους και τοποθετείται ο πορόλιθος της κορυφής και το εξάρτημα φόρτισης (μεταλλική πλάκα). Το δοκίμιο αφήνεται να κορεστεί σε νερό μόνο υπό το βάρος της μεταλλικής πλάκας (εξάρτημα φόρτισης) για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να πληρωθεί κάθε κενό του δοκιμίου με νερό στους πόρους.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας προσαρμόζεται ο ζυγός φόρτισης της συσκευής διάτμησης επί της μεταλλικής πλάκας φόρτισης. Προσαρμόζεται το μηκυνσιόμετρο για την μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης. Το δείγμα αφήνεται να στερεοποιηθεί για τουλάχιστον 24 ώρες υπό το βάρος μόνο του ζυγού φόρτισης.

Εφαρμόζεται βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού φόρτισης, για νέα στερεοποίηση (24 ώρες) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τελικό βάρος για την διάτμηση που έχει αποφασισθεί από πριν. Η στερεοποίηση έγινε με σταδιακή φόρτιση για την αποφυγή απωλειών υλικού και έντονων υποχωρήσεων. Τελικά, υπολογίζεται ο ρυθμός διάτμησης, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

Εφαρμόζεται το τελικό βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού φόρτισης ώστε να επιβληθεί στο δοκίμιο κατακόρυφο φορτίο P_v και να ασκηθεί η επιδιωκόμενη κατακόρυφη τάση σ_n . Προσαρμόζονται όλα τα μηκυνσιόμετρα (3) για την μέτρηση των διατμητικών και κατακόρυφων μετατοπίσεων καθώς και της οριζόντιας δύναμης.

Αφαιρούνται οι κατακόρυφοι κοχλίες, που συγκρατούν τα δυο τμήματα του υποδοχέα, και ανυψώνεται το ανώτερο πλαίσιο στρέφοντας ανάλογα τους κοχλίες ανύψωσης. Επιλέγεται η ταχύτητα της οριζόντιας μετατόπισης. Καταγράφονται οι αρχικές ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων και αρχίζει η διάτμηση.

Η δοκιμή συνεχίζεται μέχρις ότου η διατμητική δύναμη αποκτήσει σταθερή τιμή ή μέχρις ότου η διατμητική παραμόρφωση φτάσει το 10% της αρχικής διαμέτρου το δοκιμίου.

Με βάση τα παραπάνω παρατηρείται, ότι κάθε διάτμηση με την μέθοδο της «βραδείας δοκιμής στερεοποιημένου δοκιμίου», που επιλέχθηκε περιλαμβάνει 4 στάδια:

- A. Προετοιμασία του δείγματος.
- B. Κορεσμός (διαρκεί 1-2 ημέρες).
- C. Στερεοποίηση με καταγραφή (μέσω H/Y) της κατακόρυφης μετατόπισης (διαρκεί 3-4 ημέρες, ανάλογα με τον αριθμό των σταδίων φόρτισης).

D. Διάτμηση με καταγραφή οριζόντιας μετατόπισης, κατακόρυφης μετατόπισης και οριζόντιας δύναμης (παραμόρφωση δυναμομετρικού δακτυλίου) (διαρκεί ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης).

5.2. Υπολογισμός ρυθμού διάτμησης

Ο υπολογισμός του ρυθμού φόρτισης προέκυψε από τα δεδομένα της στερεοποίησης, ακολουθώντας την μέθοδο του λογαρίθμου χρόνου (ΕΛΟΤ, 1986).

Αρχικά σχεδιάστηκε η καμπύλη «χρόνου – παραμόρφωσης (κατακόρυφη μετακίνηση)» σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Έπειτα προσδιορίστηκε η παραμόρφωση, που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης 100%, καθώς επίσης και η παραμόρφωση, που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης 0%.

Στη συνέχεια, με βάση τα παραπάνω, προσδιορίστηκε γραφικά ο χρόνος t_{50} που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης 50%.

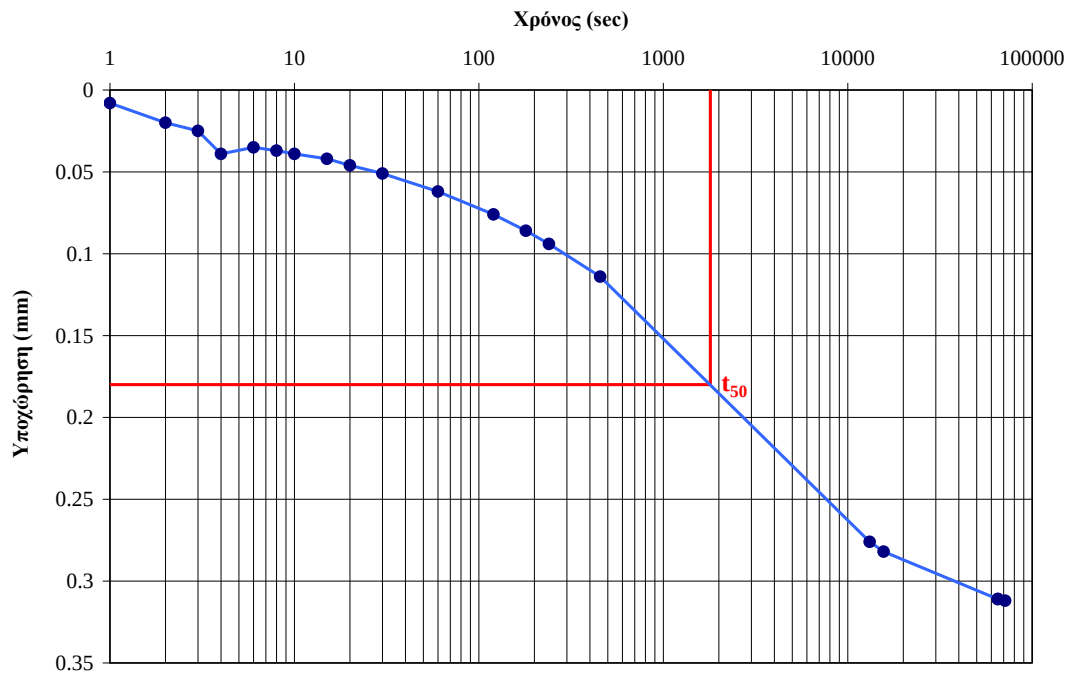
Ο ρυθμός διάτμησης προσεγγίζεται διαιρώντας την εκτιμώμενη διατμητική παραμόρφωση, που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική τάση, δια του χρόνου T , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = 50 \cdot t_{50} \quad [5.4]$$

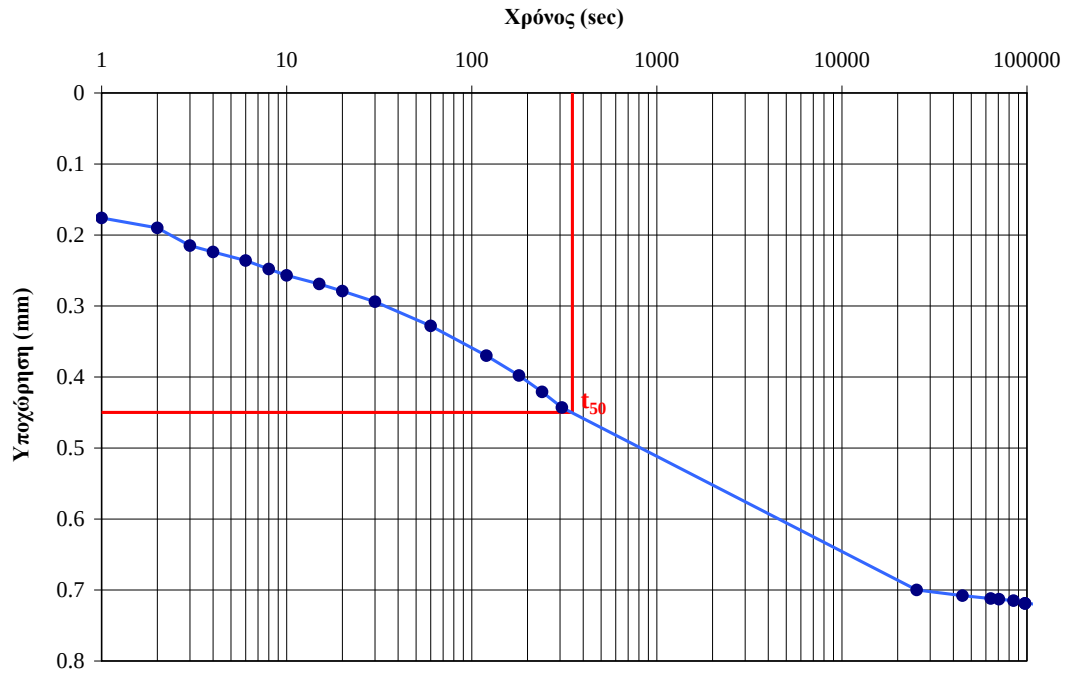
Με βάση τις μετρήσεις στερεοποίησης κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα χρόνου – παραμόρφωσης, όπως αυτά φαίνονται στα **Σχήματα 5.1 και 5.2**.

Το t_{50} προσδιορίζεται από το διάγραμμα του Σχήματος 5.1 ως $t_{50} = 1800 \text{ sec} = 30 \text{ min}$ και συνεπώς $T = 1500 \text{ min}$ για την θραύση των δοκιμίων «κυανότεφρης μάργας».

Αντίστοιχα, για τα δοκίμια «καστανοκίτρινης μάργας», το t_{50} προσδιορίζεται από το Σχήμα 5.2 ως $t_{50} = 350 \text{ sec} = 5,83 \text{ min}$, και συνεπώς $T = 291,5 \text{ min}$.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα στερεοποίησης «κυανότεφρης μάργας».



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα στερεοποίησης «καστανοκίτρινης μάργας».

Θεωρώντας ότι η θραύση ολοκληρώνεται πριν η οριζόντια παραμόρφωση φτάσει το 10% της διαμέτρου του δοκιμίου (= 5,94 mm για τον δίσκο που χρησιμοποιήθηκε στις εν λόγω δοκιμές), ο ρυθμός διάτμησης υπολογίσθηκε ως εξής:

$v = 5,94 / 1500 = 0,00396 \text{ mm/min}$ για την «κυανότεφρη μάργα», και

$v = 5,94 / 291,5 = 0,02038 \text{ mm/min}$ για την «καστανοκίτρινη μάργα».

Σημειώνεται ότι ο ρυθμός αυτός είναι σταθερός καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής και παραμένει ο ίδιος για όλα τα δοκίμια ίδιας μάργας που εξετάσθηκαν, καθώς εξαρτάται από τις παραμέτρους του εδαφικού δείγματος.

Επίσης, ο τελικά επιβαλλόμενος ρυθμός που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές διάτμησης διαφοροποιήθηκε κατά τι από τις παραπάνω τιμές, έτσι ώστε να υπακούει στις προδιαγραφές της μηχανής διάτμησης. Έτσι, για την «κυανότεφρη μάργα» θεωρήθηκε $v = 0,003 \text{ mm/min}$, ενώ για την «καστανοκίτρινη μάργα» $v = 0,016 \text{ mm/min}$.

Όλες οι παραπάνω τιμές δίνονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5.1: Προσδιορισμός ρυθμού διάτμησης (v) για τις δοκιμές διάτμησης.

Υλικό	t_{50} (min)	T (min)	Ρυθμός διάτμησης v (mm/min)	
			Εκτιμώμενος	Εφαρμοζόμενος
Κυανότεφρη μάργα	30	1500	0,00396	0,003
Καστανοκίτρινη μάργα	5,83	291,5	0,02038	0,016

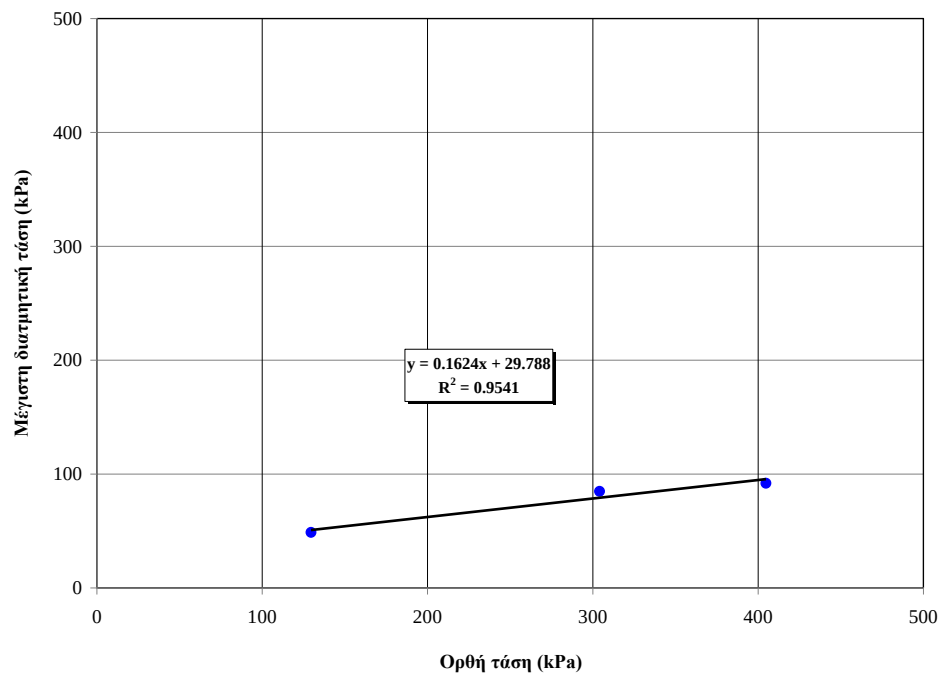
5.3. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης

Στο **Παράρτημα Β** παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης που έγιναν σε 6 δοκίμια που εξετάστηκαν (**Πίνακες Β.1, Β.2 και Β.3** για τα 3 δοκίμια «κυανότεφρης μάργας» και **Πίνακες Β.4, Β.5 και Β.6** για τα 3 δοκίμια «καστανοκίτρινης μάργας»).

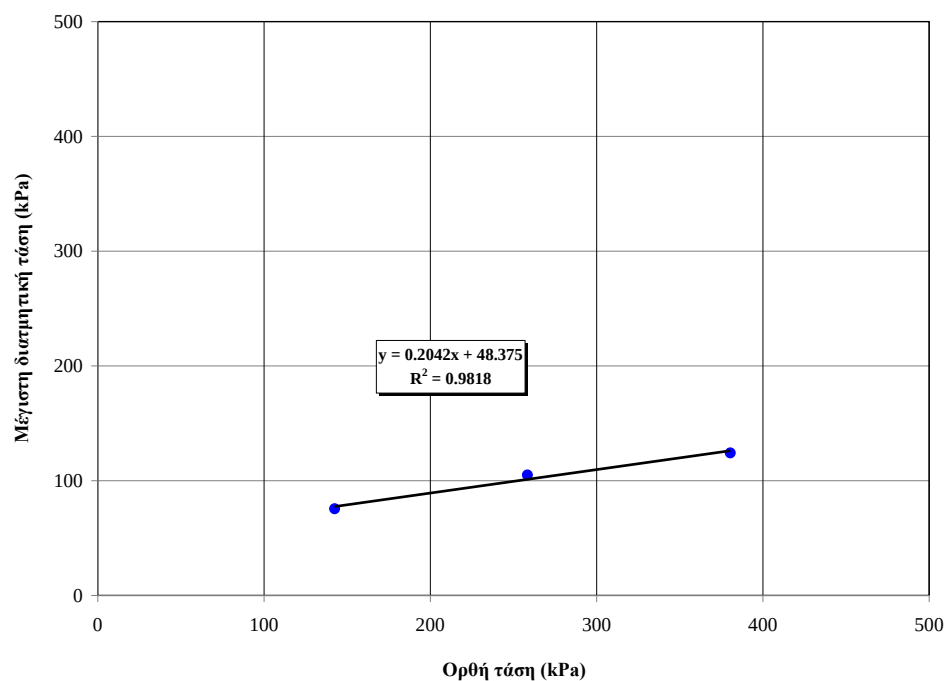
Επίσης, στα **Σχήματα Β.1, Β.2** («κυανότεφρη μάργα»), **Β.3** και **Β.4** («καστανοκίτρινη μάργα») του ίδιου παραρτήματος, παριστάνονται γραφικά:

- α) διαγράμματα οριζόντιας μετακίνησης – διατμητικής τάσης, και
- β) διαγράμματα οριζόντιας μετακίνησης – κατακόρυφης μετακίνησης, για κάθε ένα από τα 6 δοκίμια που εξετάστηκαν.

Έπειτα κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα αστοχίας Coulomb (**Σχήματα 5.3 και 5.4**), προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι c (συνοχή) και ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) των δύο δειγμάτων που εξετάστηκαν.



Σχήμα 5.3: Δοκιμή ορθής – διατμητικής δύναμης «κυανότεφρης μάρμαρας».



Σχήμα 5.4: Δοκιμή ορθής – διατμητικής δύναμης «καστανοκίτρινης μάρμαρας».

Σημειώνεται ότι στα παραπάνω διαγράμματα η συσχέτιση είναι ικανοποιητική ($R^2 > 0,9$) και συνεπώς θεωρήθηκαν επαρκή για την εξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά στις παραμέτρους c και ϕ .

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών, όπως εκτιμήθηκαν από τα Σχήματα 5.3 και 5.4, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2**.

Πίνακας 5.2: Τιμές συνοχής (c') και γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ') των γεωλογικών σχηματισμών.

Υλικό	c' (kPa)	ϕ' (°)
Κυανότεφρη μάργα	29	9
Καστανοκίτρινη μάργα	48	12

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

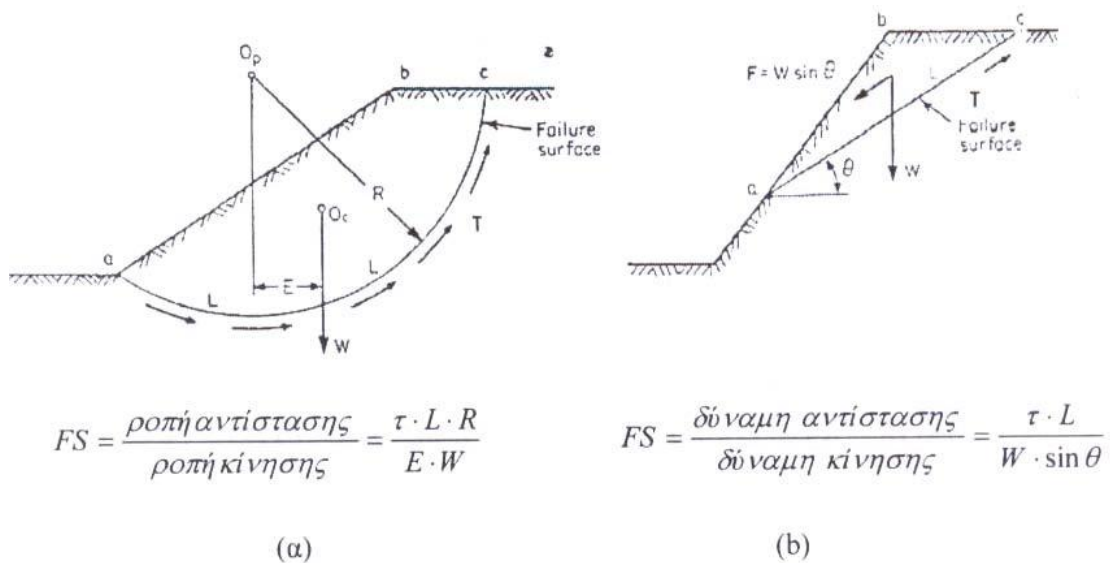
Η διερεύνηση της ευστάθειας του πρανούς του επιχώματος πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της ανάλυσης της οριακής ισορροπίας. Με βάση την συγκεκριμένη μέθοδο θεωρείται ότι εκδηλώνεται θραύση ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία μιας (ή περισσότερων επιφανειών) και η μάζα κινείται προς τα κατάντη. Η αστοχία του πρανούς προκύπτει από το γεγονός ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην θεωρούμενη επιφάνεια ολίσθησης υπερβαίνουν την διατμητική αντοχή των γεωυλικών (Στειακάκης, 2005, από Hunt, 1986).

Σύμφωνα με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$) ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό (i) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα και (ii) της αντίστασης σε διάτμηση που αυτή επιδεικνύει.

Στο **Σχήμα 6.1-α** παρουσιάζεται κυκλική αστοχία ενός ομογενούς πρανούς. Στην κατολισθαίνουσα μάζα ενεργεί το βάρος (W) που προκαλεί μια ροπή κίνησης ($W \times E$). Σ' αυτή τη ροπή αντιστέκεται η διατμητική τάση (τ) που ενεργοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης (L) και αναπτύσσει μια ροπή αντίστασης ($\tau \times L \times R$).

Στην περίπτωση επίπεδης ολίσθησης (**Σχήμα 6.1-β**), η διατμητική αντίσταση στο επίπεδο ολίσθησης ($\tau \times L$), αντιστέκεται στην κινητήρια δύναμη που προκύπτει από τη βαρύτητα ($W \times \sin \theta$).

Οι δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις αφορούν απλές προσεγγίσεις του προβλήματος της ευστάθειας.



Σχήμα 6.1: Δυνάμεις που ενεργούν σε κυκλικές (α) και επίπεδες (β) επιφάνειες αστοχίας (Στειακάκης, 2005, από Hunt, 1986).

Γενικά, σε όλες τις περιπτώσεις υπολογίζεται ο συντελεστής ευστάθειας ΣΑ (Factor of Safety, FS), ο οποίος ορίζεται ως:

«Ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς τις δυνάμεις που προκαλούν την μετακίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας θραύσης».

ή

«Ο λόγος των ροπών αντίστασης προς τις ροπές που προκαλούν τη μετακίνηση γύρω από ένα σημείο».

Οι επιτρεπόμενοι Συντελεστές Ασφαλείας στα πρανή των επιχωμάτων για διάφορες συνθήκες που διαμορφώνονται κατά της φάσεις λειτουργίας του έργου, εμφανίζονται στον **Πίνακα 2.4**.

Η διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών του εξεταζόμενου επιχώματος έγινε με το λογισμικό **«SLOPE/W»**, το οποίο βασίζεται στην αρχή της **οριακής ισορροπίας**. Το

λογισμικό αυτό της εταιρείας GEOSLOPE, λειτουργεί σε περιβάλλον Windows, ενώ συνεργάζεται άμεσα με το «SEEP/W» μέσω του περιβάλλοντος εργασίας «GEOSTUDIO».

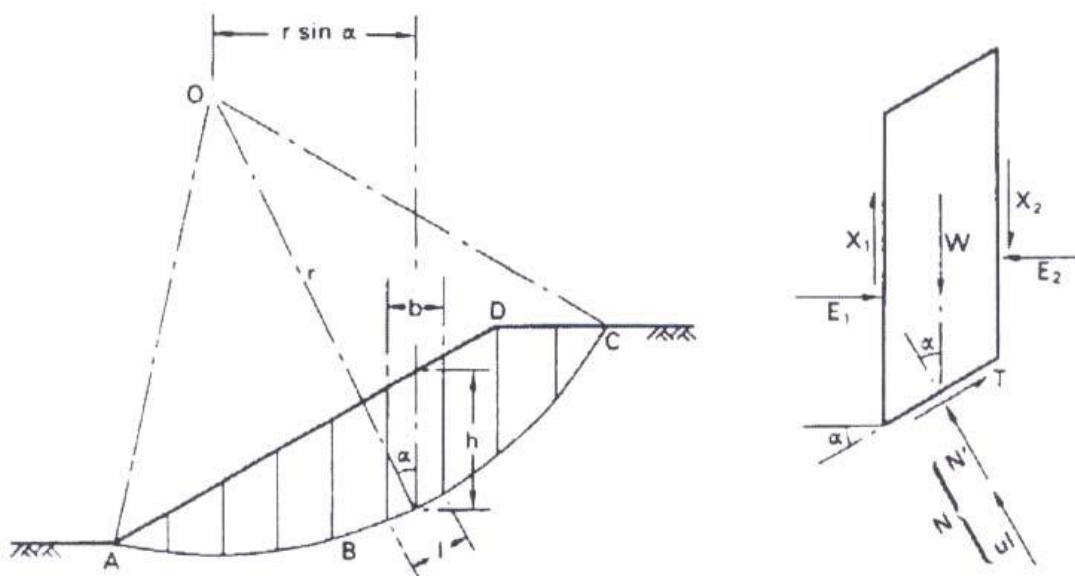
Το SLOPE/W για κάθε περίπτωση γεωμετρίας ενός πρανούς, κατάσταση φόρτισης και τιμές εδαφοτεχνικών παραμέτρων, είναι δυνατόν να διερευνήσει έναν μεγάλο αριθμό πιθανών επιφανειών ολίσθησης και να προσδιορίσει την δυσμενέστερη κατάσταση, δηλαδή αυτήν που αντιστοιχεί στον ελάχιστο συντελεστή ευστάθειας. Επίσης το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα εμφάνισης της ανάλυσης ισορροπίας των δυνάμεων σε κάθε λωρίδα υπολογισμού οποιασδήποτε επιφάνειας ολίσθησης (GeoStudio, 2004).

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε ένα αρχικό μοντέλο (μοντέλο βάσης), με βάση γεωλογική τομή εγκάρσια στο πρανές και θεωρώντας κατάσταση σταθερής ροής.

Για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών θεωρήθηκε ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, καθώς δεν υπήρχαν ενδείξεις για ασυνέχειες που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν την μορφή αυτή. Οι κυκλικές αυτές επιφάνειες ολίσθησης εξετάστηκαν με την μέθοδο των λωρίδων.

Σύμφωνα με αυτήν, η μάζα χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες και η ισορροπία κάθε μιας εξετάζεται χωριστά (**Σχήμα 6.2**). Η ανάλυση των δυνάμεων για κάθε λωρίδα δίνει δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και μια εξίσωση ροπών (Στειακάκης, 2005).

Ο προσδιορισμός της ορθής τάσης (N) στην επιφάνεια διάτμησης είναι πρόβλημα αόριστο, επειδή ο αριθμός των εξισώσεων ισορροπίας είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγνώστων.



Σχήμα 6.2: Η μέθοδος των λωρίδων (Στειακάκης, 2005, από Craig, 1983).

Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται βάσει παραδοχών (για μείωση των αγνώστων) που αφορούν κυρίως τη διεύθυνση ή / και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι επίλυσης, ανάλογα με τις θεωρούμενες παραδοχές (Στειακάκης, 2008).

Στην επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στις μεθόδους επίλυσης των εδαφικών πρανών και παρατίθεται σύγκριση των μεθόδων που εφαρμόζει το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία.

6.1. Μέθοδοι επίλυσης εδαφικών πρανών

Για την επίλυση του προβλήματος της ανάλυσης της ευστάθειας των εδαφικών πρανών έχουν μέχρι στιγμής αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι από διακεκριμένους επιστήμονες (Bishop, 1955, Morgenstern and Price, 1965, Lo and Lee, 1973, Miao, 1985, Zhang and Chen, 1987, Espinoza et al., 1992, Michalowski, 1995 και Duncan, 1996), όπως αυτή της οριακής ισορροπίας, η μέθοδος της επιφάνειας ολίσθησης, των

πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και συνδυασμοί αυτών. Μεταξύ αυτών των προσεγγίσεων, η μέθοδος της οριακής ισορροπίας είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη, κυρίως λόγω της απλότητάς της (Miao et al., 1999).

Η ιδέα της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη συμβατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών (Bishop, 1955 και Morgenstern and Price, 1965). Η προσέγγιση αυτή θεωρεί μια συνεχή επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα συμπαγές σώμα που ικανοποιεί το κριτήριο του Mohr – Coulomb. Η υπόθεση αυτή, σε συνδυασμό με άλλες, οδηγεί σε μια λύση που εκφράζεται μέσω του συντελεστή ασφάλειας.

Αυτή η συμβατική μέθοδος, αποδείχτηκε υψηλής πρακτικής σημασίας ειδικά σαν ένα σχεδιαστικό εργαλείο για εδαφικά πρανή που παρουσιάζουν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Όταν εφαρμόζεται σε ψαθυρά εδάφη, η ίδια μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα (Miao et al., 1999).

Με βάση τον Nash (1987), οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας εδαφικών πρανών, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

A) Στις μεθόδους εκείνες στις οποίες η επίλυση γίνεται με πρώτου βαθμού εξισώσεις με μονοσήμαντη τιμή του αγνώστου (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:

- ✓ Την επίπεδη ανάλυση (μέθοδος του πρανού μεγάλου μήκους).
- ✓ Την ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους.
- ✓ Τη μέθοδο $\Phi_u = 0$.
- ✓ Τη Σουηδική μέθοδο.

B) Σε εκείνες τις μεθόδους, όπου η λύση προκύπτει από εξισώσεις με διαδοχικές επαναλήψεις για διάφορες τιμές του β' αγνώστου με σκοπό την προσέγγιση του

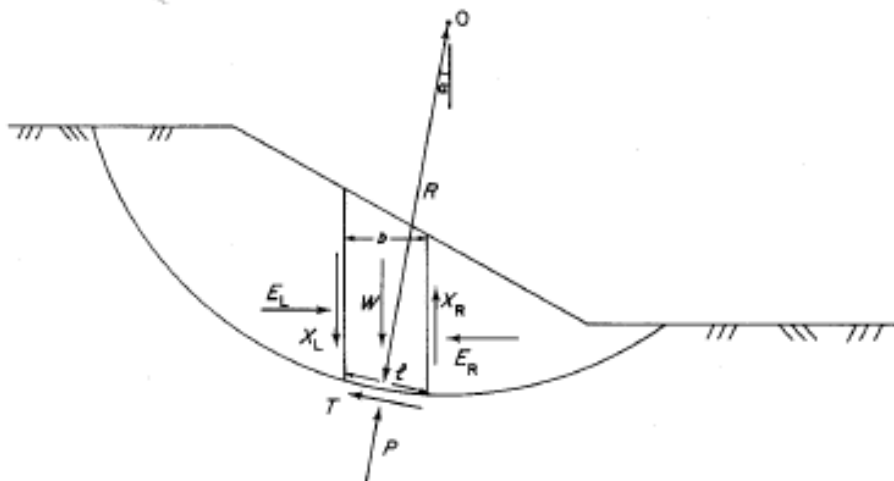
συντελεστή ασφάλειας (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως μη γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:

- ✓ Τη μέθοδο του Bishop.
- ✓ Την απλοποιημένη μέθοδο Janbu.
- ✓ Τη μέθοδο Spencer.
- ✓ Τη μέθοδο Morgenstern and Price.

Στις ενότητες που ακολουθούν αναπτύσσεται καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους ξεχωριστά, και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους Bishop και Janbu οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση εδαφικών πρανών που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

6.1.1. Τροποποιημένη μέθοδος Bishop

Η μέθοδος του Bishop (βλέπε **Σχήμα 6.3**) μοιάζει αρκετά με τη Σουηδική, διότι και σε αυτή την περίπτωση γίνεται η παραδοχή της αστοχίας σε τόξο κυκλικής επιφάνειας κέντρου O και ακτίνας R .



Σχήμα 6.3: Μέθοδος Bishop (Nash, 1987).

Η επίλυση πραγματοποιείται με την ίδια μεθοδολογία όπως και στη Σουηδική. Και στα δυο εξετάζεται η οριακή ισορροπία των ροπών που αναπτύσσονται εξαιτίας των εφαρμοζόμενων δυνάμεων στο πρανές.

Οι διαφορές των δύο μεθόδων από άποψη παραδοχών, είναι ότι μεταξύ των λωρίδων, ασκούνται μόνο οι οριζόντιες δυνάμεις, ενώ οι κατακόρυφες θεωρούνται αμελητέες και λαμβάνουν μηδενικές τιμές.

Με βάση το Σχήμα 6.3 και λόγω του ότι οι κατακόρυφες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων θεωρούνται μηδενικές, προκύπτει ότι:

$$\mathbf{X_R} = \mathbf{X_L} = \mathbf{0} \quad [6.1]$$

Το κριτήριο αστοχίας του Mohr – Coulomb δίνει:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c'} + (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{u}) \cdot \tan \boldsymbol{\phi'} \quad [6.2]$$

όπου, s : η διατμητική αντοχή του εδάφους,

c' : η συνοχή του εδάφους,

σ : η ορθή τάση στη βάση της εδαφικής λωρίδας,

u : η πίεση των πόρων, και

ϕ' : η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

Ο συντελεστής ασφάλειας σε σχέση με τη διατμητική αντοχή δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{FS} = \frac{s}{\tau} \quad [6.3]$$

όπου, τ : η διατμητική τάση στη βάση της κάθε εδαφικής λωρίδας.

Συνολικά, για τις ορθές και τις διατμητικές δυνάμεις, το μοναδιαίο πάχος διατομής είναι:

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{l} \quad [6.4]$$

και

$$T = \tau \cdot l \quad [6.5]$$

όπου, l : το μήκος της βάσης των επιμέρους λωρίδων.

Η ορθή δύναμη θεωρείται ότι εφαρμόζεται στο μέσο της βάσης κάθε λωρίδας και ορίζεται επιλύοντας τις δυνάμεις σε κάθε λωρίδα κατά την κατακόρυφη έννοια. Αντικαθιστώντας στις σχέσεις 6.2, 6.3 και 6.4 στην 6.5, τελικά προκύπτει ότι:

$$T = \frac{l}{FS} (c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi') \quad [6.6]$$

Επιλύοντας ως προς την κατακόρυφο προκύπτει ότι:

$$P \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha = W - (X_R - X_L) \quad [6.7]$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 6.6 στην 6.7, τελικά για την ορθή δύναμη στη βάση της επιφάνειας αστοχίας προκύπτει ότι:

$$P = \frac{W - \frac{l}{FS} \cdot (c' \cdot l \cdot \sin \alpha - u \cdot l \cdot \tan \phi' \cdot \sin \alpha)}{m_a} \quad [6.8]$$

όπου:

$$m_a = \cos \alpha \cdot \left(1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi'}{FS} \right) \quad [6.9]$$

Με βάση τη σχέση 6.8, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας για μια μόνο λωρίδα εδάφους, όπως αυτή έχει αναλυθεί στο Σχήμα 6.3.

Ο συνολικός συντελεστής ασφάλειας του εδαφικού πρανούς υπολογίζεται από την ισορροπία ροπών, από όπου προκύπτει ότι:

$$\sum W \cdot R \cdot \sin \alpha = \sum T \cdot R \quad [6.10]$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 6.6, η οποία αναφέρεται σε επίπεδο εδαφικής λωρίδας, στην 6.10, η οποία αναφέρεται στο σύνολο του πρανούς, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$FS = \frac{\sum (c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi')}{\sum w \cdot \sin \alpha} \quad [6.11]$$

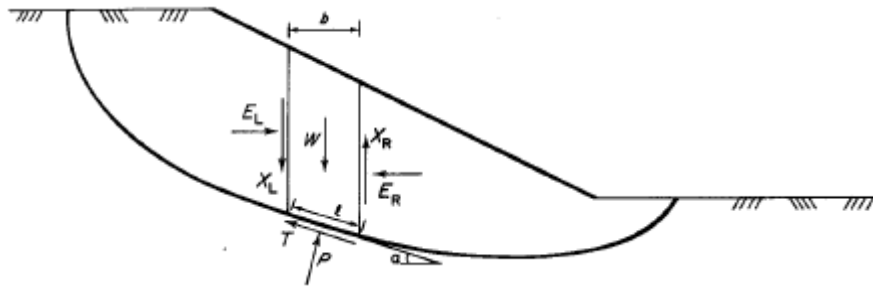
Η εξίσωση αυτή περιέχει το συντελεστή ασφάλειας και στα δύο μέλη της, δεδομένου ότι το P περιέχεται στο δεύτερο σκέλος της εξίσωσης, οπότε επιλύεται με διαδοχικές επαναλήψεις, όπου το ένα FS θεωρείται και το άλλο υπολογίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τα δύο FS εξισωθούν.

Η σύγκλιση γίνεται σχετικά εύκολα, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας να μπορεί να γίνει και χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, παρόλο που πρόκειται για μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία (Nash, 1987).

Κατά τις αναλύσεις ευστάθειας πρανών στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η **τροποποιημένη μέθοδος Bishop**.

6.1.2. Μέθοδος Janbu

Οι Janbu et al. (1956) παρουσίασαν μια από τις πρώτες μεθόδους ανάλυσης μη κυκλικών επιφανειών αστοχίας (βλέπε **Σχήμα 6.4**). Στη μέθοδο αυτή, η υπόθεση που λαμβάνει χώρα είναι ότι οι μεταξύ των λωρίδων δυνάμεις είναι μηδενικές και έτσι η σχέση που προκύπτει για την ολική ορθή δύναμη στη βάση κάθε λωρίδας είναι η ίδια που προκύπτει από τη μέθοδο του Bishop (Nash, 1987).



Σχήμα 6.4: Μέθοδος Janbu (Nash, 1987).

Θεωρείται ότι ένα τεμάχιο εδάφους ολισθαίνει πάνω στη μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Εξετάζοντας την ολική ισορροπία δυνάμεων προκύπτει μια σχέση για το συντελεστή ασφάλειας. Αρχικά θεωρείται ότι οι μεταξύ των λωρίδων δυνάμεις είναι μηδενικές, αλλά τελικά, για την εισαγωγή τους στους υπολογισμούς εισάγεται ένας συντελεστής διόρθωσης, όπως επεξηγείται παρακάτω.

Στη βάση της λωρίδας του Σχήματος 6.4 ασκούνται η ορθή τάση σ , η διατμητική τάση τ και η πίεση των πόρων u . Το κριτήριο αστοχίας που εφαρμόζεται δίνεται στη σχέση 6.2.

Όπως και στην περίπτωση Bishop, για την ορθή δύναμη στη βάση της επιφάνειας αστοχίας προκύπτουν οι σχέσεις 6.8 και 6.9. Στην περίπτωση Janbu όμως, πραγματοποιείται και δεύτερη επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας, αυτή τη φορά για διεύθυνση παράλληλη προς τη βάση της λωρίδας. Έτσι:

$$T + (E_R - E_L) \cdot \cos \alpha = [W - (X_R - X_L)] \cdot \sin \alpha \quad [6.12]$$

Όπως και προηγουμένως, οι δυνάμεις X_R και X_L μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενικές ($X_R = X_L = 0$). Έτσι, από τις σχέσεις 6.6 και 6.12, προκύπτει ότι:

$$E_R - E_L = W \cdot \tan \alpha - \frac{1}{FS} \cdot [c' \cdot L + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi'] \cdot \sin \alpha \quad [6.13]$$

Υπολογίζοντας στη συνέχεια την ισορροπία δυνάμεων για ολόκληρο το πρανές, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία, προκύπτει ότι:

$$\sum (E_R - E_L) = 0 \quad [6.14]$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 6.13 και 6.14 για ολόκληρο το εδαφικό πρανές, λαμβάνεται η σχέση:

$$\sum W \cdot \tan \alpha - \frac{1}{FS} \cdot \sum [c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi'] \cdot \sin \alpha = 0 \quad [6.15]$$

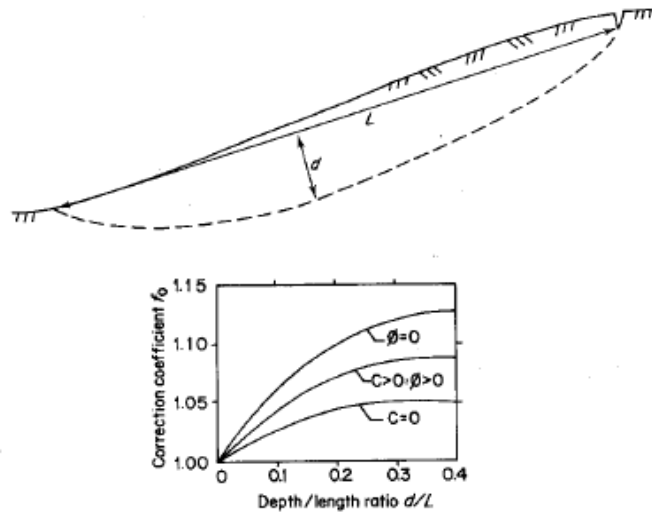
Αρα, τελικά ο συνολικός συντελεστής ασφάλειας (FS_0) δίνεται από τη σχέση:

$$FS_0 = \frac{\sum [c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi'] \cdot \sin \alpha}{\sum W \cdot \tan \alpha} \quad [6.16]$$

Εξαιτίας της υπόθεσης ότι οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενικές, ένας διορθωτικός παράγοντας f_0 πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή ασφάλειας που υπολογίζεται από τη σχέση 6.16, ώστε τελικά να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι:

$$FS = f_0 \cdot FS_0 \quad [6.17]$$

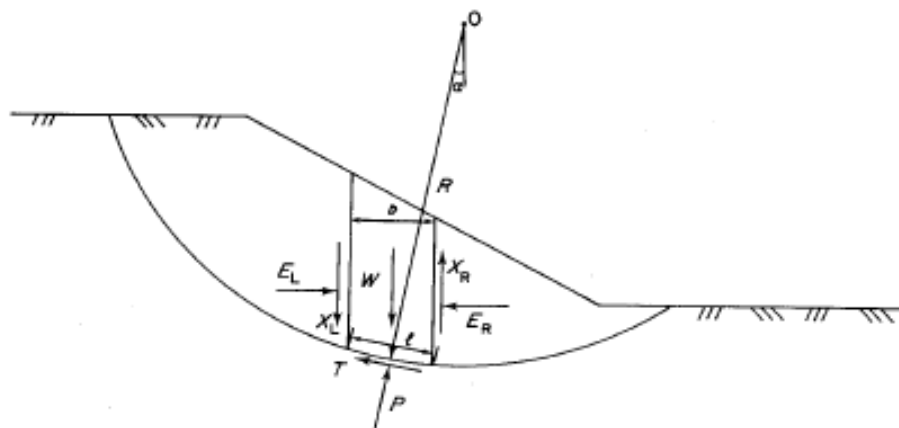
Για τη βαθμονόμηση αυτού του συντελεστή ο Janbu εξέτασε αρκετά εδαφικά πρανή και διαπίστωσε ότι αυτός εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρία του πρανούς, όσο και από την κατάσταση του εδάφους. Τελικά, το 1956 οι Janbu et al. Κατέληξαν, έπειτα από εξέταση μεγάλου αριθμού εδαφικών πρανών, σε πρότυπες καμπύλες (**Σχήμα 6.5**) από τις οποίες προκύπτει ο συντελεστής f_0 , βάση του λόγου του μήκους του εδαφικού τεμάχους που αποκόπτεται, προς το μέγιστο πάχος αυτού (Nash, 1987).



Σχήμα 6.5: Πρότυπη καμπύλη και γεωμετρικά στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης f_0 στη μέθοδο του Janbu (Nash, 1987).

6.1.3. Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) αρχικά παρουσίασε τη μέθοδό του για την ανάλυση κυκλικών επιφανειών ολίσθησης (βλέπε **Σχήμα 6.6**), η οποία όμως μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης θεωρώντας ένα φανταστικό κέντρο περιστροφής.



Σχήμα 6.6: Μέθοδος Spencer (Nash, 1987).

Στη μέθοδο αυτή θεωρείται ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων έχουν σταθερή κλίση στο εσωτερικό του πρανούς, έτσι ώστε:

$$\frac{X}{E} = \tan\theta \quad [6.18]$$

Εξετάζοντας τη συνολική ισορροπία ροπών καθώς και την συνολική ισορροπία δυνάμεων, προκύπτουν δύο εκφράσεις του συντελεστή ασφάλειας, όπως επεξηγείται παρακάτω. Από την ισορροπία δυνάμεων ως προς τον κατακόρυφο άξονα προκύπτει ότι:

$$P \cdot \cos\alpha + T \cdot \sin\alpha = W - (X_R - X_L) \quad [6.19]$$

Τελικά, με αντικατάσταση της σχέσης 6.6 στην σχέση 6.19, η ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{W - (X_R - X_L) - \frac{l}{FS} \cdot (c' \cdot l \cdot \sin\alpha - u \cdot l \cdot \tan\phi' \cdot \sin\alpha)}{m_a} \quad [6.20]$$

όπου το m_a δίνεται από τη σχέση 6.9.

Από την ισορροπία δυνάμεων ως προς τον οριζόντιο άξονα προκύπτει ότι:

$$T \cdot \cos\alpha - P \cdot \sin\alpha + E_R - E_L = 0 \quad [6.21]$$

Αντικαθιστώντας το T από τη σχέση 6.6, προκύπτει:

$$E_R - E_L = P \cdot \sin\alpha - \frac{l}{FS} \cdot [c' \cdot L + (P - u \cdot l) \cdot \tan\phi'] \cdot \cos\alpha \quad [6.22]$$

Από την ισορροπία δυνάμεων για το σύνολο του πρανούς και δεδομένου ότι δεν υπάρχει επιφανειακή φόρτιση σε αυτό, ισχύει η σχέση 6.14. Οπότε αντικαθιστώντας στην σχέση 6.21, προκύπτει η σχέση:

$$\Sigma(E_R - E_L) = \Sigma P \cdot \sin \alpha - \frac{1}{FS} \cdot \Sigma [c' \cdot L + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi'] \cdot \cos \alpha \quad [6.23]$$

Επιλύοντας τη σχέση 6.23 ως προς F_t , που είναι ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την επίλυση με βάση την ισορροπία δυνάμεων, και δεδομένης της σχέσης 6.18, εξάγεται τελικά η σχέση:

$$F_t = \frac{\Sigma [c' \cdot L + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi'] \cdot \sin \alpha}{\Sigma [W - (X_R - X_L)] \cdot \tan \alpha} \quad [6.24]$$

Αντίστοιχα, από την ισορροπία ροπών (σε σχέση με το σημείο Ο του Σχήματος 6.4), προκύπτει:

$$\Sigma W \cdot R \cdot \sin \alpha = \Sigma T \cdot R \quad [6.25]$$

Αντικαθιστώντας και πάλι το T από τη σχέση 6.6, προκύπτει ο συντελεστής F_m από την ισορροπία ροπών:

$$F_m = \frac{\Sigma [c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi']}{\Sigma W \cdot \tan \alpha} \quad [6.26]$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, θεωρώντας ολική ισορροπία δυνάμεων και ροπών, προκύπτουν δύο τιμές του συντελεστή ασφάλειας. Η επίλυση γίνεται με επαναληπτική μέθοδο.

Αρχικά θεωρείται ότι $X_R - X_L = 0$. Έπειτα υπολογίζονται οι τιμές των E , X , με βάση τις σχέσεις 6.21 και 6.18. Για τη σύγκλιση των δύο τιμών στον πραγματικό συντελεστή ευστάθειας του πρανούς, επιλέγονται διάφορες τιμές για τη γωνία θ . Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς δίνεται τελικά για εκείνη την τιμή της γωνίας θ για την οποία οι σχέσεις 6.24 και 6.26 εξισώνονται.

Τελικά, με βάση σχετικές παρατηρήσεις του Spencer σε απλά προβλήματα, ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την ισορροπία ροπών, επηρεάζεται σχετικά λίγο από τη διατμητική δύναμη μεταξύ των λωρίδων. Το γεγονός αυτό

συμφωνεί και με την άποψη του Bishop και δικαιολογεί την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου του (Nash, 1987).

6.1.4. Μέθοδος Morgenstern and Price

Οι Morgenstern και Price (1965) περιγράφουν μια μέθοδο ανάλυσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε κυκλικές και μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Θεώρησαν ότι οι δυνάμεις και οι τάσεις ποικίλουν κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, και επιλύοντας κάθετα και παράλληλα στη βάση κάθε λωρίδας, προσδιόρισαν τις εξισώσεις ισορροπίας αρκετά γενικά. Έπειτα, έγινε η θεώρηση ότι οι διατμητικές δυνάμεις X μεταξύ των λωρίδων, σχετίζονται με τις κύριες δυνάμεις E :

$$\frac{X}{E} = \lambda \cdot f(x) \quad [6.27]$$

όπου, $f(x)$: συνάρτηση που μεταβάλλεται συνεχώς κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, και

λ : συντελεστής.

Για δεδομένη $f(x)$, προκύπτουν τιμές για τα λ και FS, για τις οποίες ικανοποιείται η ισορροπία δυνάμεων, αλλά και η ισορροπία ροπών. Οι Morgenstern και Price υποστηρίζουν ότι ο συντελεστής ασφάλειας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την επιλογή του $f(x)$.

Η επιλογή της συνάρτησης $f(x)$, μπορεί να γίνει πιο εύκολα με την υπόθεση ότι οι κύριες τάσεις εφαρμόζονται στα όρια – διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων (Nash, 1987).

6.2. Παραδοχές για το λογισμικό SLOPE/W

Για το σχεδιασμό και την επίλυση των μοντέλων ήταν απαραίτητο να γίνουν κάποιες παραδοχές, αναγκαίες για το λογισμικό SLOPE/W:

1. Θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό (i) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα, και (ii) της αντίστασης σε διάτμηση.
2. Οι τιμές των παραμέτρων c' , ϕ' και γ των γεωϋλικών κατασκευής του επιχώματος και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών ορίστηκαν με βάση τη γεωτεχνική διερεύνηση των υλικών και βιβλιογραφικές αναφορές.
3. Η τιμή του μοναδιαίου βάρους (γ) που εισήχθη σε κάθε γεωϋλικό και στους υποκείμενους σχηματισμούς αντιστοιχεί στο κορεσμένο μοναδιαίο βάρος (γ_{sat}). Η παραδοχή αυτή θεωρείται γεωτεχνικά «ασφαλής» καθώς προκαλεί αποδυνάμωση της ευστάθειας των πρανών.
4. Οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στα γεωϋλικά του επιχώματος και στους υποκείμενους σχηματισμούς, εκτιμήθηκαν μέσω του SEEP/W.

6.3. Εκτίμηση της πίεσης πόρων

Η προσομοίωση ροής του υπογείου νερού και η εκτίμηση της πίεσης των πόρων μέσα στην μάζα του επιχώματος έγινε με την χρήση του λογισμικού «SEEP/W» της εταιρείας GEOSLOPE. Το λογισμικό αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον Windows, ενώ συνεργάζεται άμεσα με το δεύτερο λογισμικό («SLOPE/W») μέσω του περιβάλλοντος εργασίας «GEOSTUDIO», της ίδιας εταιρείας, για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Το SEEP/W είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί **κώδικα πεπερασμένων στοιχείων** για την ανάλυση της διήθησης του νερού καθώς και η εκτίμηση της πίεσης των πόρων σε πορώδη μέσα.

Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες βασίζεται στην ικανότητα να περιγράφουν και να αναλύουν

προβλήματα που είναι εξαιρετικά περίπλοκα και πολλές φορές, αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος.

Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα. Προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση, οι αναλυτές καταφεύγουν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων, μια εκ των οποίων είναι και αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

Αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών, γνωστών ως «στοιχεία» (elements). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία, τα οποία ονομάζονται «κόμβοι» (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση (Αγιουτάντης, 2002).

Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που έχουν επιλεγεί να περιγράψουν το σώμα, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται ότι επιδρά σε κάθε στοιχείο με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο. Τελικά, η κατανομή της άγνωστης μεταβλητής στη μάζα του σώματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά αν αυτό έχει διακριτοποιηθεί σωστά (Αγιουτάντης, 2002).

Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις, όπως είναι οι τριγωνομετρικές και οι πολυωνυμικές συναρτήσεις. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται περισσότερο γιατί είναι απλός και εύχρηστος ο μαθηματικός τους χειρισμός και μπορούν να αποδώσουν με αρκετή ακρίβεια τις μετατοπίσεις των κόμβων.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η λύση δεν είναι μια απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για να

περιγράψουν το μεγάλο αριθμό κόμβων. Δεν είναι υπερβολή να αναφερθεί ότι κάποια προβλήματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται πάνω από 50.000 εξισώσεις.

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών μεθόδων έχει γίνει εφικτή η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε ικανοποιητικά χρονικά όρια.

Από τη στιγμή που θα βρεθούν οι άγνωστες παράμετροι για κάθε κόμβο, είναι εύκολος ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών στα στοιχεία σε όλο το σώμα (Αγιουτάντης, 2002).

Το SEEP/W, εκτός της χρησιμοποίησης του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, επιλύει μοντέλα σε **δύο διαστάσεις (2D)** και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση και στο σχεδιασμό γεωτεχνικών, αστικών, υδρογεωλογικών κ.α. εφαρμογών. Εξετάζονται αναλύσεις που κυμαίνονται από απλά προβλήματα κορεσμένων υλικών σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής (steady state flow), έως περίπλοκα σε μη κορεσμένα υλικά και σε συνθήκες μεταβλητής κατάστασης ροής (transient flow) (GeoStudio, 2004).

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ανάλυση σε συνθήκες **σταθερής κατάστασης ροής**, καθώς δεν διατίθενται μετρήσεις μεταβολής της ροής. Στα μοντέλα σταθερής κατάστασης ροής όλα τα εισαγόμενα δεδομένα είναι σταθερά, ανεξάρτητα από τον χρόνο.

6.4. Παραδοχές για το λογισμικό SEEP/W

Για την προσομοίωση έγιναν οι εξής παραδοχές:

1. Τα υλικά κατασκευής του επιχώματος και των υποκείμενων σχηματισμών θεωρήθηκαν ομοιογενή, ώστε να ισχύει ο νόμος του Darcy.

2. Η εισαγωγή στα μοντέλα των υδραυλικών παραμέτρων (K και VWC) των γεωλογικών υλικών έγινε θεωρώντας ότι οι παράμετροι αυτές είναι σταθερές στην κορεσμένη και ακόρεστη φάση. Αυτό έγινε για δύο λόγους:
- i. Έλλειψη επαρκών στοιχείων, ώστε να είναι δυνατή η απόδοση της υδραυλικής συμπεριφοράς των γεωυλικών κατά την ακόρεστη φάση, και
 - ii. Εφόσον η αστοχία του επιχώματος συνέβη στην κορεσμένη ζώνη του, θεωρήθηκε ότι η ευστάθειά του δεν επηρεάζεται σοβαρά από την ανώτερη ακόρεστη ζώνη.

6.5. Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε δισδιάστατη ανάλυση σε συνθήκες σταθερής κατάστασης ροής.

Η επιλογή των παραπάνω έγινε με τις εντολές (GeoStudio, 2004):

(KeyIn → Analysis Settings → Control → 2-dimensional)

(KeyIn → Analysis Settings → Type → Steady State)

6.6. Σχεδιασμός διατομής εγκάρσια στο σώμα του επιχώματος

Αρχικά ορίστηκε το πεδίο εργασίας και η κλίμακα εφαρμογής. Η κλίμακα ορίστηκε ως 1:300 για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη διεύθυνση.

Για τον ορισμό της κλίμακας χρησιμοποιήθηκε η εντολή (GeoStudio, 2004):

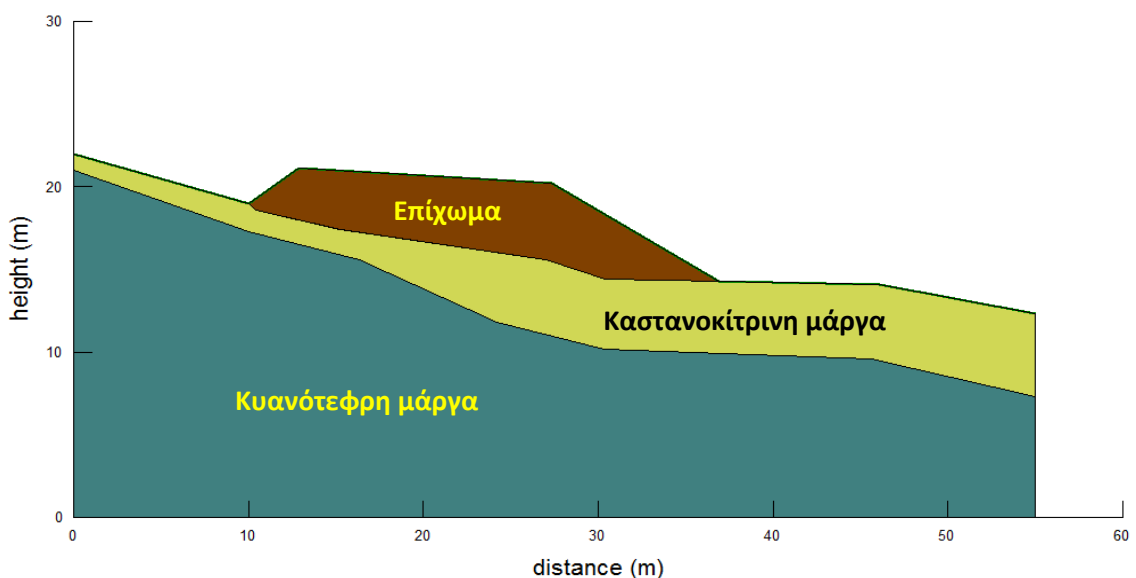
(Set → Page → Units and Scale)

Ο σχεδιασμός του μοντέλου έγινε με βάση τις συντεταγμένες που δίνονται από την τομή του επιχώματος και της καθίζησης που εκδηλώθηκε.

Μετά από εξοικείωση με τη λειτουργία του λογισμικού, και την επεξεργασία των δεδομένων, σχεδιάστηκε το μοντέλο (**Σχήμα 6.7**) και καθορίστηκαν τα υλικά του σώματος του επιχώματος και των υποκείμενων σχηματισμών.

Για τον σχεδιασμό του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η εντολή (GeoStudio, 2004):

(Sketch → Lines)



Σχήμα 6.7: Διατομή επιχώματος στη θέση της αστοχίας.

6.7. Υδραυλικές παράμετροι επιχώματος και υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών

Οι βασικές υδραυλικές παράμετροι που ορίζονται στο πρόγραμμα είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity, k) και η περιεκτικότητα νερού ανά μονάδα όγκου γεωϋλικού (volumetric water content, VWC).

Στο SEEP/W οι υδραυλικές αυτές παράμετροι πρέπει να ορίζονται ως συναρτήσεις και όχι ως απλές τιμές, προκειμένου να είναι δυνατή η απόδοση της συμπεριφοράς κάθε φάσης (κορεσμένης – ακόρεστης) των υλικών. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται τα διατιθέμενα από το ίδιο το λογισμικό πρότυπα διαγράμματα κάθε υδραυλικής παραμέτρου σε συνάρτηση με την πίεση νερού των πόρων του γεωϋλικού (Αγιουτάντης – Βαβαδάκης, 2006).

Όμως, είτε λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων, ώστε να είναι δυνατή η απόδοση της υδραυλικής συμπεριφοράς των κατά την ακόρεστη φάση, είτε η αστοχία του επιχώματος συνέβη στην κορεσμένη ζώνη του, θεωρήθηκε ότι η ευστάθειά του δεν επηρεάζεται σοβαρά από την ανώτερη ακόρεστη ζώνη, οι υδραυλικές παράμετροι K και VWC θεωρήθηκαν σταθερές για την πίεση νερού των πόρων των γεωλογικών σχηματισμών.

6.7.1. Υδραυλική αγωγιμότητα γεωϋλικών

Μια «συνάρτηση υδραυλικής αγωγιμότητας» ($K-Fn$) αποδίδει την αγωγιμότητα σε διάφορες συνθήκες κορεσμού του εδάφους.

Για να οριστεί η συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας επιλέγεται (GeoStudio, 2004):

(KeyIn → Hydraulic Functions → Hydraulic Conductivity)

Ως τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας των διαφόρων γεωϋλικών χρησιμοποιήθηκαν τιμές υδροπερατότητας (k) που πρόεκυψαν με βάση την γεωτεχνική ταξινόμηση και την βιβλιογραφία (Todd, 1980, Driscoll, 1986, Fetter, 1988).

Στον **Πίνακα 6.1** δίνονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (υδροπερατότητας) που τελικά επιλέχθηκαν για το αρχικό μοντέλο («μοντέλο βάσης») που επιλύθηκε.

Πίνακας 6.1: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας γεωϋλικών στη φάση κορεσμού, για το μοντέλο βάσης.

Γεωϋλικό	Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένης φάσης, k_s (m^3/sec)
Απόθεση	5×10^{-6}
Καστανοκίτρινη μάργα	1×10^{-7}
Κυανότεφρη μάργα	5×10^{-9}

Σημειώνεται ότι οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας του Πίνακα 6.1 αφορούν τα γεωϋλικά στην φάση κορεσμού τους (K_s). Όπως προαναφέρθηκε, η εισαγωγή της υδραυλικής αγωγιμότητας k στο μοντέλο γίνεται με την μορφή συνάρτησης ως προς την πίεση νερού των πόρων.

Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν «συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας» ($K-Fn$) με σταθερή τιμή K για όλες τις αναμενόμενες πιέσεις νερού των πόρων.

Επίσης, λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων για τυχόν διαφορετική θεώρησή της, η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρήθηκε ίση και προς τις 3 διευθύνσεις ($K_x = K_y = K_z$).

6.7.2. Περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα όγκου γεωϋλικών

Το λογισμικό απαιτεί και τη «συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους» ($VWC-Fn$), η οποία αποδίδει τον όγκο του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα γεωϋλικό σε συνάρτηση πάντα με την πίεση των πόρων. Καθώς η πίεση πόρων αυξάνει και το υλικό από κορεσμένο αρχίζει να γίνεται ακόρεστο, η περιεκτικότητα του σε νερό μειώνεται.

Η περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους ορίζεται ως **το ενεργό πορώδες πολλαπλασιασμένο με το βαθμό κορεσμού**. Συνεπώς, για κορεσμένα γεωϋλικά, είναι ίση με το ενεργό πορώδες.

Ο ορισμός της περιεκτικότητας σε νερό ανά μονάδα όγκου εδάφους γίνεται μέσω των εντολών (GeoStudio, 2004):

(KeyIn → Hydraulic Functions → Vol. Water Content)

Οι τιμές που αφορούν την περιεκτικότητα σε νερό, θεωρήθηκαν σταθερές για όλες τις αναμενόμενες πιέσεις νερού των πόρων και σύμφωνα με την περιεκτικότητα του νερού (φάση κορεσμού), εκτιμήθηκαν ίσες με το ενεργό πορώδες κάθε γεωυλικού (υλικά απόθεσης και υποκείμενοι σχηματισμοί).

Οι τιμές ενεργού πορώδους που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν από την βιβλιογραφία (Todd, 1980, Driscoll, 1986, Fetter, 1988) και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.2.**

Πίνακας 6.2: Τιμές περιεκτικότητας σε νερό ανά μονάδα όγκου γεωυλικών στην φάση κορεσμού, για το «μοντέλο βάσης».

Γεωυλικό	Περιεκτικότητα νερού ανά μονάδα όγκου γεωυλικού κορεσμένης φάσης, VWCs
Επίχωμα	0,15
Καστανοκίτρινη μάργα	0,01
Κυανότεφρη μάργα	0,05

6.8. Σχεδιασμός του μοντέλου και δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

Η σχεδίαση των ζωνών των διαφόρων γεωυλικών (επίχωμα και υποκείμενοι γεωλογικοί σχηματισμοί) έγινε με την εντολή (GeoStudio, 2004):

(Draw → Regions)

Στην συνέχεια με βάση το λογισμικό SEEP/W έγινε διακριτοποίηση των ζωνών των μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία.

Για το σχεδιασμό του δικτύου (mesh) πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλεγεί ένας από τους ακόλουθους τύπους:

- «Unstructured»: Διαίρεση του πεδίου σε μη δομημένα τριγωνικά στοιχεία.
- «Structured»: Διαίρεση του πεδίου σε δομημένα στοιχεία.

Και οι δύο προσεγγίσεις διακριτοποίησης έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

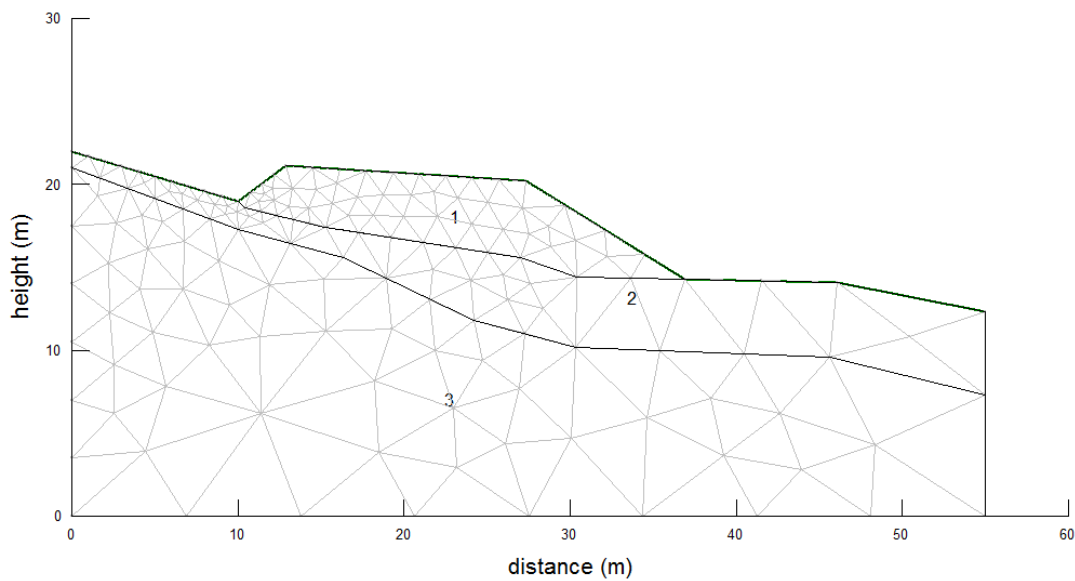
Τα μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία ορίζονται ευκολότερα απ' ό,τι τα δομημένα, ενώ ο προσδιορισμός της μορφής τους ελέγχεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Έτσι, τα μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα για ακανόνιστα ή πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα.

Όμως, πιο αξιόπιστα θεωρούνται τα δομημένα πεπερασμένα στοιχεία, γιατί προκαλούν την ελάχιστη δυνατή αλλοίωση στα ανύσματα ροής του υπόγειου νερού (velocity vectors) (Αγιουτάντης και Βαβαδάκης, 2006).

Έτσι, τελικά επιλέχθηκε η διακριτοποίηση μέσω δομημένων (structured) στοιχείων, όπως αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 6.8**.

Η παραπάνω επιλογή έγινε με την εντολή (GeoStudio, 2004):

(Draw → Regions → Material / Mesh)



Σχήμα 6.8: Ζώνες γεωϋλικών και δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.

6.9. Ορισμός οριακών συνθηκών

Ο ορισμός των οριακών συνθηκών γίνεται ως εξής: Αρχικά επιλέγεται ο τύπος του ορίου (boundary type), η τιμή και τελικά οι εξωτερικοί κόμβοι στους οποίους θα εφαρμοστεί.

Ο σχεδιασμός σταθερών (ανεξάρτητων από τον χρόνο) οριακών συνθηκών δύναται να γίνει με την μορφή στάθμης (head, H), πίεσης (pressure head, P), υδραυλικής βαθμίδας (unit gradient, i), ή παροχής νερού (total hydraulic flux, Q ή unit hydraulic flux, q). Η επιλογή γίνεται με την εντολή:

(Draw → Boundary Conditions → Type)

Στο αναπτυσσόμενο πεδίο «Type» καθορίζεται τόσο ο τύπος του ορίου, όσο και η τιμή εφαρμογής του.

Για το «μοντέλο βάσης» της παρούσας εργασίας, ως καταλληλότερες οριακές συνθήκες θεωρήθηκαν οι **πιέσεις νερού των πόρων** (pressure head, P) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του επιχώματος.

Οι πιέσεις αυτές συνδέονται άμεσα με το υδραυλικό φορτίο (head), σύμφωνα με τη σχέση (GeoStudio, 2004):

$$H = \frac{P}{\gamma_w} + y \quad [6.2]$$

όπου, H : το υδραυλικό φορτίο (m)

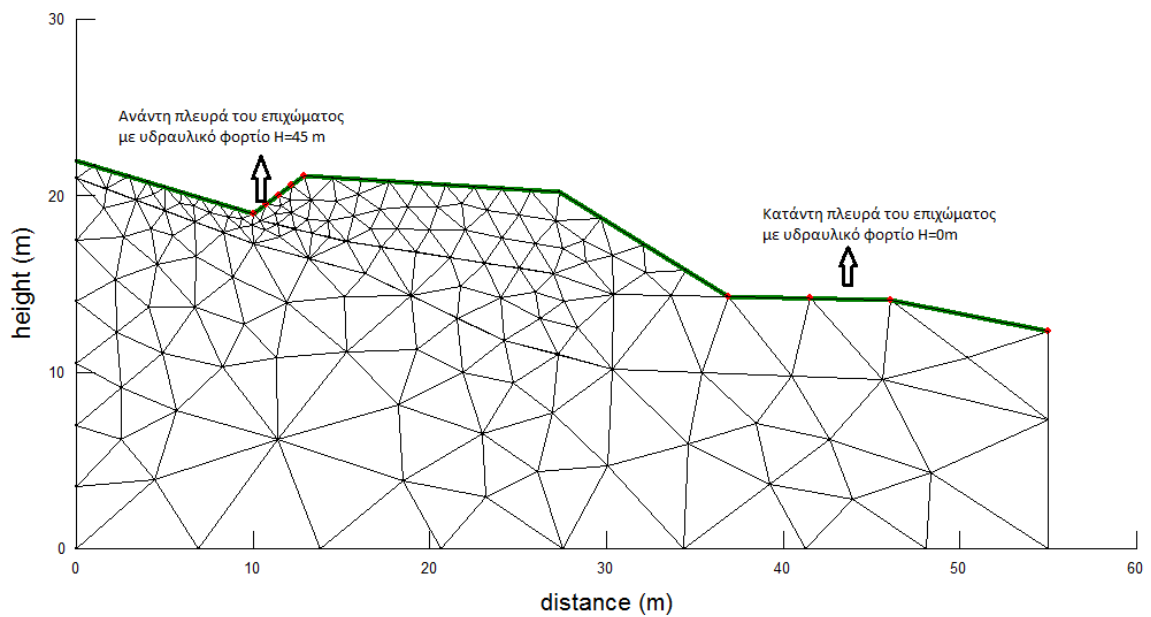
P : η πίεση πόρων που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σημείο (kPa),

γ_w : το μοναδιαίο βάρος του νερού (kN/m³), και

y : το απόλυτο υψόμετρο του σημείου (m).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο λόγος P/γ_w ισούται με το ύψος της στήλης του νερού που εφαρμόζεται σε συγκεκριμένο σημείο, ορίστηκε για το μοντέλο βάσης στην ανάντη πλευρά του επιχώματος **$P=450$ kPa** (που ισοδυναμεί με υδραυλικό φορτίο $H=45$ m σύμφωνα με την μορφολογία της περιοχής) και **$P=0$** στην κατάντη πλευρά του (αναμενόμενος μηδενισμός των πιέσεων νερού των πόρων) (**Σχήμα 6.9**).

Ο σχεδιασμός των οριακών συνθηκών έγινε στους εξωτερικούς κόμβους της κάθε περιοχής (ανάντη και κατάντη του επιχώματος) του μοντέλου βάσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.9**. Οι κόμβοι στους οποίους σχεδιάστηκαν οι παραπάνω οριακές συνθήκες διακρίνονται με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 6.9: Ορισμός οριακών συνθηκών.

6.10. Επίλυση – Αποτελέσματα μοντέλου βάσης

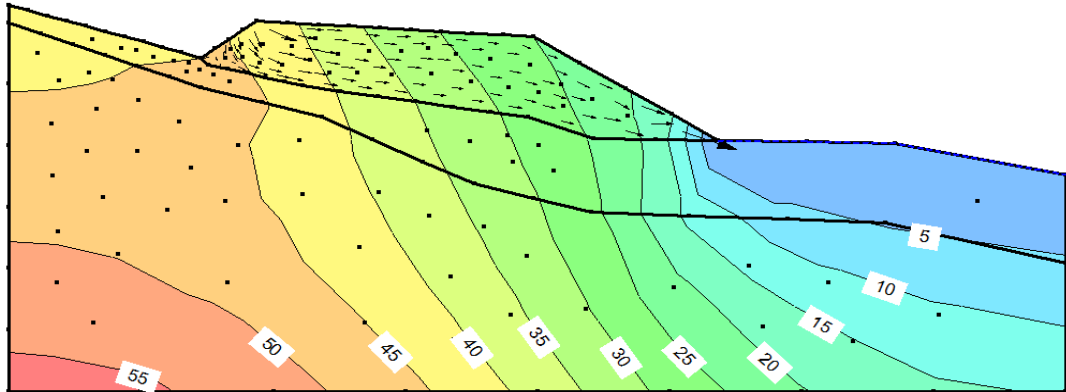
Για την επίλυση του μοντέλου και την εκτίμηση της ροής της πίεσης νερού των πόρων που αναπτύσσεται μέσα στην μάζα του επιχώματος, χρησιμοποιείται η εντολή:

(Solve)

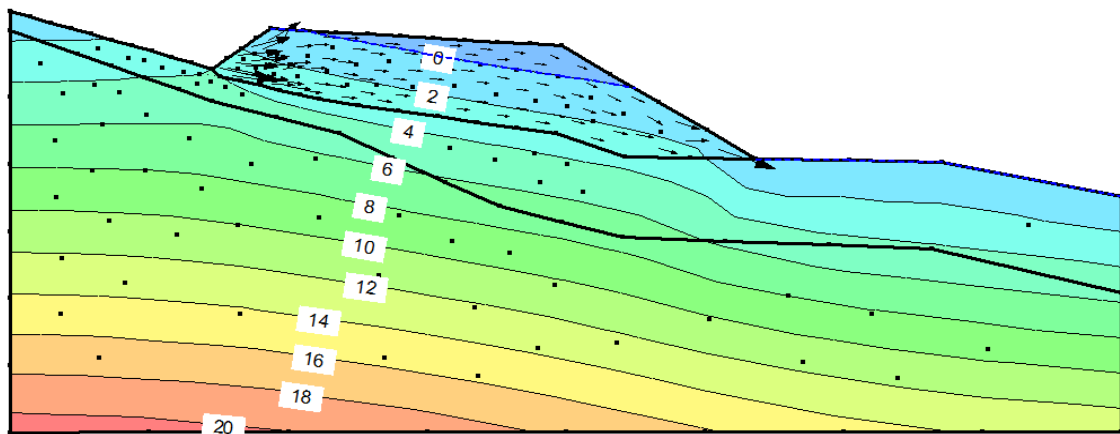
Με την εντολή (*Contour*) τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μια σειρά από τα διαγράμματα που αφορούν κυρίως στην κατανομή των πιέσεων πόρων και των ανυσμάτων ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού. Τα αποτελέσματα αυτά δύναται να εισαχθούν άμεσα στο λογισμικό SLOPE/W, μέσω του περιβάλλοντος εργασίας GEOSTUDIO.

Από την επίλυση του μοντέλου βάσης προέκυψε η κατανομή των πιέσεων νερού των πόρων (σε kPa) των γεωϋλικών κατασκευής του επιχώματος και των υποκείμενων

γεωλογικών σχηματισμών, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 6.10 και 6.11** για τα δύο σενάρια που ακολουθήθηκαν.



Σχήμα 6.10: Μοντέλο βάσης σεναρίου A: Κατανομή πιέσεων πόρων και ανυσμάτων ροής του υπόγειου νερού.



Σχήμα 6.11: Μοντέλο βάσης σεναρίου B: Κατανομή πιέσεων πόρων και ανυσμάτων ροής του υπόγειου νερού.

Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται τα ανύσματα ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού (μαύρα βέλη), όπως και η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (γαλάζια γραμμή). Σημειώνεται ότι το μέγεθος των ανυσμάτων ροής είναι ευθέως ανάλογο της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού.

7. ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

7.1. Καθορισμός παραμέτρων ανάλυσης

Αρχικά ήταν απαραίτητος ο καθορισμός των παραμέτρων ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν για την μελέτη της ευστάθειας του επιχώματος. Οι παράμετροι ορίζονται με τις επιλογές του προγράμματος

(KeyIn → Analysis Settings → Method)

Στο παράθυρο διαλόγου «Analysis Settings» και στην επιλογή «Method» ορίζεται η μέθοδος επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί (Fellenius, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer κ.ά.). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του υπό μελέτη προβλήματος είναι η τροποποιημένη μέθοδος Bishop.

Επίσης ορίζεται και το σχήμα των πιθανών επιφανειών ολίσθησης, όπως και η διεύθυνση (φορά) της πιθανής ολίσθησης σε σχέση με το εξεταζόμενο πρυνές. Όπως προαναφέρθηκε επιλέχθηκαν κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, τα κέντρα των οποίων βρίσκονται σε κάρναβο και οι ακτίνες τους ορίζονται επίσης από κάρναβο εφαπτόμενων στους κύκλους.

Λόγω της σπουδαιότητας της πίεσης του νερού των πόρων στην ευστάθεια, το πρόγραμμα ορίζει την πίεση πόρων με διάφορους τρόπους, όπως είναι ο ορισμός της πίεσης πόρων συναρτήσει του R_u , σε διακριτά σημεία με τη βοήθεια ενός κάρναβου, ή με ισοκαμπύλες πίεσης που εισάγονται από τον ίδιο τον χρήστη κ.ά.

Η πίεση των πόρων στην παρούσα εργασία ορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα που εκτιμήθηκαν από το SEEP/W. Η μέθοδος αυτή είναι ίσως η προσεγγιστικά καλύτερη, δεδομένου ότι παρέχει την δυνατότητα διαφοροποίησης των πιέσεων σε όλη την έκταση του προβλήματος.

Για την επιλογή της παραπάνω μεθόδου ορισμού της πίεσης νερού των πόρων, χρησιμοποιήθηκε η εντολή:

(KeyIn → Analysis Settings → PWP)

και στην συνέχεια, το αρχείο στο οποίο ήταν αποθηκευμένα τα αποτελέσματα της επίλυσης του SEEP/W.

7.2. Εδαφοτεχνικές παράμετροι επιχώματος και υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών

Οι βασικές εδαφικές παράμετροι που ορίστηκαν στο λογισμικό, είναι η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ'), η συνοχή (c') και το μοναδιαίο βάρος (γ).

Με την εντολή:

(KeyIn → Material Properties)

Ορίστηκαν στο λογισμικό οι παράμετροι του επιχώματος.

Πίνακας 7.1: Παράμετροι γεωδλικών για κάθε σχηματισμό του μοντέλου βάσης σεναρίου Α.

Γεωδλικό	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	Συνοχή, c (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	Περατότητα k (m/sec)	Περιεκτικότητα νερού ανά μονάδα όγκου γεωδλικού κορεσμένης φάσης, VWC
Επίχωμα	23	39	10	5×10^{-6}	0,15
Καστανοκίτρινη μάργα	22	48	11	1×10^{-7}	0,01
Κυανότεφρη μάργα	25	30	9	5×10^{-9}	0,05

Οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ'), της συνοχής (c') και του μοναδιαίου βάρους (γ_b) του επιχώματος εκτιμήθηκαν βάση βιβλιογραφικών αναφορών, ενώ οι αντίστοιχες τιμές των υποκείμενων σχηματισμών υπολογίστηκαν εργαστηριακά.

Πίνακας 7.2: Παράμετροι γεωδλικών για κάθε σχηματισμό του μοντέλου βάσης σεναρίου Β.

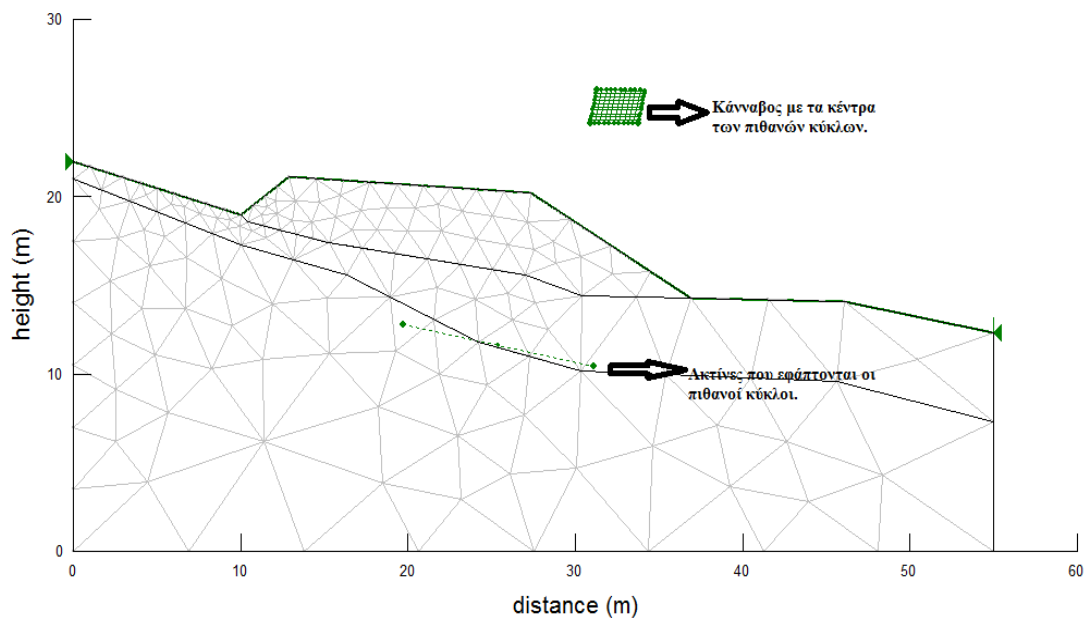
Γεωδλικό	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	Συνοχή, c (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	Περατότητα k (m/sec)	Περιεκτικότητα νερού ανά μονάδα όγκου γεωδλικού κορεσμένης φάσης, VWC
Επίχωμα	23	39	10	5×10^{-6}	0,15
Καστανοκίτρινη μάργα	22	5	12	1×10^{-7}	0,01
Κυανότεφρη μάργα	25	30	9	5×10^{-9}	0,05

Οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ'), της συνοχής (c') της καστανοκίτρινης μάργας εκτιμήθηκαν ότι αντιστοιχούν σε αυτές της παραμένουσας αντοχής.

7. 3. Ορισμός πιθανών επιφανειών ολίσθησης

Για το μοντέλου του επιχώματος ορίστηκαν οι πιθανές επιφάνειες ολίσθησης στο λογισμικό SLOPE/W.

Μετά από διερεύνηση των πλέον πιθανών κέντρων και ακτινών ολίσθησης, προσδιορίστηκε ο κένναβος των κέντρων των κύκλων και οι εφαπτόμενες σ' αυτόν βάση καννάβου που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7.1**.



Σχήμα 7.1: Κάνναβοι κέντρων και εφαπτόμενων για τον ορισμό κυκλικών επιφανειών ολίσθησης.

Με την εντολή:

(Draw → Slip Surface → Grid)

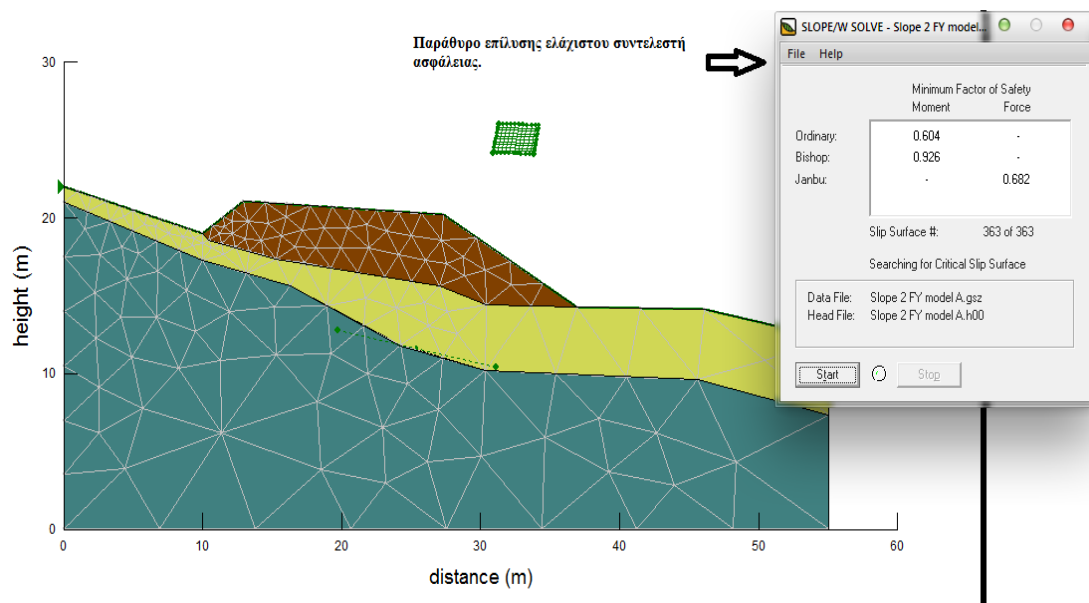
ορίζεται ο κάνναβος με τα πιθανά κέντρα των κύκλων, ενώ με την εντολή:

(Draw → Slip Surface → Radius)

ορίζονται οι πιθανές ακτίνες των κύκλων αυτών.

Η επίλυση γίνεται με την εντολή (βλέπε **Σχήμα 7.2**):

(Tools → Solve)

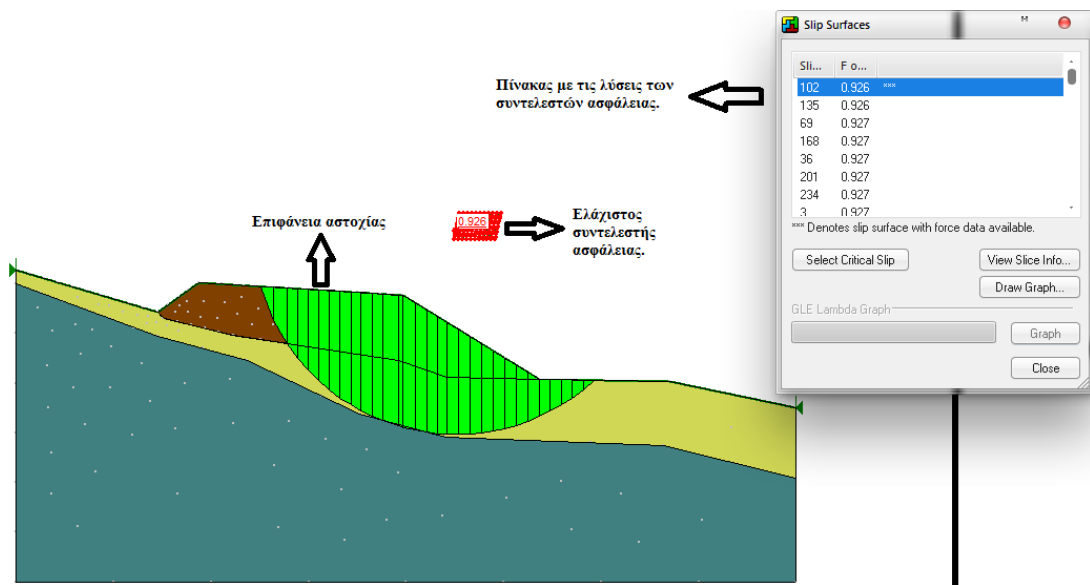


Σχήμα 7.2: Επίλυση για τον προσδιορισμό του ελάχιστου συντελεστή ασφάλειας, παρουσιάζοντας το παράθυρο και τις επιλεγμένες μεθόδους υπολογισμού.

Η εντολή

(Window → Contour)

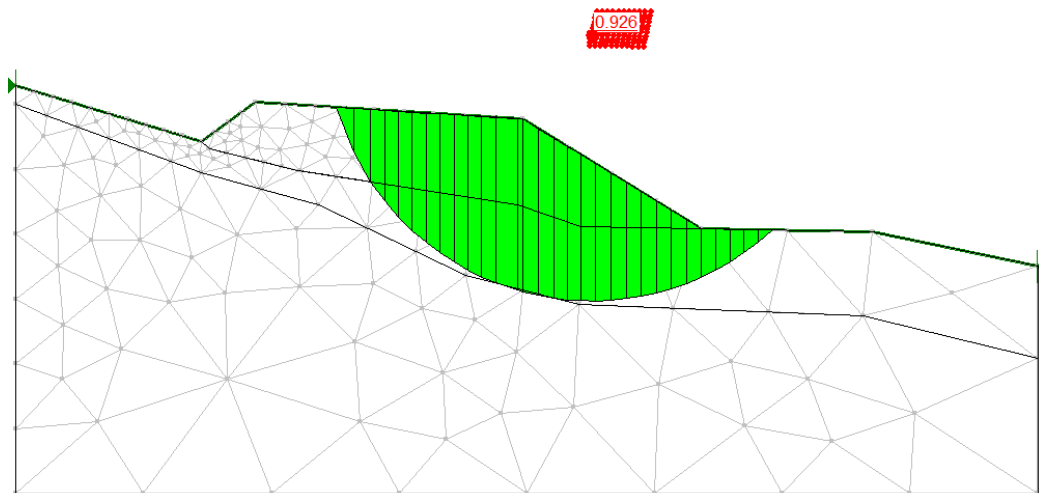
εμφανίζει γραφικά όλες τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης και τους ελάχιστους συντελεστές ασφάλειας (βλέπε **Σχήμα 7. 3**).



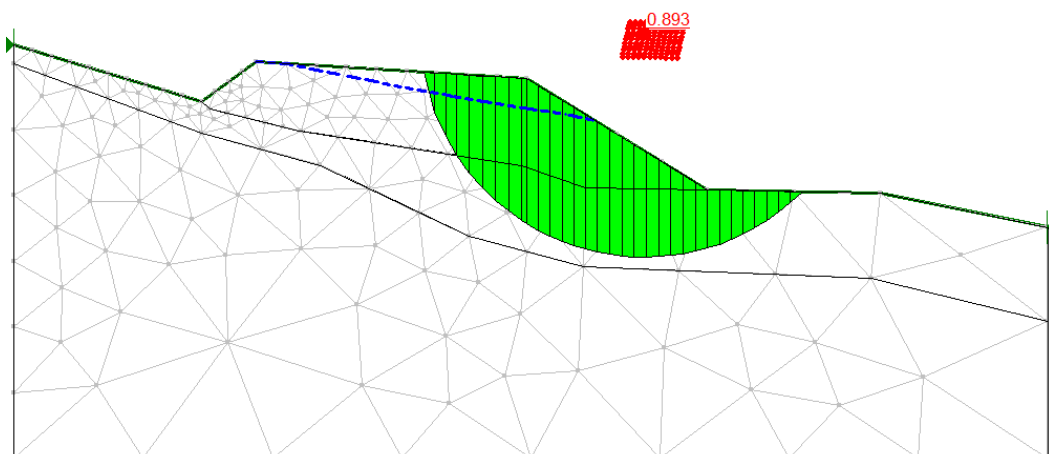
Σχήμα 7.3: Επιφάνεια ολίσθησης και ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας μετά την επίλυση στο SLOPE/W.

7.4. Αποτελέσματα μοντέλου βάσης

Στο **Σχήμα 7.4** δίνεται το (γραφικό) αποτέλεσμα της επίλυσης. Παρατηρείται αστοχία του πρανούς του επιχώματος ($FS=0,93$) ακριβώς στα όρια κυανότεφρης και καστανοκίτρινης μάργας για την μέθοδο A. Στο **Σχήμα 7.5** δίνεται το (γραφικό) αποτέλεσμα της επίλυσης για την μέθοδο B. Παρατηρείται αστοχία του πρανούς του επιχώματος ($FS=0,89$) κοντά στην διαεπιφάνεια των δυο γεωλογικών σχηματισμών.



Σχήμα 7.4: Μοντέλο βάσης σεναρίου A, γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς.



Σχήμα 7.5: Μοντέλο βάσης σεναρίου B, γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς.

7.5. Παραμετρική ανάλυση

Πέρα του αρχικού μοντέλου (μοντέλο βάσης), έγινε παραμετρική ανάλυση και επίλυση επιπλέον μοντέλων (βλέπε Πίνακα 7.3) με διαφοροποίηση:

- α) Των αρχικά θεωρούμενων υδραυλικών παραμέτρων k και VWC και των οριακών συνθηκών στην ανάντη πλευρά του επιχώματος. Επιλύθηκαν έξι μοντέλα, τα οποία αφορούν διαφοροποιήσεις της k (B1 έως B6) (**Πίνακας 7.3**), έξι μοντέλα με διαφοροποιήσεις του VWC (C1 έως C6) (**Πίνακας 7.3**) και τέσσερα μοντέλα με διαφοροποίηση των οριακών συνθηκών ανάντη του επιχώματος (D1 έως D4) (**Πίνακας 7.3**), προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της πιεζομετρίας στην ευστάθεια του πρανούς. Τα μοντέλα αυτά επιλύθηκαν πρώτα με το SEEP/W (όπου προέκυψαν νέα πιεζομετρικά δεδομένα) και μετά με το SLOPE/W.
- β) Των αρχικά θεωρούμενων γεωτεχνικών παραμέτρων c' και ϕ' . Επιλύθηκαν έξι μοντέλα, τα οποία αφορούν διαφοροποιήσεις της c' (E1 έως E6) (**Πίνακας 7.3**) και έξι μοντέλα με διαφοροποιήσεις της ϕ' (F1 έως F6) (**Πίνακας 7.3**), προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων αυτών στην ευστάθεια του πρανούς. Τα μοντέλα αυτά επιλύθηκαν μόνο με το SLOPE/W, καθώς η πιεζομετρία σε αυτά τα μοντέλα παραμένει σταθερή με αυτή του μοντέλου βάσης.
- γ) Θεωρώντας υλικό 3A ως υλικό κατασκευής του επιχώματος (Μοντέλο G) (**Πίνακας 7.3**),
- δ) Προσθέτοντας στραγγιστήριο στη βάση του επιχώματος (Μοντέλα H1 και H2) (**Πίνακας 7.3**).

Τα μοντέλα αυτά επιλύθηκαν πρώτα με το SEEP/W (όπου προέκυψαν νέα πιεζομετρικά δεδομένα) και μετά με το SLOPE/W.

Αναλυτικά, τα μοντέλα που επιλύθηκαν, οι διαφοροποιήσεις τους ως προς το αρχικό μοντέλο βάσης (βλέπε **Πίνακα 7.3**), καθώς και τα αποτελέσματα των επιλύσεών τους καταγράφονται στον **Πίνακα 7.3 (α-β)**.

Οι παράμετροι /γεωτεχνικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για το υλικό 3A και το στραγγιστήριο (μοντέλα G και H1, H2, αντίστοιχα) παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.4**.

Πίνακας 7.3 (α): Επίλυση παραμετρικής ανάλυσης.

Μοντέλο	Διαφοροποίηση από μοντέλο βάσης	FS
Μοντέλο βάσης	-	0,93
Διαφοροποίηση πιεζομετρίας - Επίλυση με SEEP/W και SLOPE/W		
B1	k επιχώματος (5×10^{-7} m/sec)	1,07
B2	k επιχώματος (5×10^{-5} m/sec)	0,91
B3	k καστανοκίτρινης μάργας (10^{-8} m/sec)	0,90
B4	k καστανοκίτρινης μάργας (10^{-6} m/sec)	1,07
B5	k κυανότεφρης μάργας (5×10^{-10} m/sec)	0,93
B6	k κυανότεφρης μάργας (5×10^{-8} m/sec)	0,91
C1	VWC επιχώματος (0,10)	0,93
C2	VWC επιχώματος (0,20)	0,93
C3	VWC καστανοκίτρινης μάργας (0,005)	0,93
C4	VWC καστανοκίτρινης μάργας (0,015)	0,93
C5	VWC κυανότεφρης μάργας (0,04)	0,93
C6	VWC κυανότεφρης μάργας (0,06)	0,93
D1	P ανάντη πλευρά επιχώματος (55 m = 550 KPa)	0,67
D2	P ανάντη πλευρά επιχώματος (35 m = 350 KPa)	1,19
D3	P ανάντη πλευρά επιχώματος (50 m = 500 KPa)	0,79
D4	P ανάντη πλευρά επιχώματος (40 m = 400 KPa)	1,06
Διαφοροποίηση γεωτεχνικών ιδιοτήτων - Επίλυση με SLOPE/W		
E1	c' επιχώματος (29,8 kPa)	0,89
E2	c' επιχώματος (48,4 kPa)	0,96
E3	c' καστανοκίτρινης μάργας (45 kPa)	0,84
E4	c' καστανοκίτρινης μάργας (55 kPa)	1,07
E5	c' κυανότεφρης μάργας (25 kPa)	0,89
E6	c' κυανότεφρης μάργας (35 kPa)	0,95
F1	ϕ' επιχώματος ($9,2^\circ$)	0,95
F2	ϕ' επιχώματος ($11,5^\circ$)	0,90
F3	ϕ' καστανοκίτρινης μάργας (8°)	1,01
F4	ϕ' καστανοκίτρινης μάργας (15°)	0,81
F5	ϕ' κυανότεφρης μάργας (5°)	0,95

Πίνακας 7.3 (β): Αποτελέσματα επιλύσεων παραμετρικής ανάλυσης.

F6	φ' κυανότεφρης μάργας (13°)	0,89
Διαφοροποίηση σχεδιασμού - Επίλυση με SEEP/W και SLOPE/W		
G	Υλικό 3A για επίχωμα	1,12
H1	Στραγγιστήριο	1,06
H2		1,14

Πίνακας 7.4: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα Μοντέλα G, H1 και H2.

Παράμετροι	3A	Στραγγιστήριο	
Μοντέλα	G	H1	H2
γ (kN/m ³)	20	20	20
c (kPa)	40	0	5
ϕ (μοίρες)	5	35	30
k (m/sec)	5×10^{-6}	5×10^{-5}	1×10^{-4}
VWC	0,15	0,25	0,25

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με την εφαρμογή στραγγιστηρίου ο συντελεστής ασφάλειας του επιχώματος έχει τιμές με εύρος $FS = 1,1 - 1,2$ που καθιστά το επίχωμα πιο σταθερό, ενώ η χειρότερη περίπτωση είναι όταν έχουμε μεγάλο ύψος στήλης νερού (φορτίο στην ανάντη πλευρά του επιχώματος) όπου ο συντελεστής ασφάλειας παίρνει την τιμή $FS = 0,67$, όπου το επίχωμα δεν είναι καθόλου ασφαλές και εκδηλώνεται η αστοχία (**Πίνακα 2.4**) για το σενάριο Α.

Για το σενάριο Β προκύπτει ότι με την εφαρμογή στραγγιστηρίου ο συντελεστής ασφάλειας του επιχώματος έχει τιμή $FS = 2,39$ που καθιστά το επίχωμα ασφαλές (**Πίνακα 2.4**).

Τα (γραφικά) αποτελέσματα των παραπάνω επιλύσεων παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Γ**.

7.6. Στατιστική ανάλυση

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας αστοχίας του επιχώματος, έγινε στατιστική ανάλυση, όπου για κάθε παράμετρο που χρησιμοποιήθηκε, ορίστηκαν στοιχεία στατιστικής και πιθανοτήτων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση κ.ά.). Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε σε αυτήν την φάση της παρούσας εργασίας είναι το γεγονός ότι δεν υπήρχαν πολλά δεδομένα για την ασφαλή εξαγωγή αποτελεσμάτων. Έτσι έγινε μια θεωρητική εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου (στατιστική ανάλυση) με διαφοροποιήσεις σε μοντέλα έκτος του βασικού (μοντέλο βάσης), που βάση της παραμετρικής ανάλυσης προσημείωναν την καλύτερη και την χειρότερη περίπτωση.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, ο συντελεστής ασφάλειας ενός εδαφικού πρανούς εκφράζει την πιθανότητα που αυτό έχει να αστοχήσει κάτω από μια συγκεκριμένη εντατική κατάσταση.

Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας που αναπτύχθηκαν δεν εξετάζουν κανένα άλλο από τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την ευστάθεια, παρά μόνο το συνδυασμό δυνάμεων και τάσεων πάνω σε μια δεδομένη επιφάνεια ολίσθησης. Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας όμως, θα έπρεπε να λαμβάνονται υπόψη και τα παρακάτω:

1. Το γεγονός ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους, λόγω ύπαρξης διαφορετικών ενστρώσεων ή ανομοιογένειας, είναι πιθανό να έχει εκτιμηθεί λάθος. Επίσης θα έπρεπε να γίνεται συσχετισμός της αντοχής που μετράται στο εργαστήριο με αυτή που πραγματικά παρουσιάζει το υλικό στο πεδίο.
2. Η αβεβαιότητα όσον αφορά τα φορτία που επιβάλλονται στο πρανές, είτε πρόκειται για επιφανειακή φόρτιση, πίεση πόρων, ή ακόμη και το ίδιο το βάρος του υλικού.
3. Το δεδομένο ότι είναι πιθανό η προσομοίωση να μην αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες στο πρανές, δηλαδή ο μηχανισμός αστοχίας του πρανούς

να είναι διαφορετικός από αυτόν που θεωρητικά έχει αναγνωριστεί από το μηχανικό.

4. Το ότι θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι είναι επιτρεπτές οι παραμορφώσεις εσωτερικά στη μάζα του πρανούς.

Ως εκ τούτου ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας δεν θα πρέπει να επιτρέπει λοιπόν χονδροειδή σφάλματα, όπως για παράδειγμα μια κακή επιλογή μηχανισμού αστοχίας λόγω του ότι δεν αναγνωρίστηκαν επιφάνειες χαμηλής διατμητικής αντοχής μέσα στη μάζα του πρανούς (Nash, 1987).

Ο De Mello (1977) επισήμανε ότι ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με τη μονάδα, δεν υποδεικνύει απαραίτητα ότι το πρανές θα αστοχήσει. Ο πραγματικός συντελεστής ασφάλειας επηρεάζεται κατά πολύ από λεπτομέρειες στη γεωλογία, χαρακτηριστικά τάσης – παραμόρφωσης του υλικού, την πίεση των πόρων, τις αρχικές τάσεις, την προοδευτική αστοχία και μια σειρά από παράγοντες ακόμη.

Έτσι, παρόλο που η ανάλυση της ευστάθειας ενός εδαφικού πρανούς γίνεται με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό του συντελεστή ευστάθειας, θα πρέπει η ανάλυση αυτή να περιλαμβάνει μια αναφορά στην πιθανή αβεβαιότητα με την οποία εισήχθησαν κάποιες από τις παραμέτρους (Nash, 1987).

Οι έρευνες επικεντρώνονται πλέον στη διαδικασία σχεδιασμού. Αν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ή ακόμη και η μεταβλητότητα αυτών μπορούν να προσδιοριστούν πλήρως, τότε είναι δυνατή μια λεπτομερής ανάλυση. Αν η μεταβλητότητα των παραμέτρων του υλικού και της πίεσης των πόρων μπορεί να εκφραστεί στατιστικά, το ενδεχόμενο αστοχίας μπορεί να προκύψει με βάση τη θεωρία των πιθανοτήτων.

Η δυσκολία σε αυτή την προσέγγιση έγκειται στο γεγονός ότι περιοχές αβεβαιότητας απαιτούν μεγάλο αριθμό στατιστικών στοιχείων για την εξασφάλιση αξιόπιστου

αποτελέσματος, πράγμα που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί.

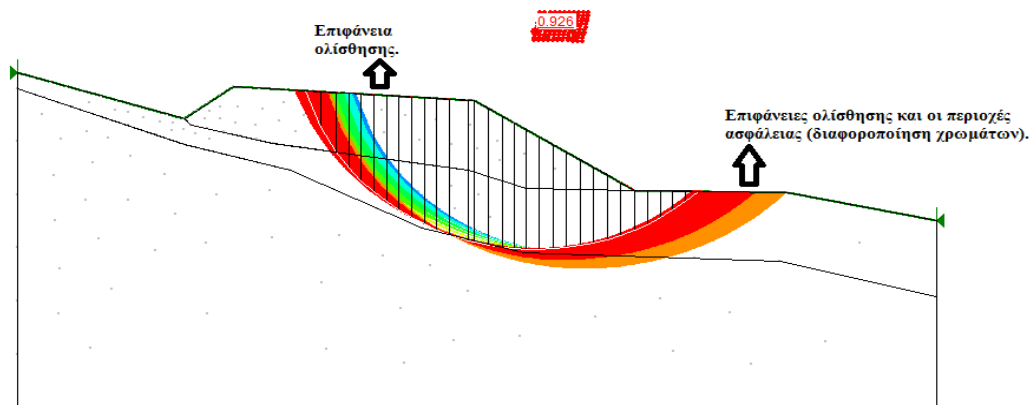
Οι μεθοδολογίες αυτές, έχουν σαν βάση τους τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, αλλά προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα μιας πιο λογικής προσέγγισης στο σχεδιασμό με σκοπό την ανάλυση της ευστάθειας πρανών, έστω κι αν εισήχθησαν καθυστερημένα στον τομέα των γεωτεχνικών (Nash, 1987).

7.8. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης

Στατιστική ανάλυση επιχειρήθηκε στο μοντέλο βάσης, D1 και D2 που αποτελούν την χειρότερη και την καλύτερη περίπτωση αντίστοιχα. Το βασικότερο που πρέπει να αναφερθεί είναι οι διαφοροποιήσεις που προκαλεί η πίεση νερού των πόρων στην ευστάθεια του επιχώματος και η αβεβαιότητα της διακύμανσης της πιεζομετρικής επιφάνειας.

Τα αποτελέσματα καταγράφονται αναλυτικά στον **Πίνακα 7.5** θεωρώντας τις τιμές αυτές σαν μέσες τιμές και υποθέτοντας διάφορα εύρη τυπικής απόκλισης.

Οι διακυμάνσεις από πορτοκαλί μέχρι κόκκινο χρώμα αποτελούν τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης με συντελεστή ευστάθειας μικρότερου της μονάδας και οι χρωματικές διακυμάνσεις πράσινου μέχρι μπλε εκφράζουν τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης με συντελεστή ευστάθειας μεγαλύτερου της μονάδας.



Σχήμα 7.6: Στατιστική ανάλυση των επιφανειών ολίσθησης και των ελάχιστων συντελεστών ασφάλειας.

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης.

Μοντέλο	Εύρος τυπικής απόκλισης των γεωϋλικών	M.O. FS	Πιθανότητα (%)
Μοντέλο βάσης	συνοχής: 5 kPa	0,93	99,5
	συνοχής: 10 kPa		89,5
	συνοχής: 15 kPa		80,4
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 1°		100
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 2°		100
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 3°		99,5
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 1°, συνοχής: 5 kPa		99,2
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 2°, συνοχής: 10 kPa		89,9
	γωνίας εσωτερικής τριβής: 3°, συνοχής: 15 kPa		80,7
D1	γωνίας εσωτερικής τριβής: 2°, συνοχής: 10 kPa	0,67	100
D2	γωνίας εσωτερικής τριβής: 2°, συνοχής: 10 kPa	1,20	0.1

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η διερεύνηση της αστοχίας πραγματοποιήθηκε με δυο διαφορετικά σενάρια θεωρώντας:

- i) Άμεση εκδήλωση της αστοχίας στο σύνολό της (σενάριο Α).
- ii) Εκδήλωση προοδευτικής αστοχίας (σενάριο Β).

Επιλύοντας το σενάριο Α προέκυψε ότι:

- Η επιφάνεια ολίσθησης οριοθετείται από τη διεπιφάνεια μεταξύ της καστανοκίτρινης και κυανότεφρης μάργας, όπως προέκυψε και από τις ερευνητικές γεωτρήσεις.
- Για να επέλθει αστοχία απαιτείται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων που ισοδυναμεί με ύψος στήλης νερού 45m, περίπτωση ακραία, παρόλο που θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το μέγεθος του υδροφορέα που αναπτύσσεται στον ασβεστολιθικό σχηματισμό.

Η λειτουργία στραγγιστηρίου στη βάση του επιχώματος θα αύξανε τον συντελεστή ευστάθειας στο $FS = 1,2$ και θα απέτρεπε την αστοχία.

Το δεύτερο σενάριο (Β) βασίζεται στην υπόθεση ότι ο εμποτισμός της καστανοκίτρινης μάργας είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πίεσης πόρων, την ενεργοποίηση μικρότερης διατμητικής αντοχής των σχηματισμών με την αύξηση της παραμόρφωσης και τελικά την εκδήλωση προοδευτικής αστοχίας του πρανούς.

Ενδείξεις που ενισχύουν το δεύτερο σενάριο είναι τα φαινόμενα ερπυσμού που αναπτύσσονται στο επίχωμα.

Επιλύοντας το σενάριο Β προέκυψε ότι ο συντελεστής ασφάλειας με την ύπαρξη στραγγιστηρίου είναι στο $FS = 2,4$ και η επιφάνεια ολίσθησης οριοθετείτε μεταξύ της καστανοκίτρινης και κυανότεφρης μάργας.

Οι παραπάνω υποθέσεις δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν ή να αποκλειστούν με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα. Επίσης δεν υπάρχουν γεωτρήσεις στην ανάντη πλευρά του επιχώματος που θα πληροφορούσαν σχετικά με το ύψος στήλης νερού.

Είναι επιβεβλημένο για μια πιο αξιόπιστη τεκμηρίωση του μηχανισμού αστοχίας αντιπροσωπευτική δειγματοληψία και περαιτέρω διερεύνηση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των σχηματισμών.

Επίσης προτείνεται η εγκατάσταση πιεζόμετρου στην ανάντη πλευρά του επιχώματος για συστηματική παρακολούθηση της εποχικής μεταβολής της πίεσης των πόρων και κλισιμέτρων για την παρακολούθηση για τυχόν επαναδραστηριοποίηση του φαινομένου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ✓ Αγιουτάντης, Ζ.–Βαβαδάκης, Δ. (2006). «Επικαιροποίηση της Οριστικής Μελέτης φράγματος Πλακιώτισσας Μεσσαράς Κρήτης – Τεύχος 5: Υδραυλικός έλεγχος στην προτεινόμενη θέση έδρασης του φράγματος», Φορέας Υλοποίησης: Πολυτεχνείο Κρήτης, ΟΑΔΥΚ, Χανιά.
- ✓ Αγιουτάντης, Ζ. (2002). «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
- ✓ Αντωνίου, Α.Α. (2005). «Τεχνική Γεωλογία έργων Πολιτικού Μηχανικού», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Λάρισα.
- ✓ ASTM (1990). «Annual Book of ASTM Standards», ASTM publication, v.0408.
- ✓ Βιδάκης, Μ.–Meulenkamp, J.A.–Σκούρτση-Κορωναίου, Β. (1992). «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας. Φύλλο Επάνω Αρχάναι», Γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000, ΙΓΜΕ.
- ✓ Bowles, J.E. (1986). «Engineering properties of soils and their measurement», 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- ✓ Craig, R.F. (1997). «Soil Mechanics», University of Dundee – Department of Civil Engineering, UK.
- ✓ ΓΥΣ (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) (1972). «Τοπογραφικός χάρτης. Φύλλο Επάνω Αρχάναι», Τοπογραφικός χάρτης κλίμακας 1:50.000.
- ✓ Δολαψάκης, Β.–Ντολακογιώργου, Α. (2007). «Οριοθέτηση πεδινής κοίτης Γαζανού ποταμού», Πτυχιακή Εργασία, ΑΤΕΙ Κρήτης – Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά.

- ✓ Driscoll, F.G. (1986). «Groundwater and Wells», 2nd Edition, Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul – Minnesota, USA.
- ✓ ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) (1986). «Εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής (Ε105-86)», ΥΠΕΧΩΔΕ – ΓΓΔΕ – Δ/νση Ερευνών Εδαφών (ΕΚ1), Αθήνα.
- ✓ Fetter, C.W. (1988). «Applied Hydrogeology», 2nd Edition, Merrill Publishing Company, Columbus – Ohio, USA.
- ✓ GEO-SLOPE International Ltd (2004). «GeoStudio Tutorials: Includes Student Edition Lessons», 1st Edition, Calgary – Alberta, Canada.
- ✓ Head, K.H. (1992). «Manual of soil laboratory testing», Vol. 1-3, 2nd Edition, Pentech Press Limited, London, UK.
- ✓ <http://www.weatheronline.gr/weather/maps/current>
- ✓ Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H. (1982). «Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods», Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle – USA, pp. 1310-1330.
- ✓ Κανελλαΐδης Γ., - Μαλέρδος Γ., - Γλάρος Γ., (2001). «Σημειώσεις Οδοποιίας II», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής, Αθήνα.
- ✓ Καπετανάκης, Μ. (2001). «Φυσιογραφική κατανομή και υπολογισμός του συνολικού όγκου βροχόπτωσης στο νησί Κρήτη (Διάκριση μικροκλιματικών ζωνών)», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

- ✓ Kezdi, A. (1974). «Handbook of soil mechanics – Vol. 1: Soil physics», Elsevier Scientific Publishing Company Inc., New York, USA.
- ✓ Kezdi, A. (1980). «Handbook of soil mechanics – Vol. 2: Soil testing», Elsevier - North Holland Inc., New York, USA.
- ✓ Κούκης, Γ.Χ. και Σαμπατακάκης, Ν.Σ. (2007). «Γεωλογία Τεχνικών Έργων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- ✓ Krahn, J. (2004). «Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology», 1st Edition, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary – Alberta, Canada.
- ✓ Miao, T. – Ma, C. – Wu, S. (1999). «Evolution Model of Progressive Failure of Landslides», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, October 1999, vol. 125, No. 10, pp. 827-831.
- ✓ Nash, D. (1987). «A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis: Slope Stability – Geotechnical Engineering and Geomorphology», John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- ✓ Ντούλης, Γ. – Κορωνιώτης, Κ. (2008). «Οριστική Μελέτη Τεχνικών Έργων – Μελέτη Σήραγγας Αγίας Βαρβάρας» Έκδοση Α, αριθ. Τεύχους Τ6.
- ✓ Ξηροτύρη, Α. (1992). «Κατολισθητικές κινήσεις επιχώματος σε μαργαϊκή άργιλο – Προτεινόμενα μέτρα αντιστηρίξεως», Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, 21-23 Οκτωβρίου 1992, ΤΕΕ – Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, τομ. 1, Θεσσαλονίκη.
- ✓ Παπαχαρίσης, Ν. και Μάνου-Ανδρεάδη, Ν. (2009). «Γεωτεχνική Μηχανική. Έρευνα – Γεωτρήσεις – Εργαστήριο», Αφοί Κυριακίδη ΑΕ, Θεσσαλονίκη.

- ✓ Περλέρος, Β., Παπαμαστοράκης, Δ. και Κριτσωτάκης, Μ. – Δρακοπούλου, Ε. – Παναγόπουλος, Α. (2004). «Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και προοπτικές», Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Απρίλιος 2004, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, Θεσσαλονίκη.
- ✓ Περιφέρεια Κρήτης 2010. Πρακτικό της επιτροπής διαπίστωσης των αιτίων της εδαφικής αστοχίας στη Χ.Θ. 21+575 (Δ300) Ηράκλειο.
- ✓ Σακελλαρίου, Μ. (2006). «Τεχνικά υλικά, επιχώματα», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- ✓ Σούλιος, Γ. (1986). «Γενική Υδρογεωλογία», Τόμοι Α και Β, University Press, Θεσσαλονίκη.
- ✓ Στειακάκης, Ε. (2008). «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής», Πολυτεχνείο Κρήτης - Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- ✓ Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1969). «Εφαρμοσμένη Εδαφομηχανική: Προβλήματα μελέτης και κατασκευής», Τόμος Β-III, Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
- ✓ Todd, D.K. (1980). «Groundwater Hydrology», Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- ✓ Tsiambaos, G. (1991). «Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls», Engineering Geology 30 (1991), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, pp. 357-369.
- ✓ Tsiambaos, G. – Koukis, G. (1990). «Geotechnical conditions of the Iraklion city, Crete», Proceedings of 6th International IAEG Congress, 6-10 August 1990, vol. 3 – theme four: Surface engineering geology, Amsterdam, Netherlands.
- ✓ ΥΠΕΧΩΔΕ (2003). «ΟΜΟΕ: ΤΕΥΧΟΣ Γεωλογικών – Γεωτεχνικών Έργα Πολιτικού Μηχανικού».

- ✓ ΥΠΕΧΩΔΕ (2006). «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ 02-07-01-00)», στο πλαίσιο του «Προγράμματος Δράσεων για τον εκσυγχρονισμό της παραγωγής των Δημοσίων Έργων» (Action Plan), υπό την εποπτεία και καθοδήγηση της 2ης Ομάδας Διοίκησης Έργου (2η ΟΔΕ), Έκδοση 1.0.
- ✓ Φυτρολάκης, Ν. (1980). «Η γεωλογική δομή της Κρήτης – προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα (μεθ' ενός τεκτονικού χάρτου εκτός κειμένου)», Διατριβή Υφηγεσίας, Εκδ. Έδρας Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας – Γεωλογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα, 147 σελ.
- ✓ Χρηστάρας, Β. (2002). «Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές Εδαφομηχανικής», ΤΕΕ, Αθήνα.
- ✓ Zaruba, Q. and Mencl, V. (1982). «Landslides, Slopes (Soil mechanics)», 2nd Completely Edition, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands.
- ✓ Zaruba, Q. and Mencl, V. (1969). «Landslides and their control», Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Φωτογραφίες

- Φωτογραφίες από την θέση αστοχίας του εξεταζόμενου επιχώματος.



Φωτογραφία Α.1: Περιοχή αστοχίας επιχώματος.



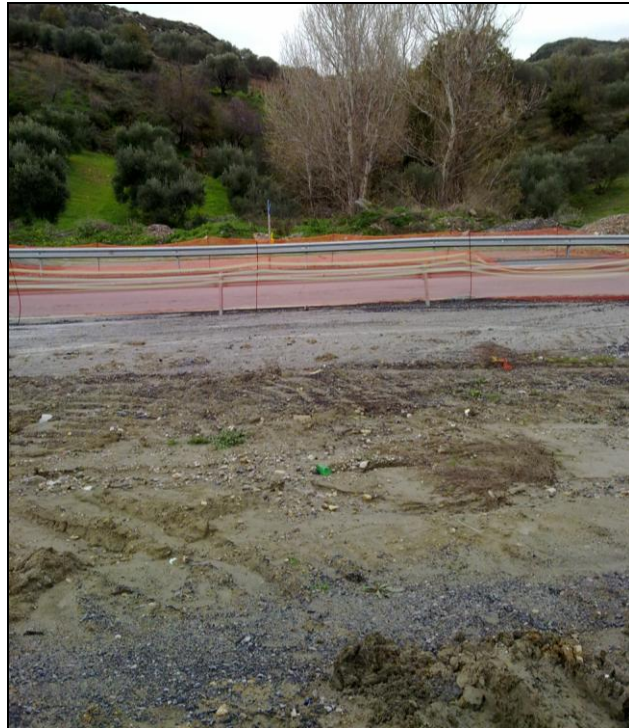
Φωτογραφία Α.2: μέτωπο επιχώματος.



Φωτογραφία Α.3: Περιοχή αστοχίας επιχώματος (μέτωπο κατολίσθησης).



Φωτογραφία Α.4: Περιοχή αστοχίας επιχώματος (μικρότερα μέτωπα).



Φωτογραφία Α.5: Παλαιά και νέα οδός (βάθος της εικόνας).



Φωτογραφία Α.6: Παλαιά και νέα οδός (ανάντη) και ανάγλυφο περιοχής.



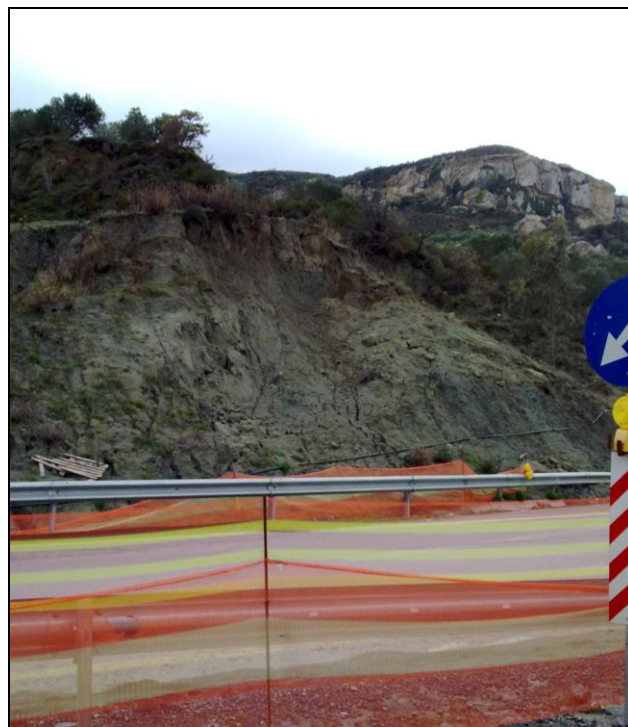
Φωτογραφία Α.7: *Ανάγλυφο περιοχής.*



Φωτογραφία Α.8: *Μέτωπο επιχώματος.*



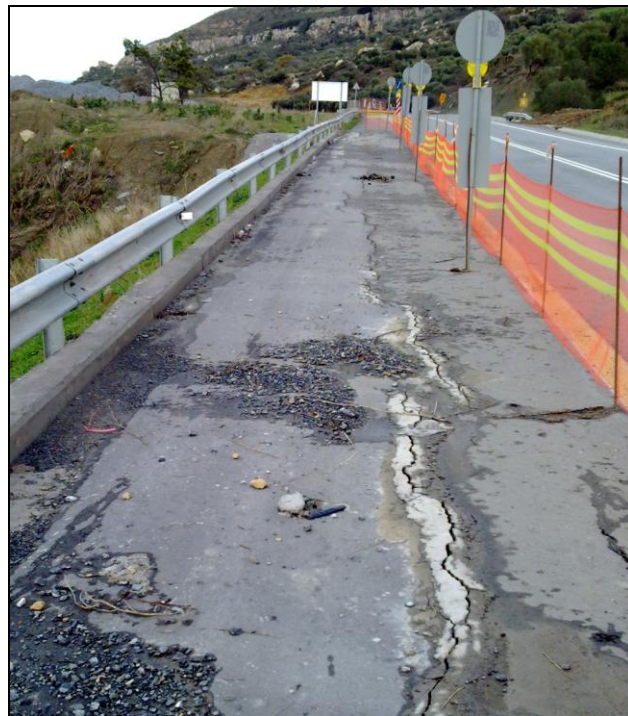
Φωτογραφία A.9: Μέτωπο και κορυφή επιχώματος .



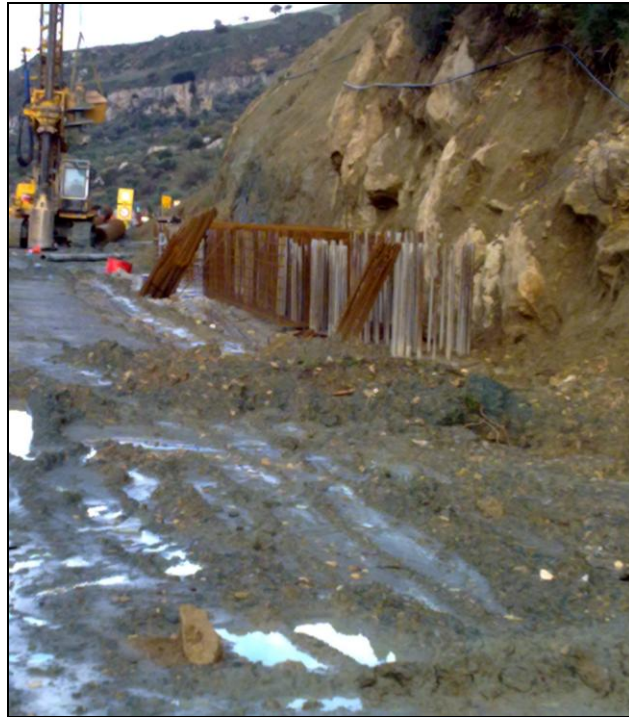
Φωτογραφία A.10: Ανάντη πλευρά οδού.



Φωτογραφία Α.11: Ρωγμές στην επιφάνεια της οδού.



Φωτογραφία Α.12: Ρωγμές (ερπυσμός) στην επιφάνεια της οδού.



Φωτογραφία A.13: Έργα αντιστήριξης πρανών σε παρακείμενη θέση.



Φωτογραφία A.14: Έργα αντιστήριξης πρανών σε παρακείμενη θέση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποτελέσματα εργαστηριακών δόκιμων

- Αναλυτικοί πίνακες αποτελεσμάτων δοκιμών διάτμησης.
- Διαγράμματα οριζόντιας μετακίνησης – διατμητικής τάσης.
- Διαγράμματα οριζόντιας μετακίνησης – κατακόρυφης μετακίνησης.

Πίνακας Β.1: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ1α («κυνότρεφρη μάργα» - φόρτιση 30 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375,00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0,001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	59,4	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2771,20
Ύψος H_0 (mm)	23,5	Όγκος V_0 (cm ³)	65,12
Μάζα m (g)	153,02	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	23,05

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	42,26
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	49,78
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	48,84
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	14,29

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	42,56
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	50,43
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	49,27
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	17,29

Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	30 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	34,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	123,41 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	1500 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,0032 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2771,167	0,000	123,819
02	0,001	-0,004	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
03	0,001	-0,004	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
04	0,001	-0,005	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
05	0,001	-0,005	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
06	0,001	-0,006	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
07	0,001	-0,007	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
08	0,001	-0,008	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
09	0,001	-0,008	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
10	0,001	-0,009	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
11	0,001	-0,010	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
12	0,001	-0,010	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
13	0,001	-0,011	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
14	0,001	-0,012	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
15	0,001	-0,012	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
16	0,001	-0,012	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
17	0,001	-0,013	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
18	0,001	-0,013	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
19	0,001	-0,013	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
20	0,001	-0,014	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
21	0,001	-0,014	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
22	0,001	-0,014	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
23	0,001	-0,014	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
24	0,001	-0,016	0,001	0,000	0,001	2771,167	0,244	123,819
25	0,017	-0,018	0,002	0,015	0,001	2770,276	0,488	123,859
26	0,039	-0,018	0,002	0,037	0,001	2768,970	0,488	123,918
27	0,070	-0,020	0,002	0,068	0,001	2767,128	0,489	124,000
28	0,096	-0,021	0,002	0,094	0,001	2765,584	0,489	124,069
29	0,128	-0,023	0,003	0,125	0,002	2763,742	0,734	124,152
30	0,156	-0,026	0,003	0,153	0,002	2762,079	0,734	124,227
31	0,185	-0,027	0,005	0,180	0,003	2760,475	1,224	124,299
32	0,222	-0,027	0,005	0,217	0,003	2758,278	1,225	124,398
33	0,260	-0,028	0,006	0,254	0,004	2756,080	1,472	124,497
34	0,292	-0,028	0,005	0,287	0,003	2754,120	1,227	124,586
35	0,329	-0,029	0,004	0,325	0,003	2751,863	0,983	124,688
36	0,370	-0,032	0,004	0,366	0,003	2749,427	0,983	124,798
37	0,404	-0,034	0,003	0,401	0,002	2747,348	0,738	124,893
38	0,440	-0,035	0,003	0,437	0,002	2745,210	0,739	124,990
39	0,479	-0,036	0,002	0,477	0,001	2742,834	0,493	125,098
40	0,520	-0,038	0,002	0,518	0,001	2740,399	0,493	125,210
41	0,552	-0,039	0,002	0,550	0,001	2738,498	0,494	125,297
42	0,588	-0,040	0,002	0,586	0,001	2736,360	0,494	125,394
43	0,628	-0,041	0,001	0,627	0,001	2733,924	0,247	125,506
44	0,663	-0,041	0,001	0,662	0,001	2731,845	0,247	125,602
45	0,699	-0,042	0,002	0,697	0,001	2729,767	0,495	125,697
46	0,735	-0,043	0,003	0,732	0,002	2727,688	0,743	125,793
47	0,776	-0,045	0,004	0,772	0,003	2725,312	0,992	125,903
48	0,808	-0,046	0,004	0,804	0,003	2723,411	0,993	125,991
49	0,842	-0,046	0,005	0,837	0,003	2721,451	1,242	126,081
50	0,875	-0,047	0,012	0,863	0,008	2719,907	2,982	126,153
51	0,902	-0,048	0,018	0,884	0,012	2718,660	4,476	126,211
52	0,931	-0,050	0,025	0,906	0,017	2717,353	6,219	126,272
53	0,965	-0,051	0,024	0,941	0,016	2715,274	5,975	126,368
54	0,991	-0,052	0,041	0,950	0,028	2714,740	10,209	126,393
55	1,016	-0,056	0,054	0,962	0,037	2714,027	13,450	126,426
56	1,045	-0,059	0,059	0,986	0,040	2712,602	14,703	126,493
57	1,078	-0,062	0,057	1,021	0,039	2710,523	14,216	126,590
58	1,105	-0,064	0,073	1,032	0,049	2709,870	18,210	126,620
59	1,132	-0,070	0,085	1,047	0,057	2708,979	21,211	126,662

60	1,159	-0,075	0,096	1,063	0,065	2708,029	23,964	126,706
61	1,189	-0,081	0,105	1,084	0,071	2706,781	26,223	126,765
62	1,219	-0,087	0,115	1,104	0,078	2705,594	28,733	126,820
63	1,248	-0,092	0,122	1,126	0,082	2704,287	30,497	126,882
64	1,280	-0,097	0,129	1,151	0,087	2702,802	32,264	126,951
65	1,312	-0,104	0,135	1,177	0,091	2701,258	33,784	127,024
66	1,344	-0,109	0,141	1,203	0,095	2699,714	35,306	127,097
67	1,375	-0,115	0,146	1,229	0,099	2698,170	36,579	127,169
68	1,407	-0,119	0,151	1,256	0,102	2696,567	37,854	127,245
69	1,440	-0,125	0,155	1,285	0,105	2694,844	38,882	127,326
70	1,472	-0,130	0,159	1,313	0,107	2693,182	39,910	127,405
71	1,504	-0,135	0,163	1,341	0,110	2691,519	40,939	127,484
72	1,536	-0,139	0,166	1,370	0,112	2689,797	41,719	127,565
73	1,569	-0,144	0,171	1,398	0,116	2688,134	43,002	127,644
74	1,600	-0,147	0,175	1,425	0,118	2686,531	44,034	127,720
75	1,632	-0,150	0,178	1,454	0,120	2684,808	44,818	127,802
76	1,664	-0,153	0,180	1,484	0,122	2683,027	45,352	127,887
77	1,697	-0,156	0,181	1,516	0,122	2681,127	45,636	127,978
78	1,730	-0,158	0,184	1,546	0,124	2679,345	46,423	128,063
79	1,765	-0,160	0,186	1,579	0,126	2677,386	46,962	128,156
80	1,800	-0,162	0,187	1,613	0,126	2675,367	47,250	128,253
81	1,834	-0,164	0,188	1,646	0,127	2673,408	47,538	128,347
82	1,869	-0,166	0,189	1,680	0,128	2671,389	47,827	128,444
83	1,905	-0,168	0,190	1,715	0,128	2669,311	48,117	128,544
84	1,940	-0,169	0,190	1,750	0,128	2667,233	48,155	128,644
85	1,975	-0,170	0,191	1,784	0,129	2665,214	48,445	128,742
86	2,010	-0,171	0,191	1,819	0,129	2663,136	48,483	128,842
87	2,046	-0,173	0,191	1,855	0,129	2660,998	48,522	128,946
88	2,081	-0,173	0,191	1,890	0,129	2658,920	48,560	129,046
89	2,117	-0,174	0,191	1,926	0,129	2656,783	48,599	129,150
90	2,152	-0,175	0,191	1,961	0,129	2654,705	48,637	129,251
91	2,189	-0,175	0,191	1,998	0,129	2652,509	48,677	129,358
92	2,225	-0,176	0,191	2,034	0,129	2650,371	48,716	129,463
93	2,261	-0,176	0,191	2,070	0,129	2648,234	48,756	129,567
94	2,296	-0,177	0,190	2,106	0,128	2646,097	48,539	129,672
95	2,331	-0,177	0,189	2,142	0,128	2643,960	48,323	129,777
96	2,365	-0,177	0,188	2,177	0,127	2641,883	48,105	129,879
97	2,398	-0,177	0,187	2,211	0,126	2639,864	47,886	129,978
98	2,432	-0,178	0,186	2,246	0,126	2637,787	47,667	130,080
99	2,466	-0,178	0,185	2,281	0,125	2635,709	47,448	130,183
100	2,500	-0,178	0,185	2,315	0,125	2633,691	47,485	130,283
101	2,535	-0,178	0,183	2,352	0,124	2631,495	47,011	130,391
102	2,571	-0,178	0,183	2,388	0,124	2629,358	47,049	130,497
103	2,605	-0,178	0,181	2,424	0,122	2627,222	46,572	130,604
104	2,639	-0,178	0,181	2,458	0,122	2625,204	46,608	130,704
105	2,674	-0,179	0,181	2,493	0,122	2623,127	46,645	130,807
106	2,711	-0,179	0,180	2,531	0,122	2620,872	46,427	130,920
107	2,744	-0,179	0,179	2,565	0,121	2618,854	46,205	131,021
108	2,780	-0,179	0,179	2,601	0,121	2616,717	46,243	131,128
109	2,816	-0,179	0,179	2,637	0,121	2614,581	46,280	131,235
110	2,853	-0,180	0,179	2,674	0,121	2612,386	46,319	131,345
111	2,889	-0,180	0,179	2,710	0,121	2610,249	46,357	131,453
112	2,926	-0,181	0,179	2,747	0,121	2608,054	46,396	131,563
113	2,963	-0,181	0,179	2,784	0,121	2605,858	46,435	131,674
114	3,000	-0,181	0,179	2,821	0,121	2603,663	46,475	131,785
115	3,036	-0,181	0,178	2,858	0,120	2601,468	46,254	131,896
116	3,073	-0,181	0,178	2,895	0,120	2599,273	46,293	132,008
117	3,109	-0,183	0,178	2,931	0,120	2597,137	46,331	132,116
118	3,146	-0,183	0,178	2,968	0,120	2594,942	46,370	132,228
119	3,184	-0,183	0,178	3,006	0,120	2592,687	46,411	132,343
120	3,221	-0,184	0,178	3,043	0,120	2590,492	46,450	132,455
121	3,258	-0,184	0,178	3,080	0,120	2588,297	46,489	132,568
122	3,294	-0,184	0,178	3,116	0,120	2586,162	46,528	132,677

123	3,329	-0,184	0,178	3,151	0,120	2584,086	46,565	132,784
124	3,365	-0,185	0,178	3,187	0,120	2581,951	46,604	132,893
125	3,401	-0,185	0,178	3,223	0,120	2579,815	46,642	133,003
126	3,435	-0,185	0,177	3,258	0,120	2577,739	46,417	133,111
127	3,471	-0,185	0,177	3,294	0,120	2575,604	46,456	133,221
128	3,508	-0,185	0,177	3,331	0,120	2573,410	46,496	133,335
129	3,545	-0,185	0,177	3,368	0,120	2571,216	46,535	133,448
130	3,581	-0,185	0,176	3,405	0,119	2569,021	46,312	133,562
131	3,619	-0,185	0,176	3,443	0,119	2566,768	46,352	133,680
132	3,655	-0,185	0,176	3,479	0,119	2564,633	46,391	133,791
133	3,691	-0,185	0,176	3,515	0,119	2562,498	46,430	133,902
134	3,729	-0,186	0,176	3,553	0,119	2560,245	46,471	134,020
135	3,766	-0,186	0,176	3,590	0,119	2558,051	46,510	134,135
136	3,766	-0,186	0,176	3,590	0,119	2558,051	46,510	134,135

Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	48,76	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	129,57	kPa

Πίνακας Β.2: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ1β («κυνότρεφρη μάργα» - φόρτιση 60 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375,00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0,001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	55,3	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2398,35
Ύψος H_0 (mm)	18,2	Όγκος V_0 (cm ³)	43,60
Μάζα m (g)	116,80	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	26,28

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	41,44
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	44,70
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	44,16
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	19,85

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	43,01
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	49,28
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	48,04
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	24,65

Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	60 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	64,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	265,27 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	1500 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,0032 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2398,345	0,000	265,777
02	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	2398,290	0,282	265,783
03	0,003	0,000	0,002	0,001	0,001	2398,290	0,564	265,783
04	0,036	0,000	0,003	0,033	0,002	2396,521	0,846	265,979
05	0,279	0,000	0,005	0,274	0,003	2383,204	1,418	267,465
06	0,573	0,000	0,005	0,568	0,003	2366,958	1,428	269,301
07	0,877	0,000	0,004	0,873	0,003	2350,105	1,151	271,232
08	1,660	0,000	0,025	1,635	0,017	2308,008	7,322	276,179
09	1,432	0,000	0,097	1,335	0,066	2324,580	28,208	274,211
10	1,697	0,000	0,166	1,531	0,112	2313,753	48,500	275,494
11	1,978	0,000	0,204	1,774	0,138	2300,331	59,950	277,101
12	2,263	0,000	0,225	2,038	0,152	2285,751	66,543	278,869
13	2,546	0,000	0,237	2,309	0,160	2270,787	70,554	280,706
14	2,831	0,000	0,247	2,584	0,167	2255,605	74,025	282,596
15	3,118	0,000	0,252	2,866	0,170	2240,041	76,049	284,559
16	3,410	0,000	0,256	3,154	0,173	2224,150	77,808	286,592
17	3,706	0,000	0,257	3,449	0,174	2207,877	78,687	288,705
18	3,999	0,000	0,259	3,740	0,175	2191,830	79,880	290,818
19	4,292	0,000	0,261	4,031	0,176	2175,790	81,091	292,962
20	4,588	0,000	0,263	4,325	0,178	2159,590	82,325	295,160
21	4,878	0,000	0,263	4,615	0,178	2143,617	82,938	297,359
22	5,165	0,000	0,263	4,902	0,178	2127,816	83,554	299,567
23	5,452	0,000	0,263	5,189	0,178	2112,023	84,179	301,808
24	5,743	0,000	0,263	5,480	0,178	2096,017	84,822	304,112
25	6,037	0,000	0,263	5,774	0,178	2079,855	85,481	306,475
26	6,335	0,000	0,263	6,072	0,178	2063,483	86,159	308,907
27	6,631	0,000	0,264	6,367	0,178	2047,285	87,171	311,351
28	6,936	-0,011	0,264	6,672	0,178	2030,548	87,890	313,917
29	7,243	-0,023	0,264	6,979	0,178	2013,713	88,624	316,542
30	7,547	-0,034	0,263	7,284	0,178	1997,000	89,028	319,191
31	7,848	-0,044	0,263	7,585	0,178	1980,518	89,768	321,847
32	8,142	-0,052	0,263	7,879	0,178	1964,431	90,504	324,483
33	8,441	-0,061	0,263	8,178	0,178	1948,084	91,263	327,206
34	8,738	-0,070	0,263	8,475	0,178	1931,859	92,029	329,954
35	9,028	-0,077	0,263	8,765	0,178	1916,030	92,790	332,680
36	9,313	-0,084	0,264	9,049	0,178	1900,541	93,902	335,391
37	9,603	-0,090	0,264	9,339	0,178	1884,739	94,689	338,203
38	9,894	-0,097	0,264	9,630	0,178	1868,897	95,492	341,070
39	10,188	-0,108	0,263	9,925	0,178	1852,853	95,954	344,023
40	10,487	-0,118	0,261	10,226	0,176	1836,498	96,072	347,087
41	10,785	-0,129	0,260	10,525	0,176	1820,269	96,557	350,181
42	11,092	-0,139	0,259	10,833	0,175	1803,570	97,076	353,424
43	11,397	-0,149	0,257	11,140	0,174	1786,944	97,223	356,712
44	11,704	-0,159	0,256	11,448	0,173	1770,283	97,756	360,069
45	12,004	-0,166	0,255	11,749	0,172	1754,020	98,277	363,408
46	12,299	-0,176	0,253	12,046	0,171	1737,993	98,405	366,759
47	12,599	-0,184	0,253	12,346	0,171	1721,824	99,330	370,203
48	12,896	-0,192	0,252	12,644	0,170	1705,783	99,867	373,684
49	13,184	-0,199	0,251	12,933	0,170	1690,246	100,385	377,119
50	13,467	-0,206	0,250	13,217	0,169	1674,998	100,896	380,552
51	13,759	-0,215	0,249	13,510	0,168	1659,288	101,444	384,155
52	13,801	-0,216	0,249	13,552	0,168	1657,037	101,581	384,677

Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	84,82	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	304,11	kPa

Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ1γ («κυανότεφρη μάργα» - φόρτιση 90 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375,00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0,001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	57,2	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2567,90
Ύψος H_0 (mm)	21,1	Όγκος V_0 (cm ³)	54,11
Μάζα m (g)	142,07	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	25,76

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	43,11
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	51,44
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	50,48
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	13,03

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	42,88
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	52,07
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	50,57
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	19,51

Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	90 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	94,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	362,32 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	1500 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,0032 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2567,900	0,000	362,835
02	0,029	-0,008	0,013	0,016	0,009	2566,986	3,423	362,964
03	0,067	-0,014	0,028	0,039	0,019	2565,670	7,377	363,150
04	0,103	-0,022	0,044	0,059	0,030	2564,527	11,598	363,312
05	0,140	-0,028	0,057	0,083	0,039	2563,155	15,033	363,507
06	0,176	-0,035	0,069	0,107	0,047	2561,782	18,208	363,702
07	0,210	-0,041	0,078	0,132	0,053	2560,353	20,594	363,905
08	0,248	-0,046	0,088	0,160	0,059	2558,752	23,249	364,132
09	0,283	-0,051	0,096	0,187	0,065	2557,208	25,378	364,352
10	0,319	-0,056	0,104	0,215	0,070	2555,607	27,510	364,580
11	0,354	-0,061	0,111	0,243	0,075	2554,006	29,380	364,809
12	0,391	-0,066	0,117	0,274	0,079	2552,233	30,989	365,062
13	0,427	-0,072	0,123	0,304	0,083	2550,518	32,600	365,308
14	0,463	-0,076	0,129	0,334	0,087	2548,802	34,214	365,554
15	0,498	-0,081	0,134	0,364	0,091	2547,087	35,564	365,800
16	0,537	-0,085	0,139	0,398	0,094	2545,143	36,919	366,079
17	0,573	-0,090	0,144	0,429	0,097	2543,370	38,274	366,335
18	0,609	-0,095	0,149	0,460	0,101	2541,598	39,630	366,590
19	0,644	-0,099	0,154	0,490	0,104	2539,883	40,988	366,838
20	0,681	-0,103	0,158	0,523	0,107	2537,996	42,084	367,110
21	0,717	-0,107	0,162	0,555	0,110	2536,166	43,180	367,375
22	0,752	-0,111	0,166	0,586	0,112	2534,394	44,277	367,632
23	0,789	-0,115	0,170	0,619	0,115	2532,507	45,378	367,906
24	0,826	-0,119	0,174	0,652	0,118	2530,620	46,480	368,180
25	0,862	-0,125	0,177	0,685	0,120	2528,733	47,317	368,455
26	0,897	-0,129	0,181	0,716	0,122	2526,961	48,420	368,713
27	0,934	-0,132	0,184	0,750	0,124	2525,017	49,261	368,997
28	0,970	-0,137	0,187	0,783	0,126	2523,130	50,101	369,273
29	1,006	-0,139	0,191	0,815	0,129	2521,300	51,210	369,541
30	1,041	-0,144	0,193	0,848	0,130	2519,414	51,785	369,818
31	1,079	-0,147	0,195	0,884	0,132	2517,355	52,364	370,120
32	1,114	-0,151	0,199	0,915	0,135	2515,583	53,476	370,381
33	1,149	-0,154	0,201	0,948	0,136	2513,696	54,054	370,659
34	1,184	-0,157	0,204	0,980	0,138	2511,867	54,901	370,929
35	1,220	-0,161	0,206	1,014	0,139	2509,923	55,482	371,216
36	1,255	-0,164	0,208	1,047	0,141	2508,036	56,063	371,496
37	1,290	-0,166	0,210	1,080	0,142	2506,150	56,645	371,775
38	1,326	-0,170	0,213	1,113	0,144	2504,263	57,497	372,055
39	1,362	-0,174	0,216	1,146	0,146	2502,377	58,351	372,336
40	1,397	-0,176	0,220	1,177	0,149	2500,604	59,474	372,600
41	1,431	-0,179	0,222	1,209	0,150	2498,775	60,058	372,872
42	1,468	-0,181	0,223	1,245	0,151	2496,717	60,378	373,180
43	1,503	-0,187	0,225	1,278	0,152	2494,830	60,966	373,462
44	1,538	-0,189	0,228	1,310	0,154	2493,001	61,824	373,736
45	1,573	-0,193	0,230	1,343	0,155	2491,115	62,414	374,019
46	1,610	-0,195	0,233	1,377	0,158	2489,171	63,277	374,311
47	1,646	-0,199	0,235	1,411	0,159	2487,228	63,870	374,604
48	1,682	-0,201	0,239	1,443	0,162	2485,398	65,005	374,879
49	1,716	-0,204	0,243	1,473	0,164	2483,684	66,139	375,138
50	1,752	-0,205	0,248	1,504	0,168	2481,912	67,548	375,406
51	1,787	-0,206	0,252	1,535	0,170	2480,140	68,686	375,674
52	1,823	-0,208	0,256	1,567	0,173	2478,311	69,828	375,951
53	1,859	-0,209	0,260	1,599	0,176	2476,482	70,972	376,229
54	1,896	-0,210	0,263	1,633	0,178	2474,538	71,847	376,525
55	1,932	-0,211	0,264	1,668	0,178	2472,538	72,178	376,829
56	1,968	-0,214	0,266	1,702	0,180	2470,594	72,782	377,126
57	2,005	-0,215	0,268	1,737	0,181	2468,594	73,389	377,431
58	2,041	-0,216	0,270	1,771	0,183	2466,651	73,995	377,729
59	2,076	-0,216	0,273	1,803	0,185	2464,822	74,873	378,009

60	2,112	-0,219	0,275	1,837	0,186	2462,879	75,481	378,307
61	2,148	-0,221	0,279	1,869	0,189	2461,050	76,636	378,588
62	2,184	-0,221	0,282	1,902	0,191	2459,164	77,519	378,878
63	2,220	-0,222	0,284	1,936	0,192	2457,221	78,131	379,178
64	2,256	-0,223	0,286	1,970	0,193	2455,278	78,743	379,478
65	2,292	-0,224	0,288	2,004	0,195	2453,335	79,356	379,779
66	2,328	-0,225	0,291	2,037	0,197	2451,449	80,245	380,071
67	2,364	-0,225	0,292	2,072	0,197	2449,449	80,586	380,381
68	2,401	-0,225	0,294	2,107	0,199	2447,449	81,205	380,692
69	2,436	-0,227	0,294	2,142	0,199	2445,450	81,271	381,003
70	2,473	-0,227	0,294	2,179	0,199	2443,335	81,341	381,333
71	2,507	-0,227	0,296	2,211	0,200	2441,507	81,956	381,619
72	2,543	-0,227	0,299	2,244	0,202	2439,621	82,851	381,913
73	2,578	-0,228	0,299	2,279	0,202	2437,622	82,919	382,227
74	2,613	-0,228	0,299	2,314	0,202	2435,622	82,987	382,541
75	2,650	-0,228	0,300	2,350	0,203	2433,565	83,335	382,864
76	2,684	-0,229	0,300	2,384	0,203	2431,623	83,401	383,170
77	2,720	-0,230	0,302	2,418	0,204	2429,680	84,024	383,476
78	2,755	-0,230	0,302	2,453	0,204	2427,681	84,093	383,792
79	2,792	-0,230	0,302	2,490	0,204	2425,567	84,167	384,126
80	2,826	-0,231	0,302	2,524	0,204	2423,625	84,234	384,434
81	2,862	-0,231	0,303	2,559	0,205	2421,626	84,583	384,752
82	2,898	-0,231	0,303	2,595	0,205	2419,569	84,655	385,079
83	2,933	-0,231	0,304	2,629	0,206	2417,627	85,002	385,388
84	2,969	-0,231	0,305	2,664	0,206	2415,628	85,353	385,707
85	3,003	-0,231	0,305	2,698	0,206	2413,686	85,421	386,017
86	3,041	-0,231	0,306	2,735	0,207	2411,573	85,776	386,355
87	3,076	-0,234	0,306	2,770	0,207	2409,574	85,848	386,676
88	3,112	-0,234	0,306	2,806	0,207	2407,518	85,921	387,006
89	3,147	-0,235	0,306	2,841	0,207	2405,519	85,992	387,328
90	3,185	-0,235	0,306	2,879	0,207	2403,349	86,070	387,678
91	3,221	-0,235	0,306	2,915	0,207	2401,293	86,144	388,009
92	3,258	-0,235	0,306	2,952	0,207	2399,180	86,219	388,351
93	3,293	-0,236	0,306	2,987	0,207	2397,182	86,291	388,675
94	3,329	-0,236	0,306	3,023	0,207	2395,126	86,365	389,009
95	3,365	-0,237	0,306	3,059	0,207	2393,070	86,440	389,343
96	3,400	-0,237	0,306	3,094	0,207	2391,072	86,512	389,668
97	3,436	-0,237	0,308	3,128	0,208	2389,131	87,148	389,985
98	3,473	-0,238	0,309	3,164	0,209	2387,075	87,506	390,320
99	3,510	-0,238	0,310	3,200	0,210	2385,020	87,865	390,657
100	3,546	-0,238	0,311	3,235	0,210	2383,022	88,222	390,984
101	3,582	-0,238	0,311	3,271	0,210	2380,967	88,299	391,322
102	3,619	-0,239	0,311	3,308	0,210	2378,855	88,377	391,669
103	3,654	-0,239	0,310	3,344	0,210	2376,800	88,169	392,008
104	3,691	-0,239	0,308	3,383	0,208	2374,573	87,682	392,375
105	3,726	-0,239	0,306	3,420	0,207	2372,462	87,190	392,725
106	3,763	-0,241	0,306	3,457	0,207	2370,350	87,268	393,075
107	3,798	-0,242	0,305	3,493	0,206	2368,295	87,058	393,416
108	3,836	-0,242	0,306	3,530	0,207	2366,183	87,422	393,767
109	3,872	-0,244	0,306	3,566	0,207	2364,129	87,498	394,109
110	3,910	-0,244	0,306	3,604	0,207	2361,960	87,578	394,471
111	3,948	-0,245	0,306	3,642	0,207	2359,792	87,659	394,833
112	3,986	-0,245	0,306	3,680	0,207	2357,623	87,739	395,196
113	4,025	-0,246	0,307	3,718	0,208	2355,455	88,107	395,560
114	4,060	-0,247	0,307	3,753	0,208	2353,458	88,182	395,896
115	4,099	-0,247	0,307	3,792	0,208	2351,233	88,265	396,271
116	4,136	-0,248	0,307	3,829	0,208	2349,122	88,344	396,627
117	4,174	-0,248	0,307	3,867	0,208	2346,954	88,426	396,993
118	4,210	-0,249	0,307	3,903	0,208	2344,900	88,504	397,341
119	4,249	-0,249	0,306	3,943	0,207	2342,619	88,301	397,728
120	4,286	-0,251	0,305	3,981	0,206	2340,451	88,094	398,096
121	4,323	-0,251	0,306	4,017	0,207	2338,397	88,461	398,446
122	4,360	-0,251	0,307	4,053	0,208	2336,344	88,828	398,796

123	4,398	-0,252	0,307	4,091	0,208	2334,177	88,910	399,166
124	4,436	-0,253	0,307	4,129	0,208	2332,010	88,993	399,537
125	4,473	-0,254	0,307	4,166	0,208	2329,899	89,073	399,899
126	4,512	-0,254	0,308	4,204	0,208	2327,732	89,447	400,271
127	4,550	-0,256	0,308	4,242	0,208	2325,566	89,530	400,644
128	4,588	-0,256	0,308	4,280	0,208	2323,399	89,614	401,018
129	4,626	-0,257	0,309	4,317	0,209	2321,289	89,986	401,382
130	4,664	-0,257	0,310	4,354	0,210	2319,180	90,360	401,747
131	4,702	-0,258	0,310	4,392	0,210	2317,013	90,444	402,123
132	4,739	-0,258	0,310	4,429	0,210	2314,904	90,526	402,489
133	4,777	-0,258	0,311	4,466	0,210	2312,794	90,901	402,857
134	4,814	-0,260	0,312	4,502	0,211	2310,742	91,275	403,214
135	4,853	-0,261	0,313	4,540	0,212	2308,576	91,653	403,593
136	4,891	-0,261	0,313	4,578	0,212	2306,410	91,739	403,972
137	4,930	-0,261	0,313	4,617	0,212	2304,188	91,828	404,361
138	4,967	-0,263	0,313	4,654	0,212	2302,079	91,912	404,732
139	4,997	-0,263	0,312	4,685	0,211	2300,312	91,688	405,043

Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	91,91	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	404,73	kPa

Πίνακας Β.4: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ2α («καστανοκίτρινη μάργα» - φόρτιση 30 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375,00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0,001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	59,2	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2754,40
Ύψος H_0 (mm)	23,3	Όγκος V_0 (cm ³)	64,07
Μάζα m (g)	143,25	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	21,93

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	40,25
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	51,91
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	49,91
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	20,70

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	41,89
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	52,31
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	50,35
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	23,17

Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	30 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	34,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	124,17 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	292 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,016 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2754,398	0,000	124,573
02	0,012	0,000	0,013	-0,001	0,009	2754,457	3,190	124,571
03	0,032	0,000	0,034	-0,002	0,023	2754,516	8,344	124,568
04	0,061	-0,002	0,052	0,009	0,035	2753,865	12,765	124,597
05	0,097	-0,005	0,065	0,032	0,044	2752,503	15,964	124,659
06	0,137	-0,008	0,075	0,062	0,051	2750,726	18,431	124,740
07	0,189	-0,012	0,080	0,109	0,054	2747,943	19,680	124,866
08	0,231	-0,017	0,090	0,141	0,061	2746,048	22,155	124,952
09	0,281	-0,022	0,099	0,182	0,067	2743,620	24,393	125,063
10	0,333	-0,027	0,107	0,226	0,072	2741,014	26,389	125,182
11	0,383	-0,032	0,114	0,269	0,077	2738,468	28,141	125,298
12	0,435	-0,037	0,119	0,316	0,080	2735,685	29,405	125,425
13	0,488	-0,042	0,125	0,363	0,085	2732,901	30,920	125,553
14	0,543	-0,047	0,131	0,412	0,089	2730,000	32,438	125,687
15	0,595	-0,051	0,135	0,460	0,091	2727,157	33,463	125,818
16	0,650	-0,054	0,141	0,509	0,095	2724,255	34,988	125,952
17	0,703	-0,057	0,144	0,559	0,097	2721,294	35,771	126,089
18	0,757	-0,062	0,147	0,610	0,099	2718,274	36,557	126,229
19	0,815	-0,066	0,150	0,665	0,101	2715,017	37,348	126,380
20	0,870	-0,070	0,153	0,717	0,103	2711,938	38,138	126,524
21	0,927	-0,074	0,157	0,770	0,106	2708,800	39,180	126,670
22	0,987	-0,078	0,159	0,828	0,107	2705,365	39,730	126,831
23	1,043	-0,081	0,162	0,881	0,110	2702,227	40,527	126,978
24	1,099	-0,085	0,164	0,935	0,111	2699,030	41,076	127,129
25	1,156	-0,088	0,166	0,990	0,112	2695,773	41,627	127,282
26	1,212	-0,090	0,169	1,043	0,114	2692,635	42,428	127,431
27	1,270	-0,094	0,173	1,097	0,117	2689,437	43,484	127,582
28	1,330	-0,097	0,175	1,155	0,118	2686,003	44,043	127,745
29	1,386	-0,100	0,178	1,208	0,120	2682,865	44,851	127,895
30	1,442	-0,103	0,181	1,261	0,122	2679,727	45,660	128,045
31	1,500	-0,105	0,183	1,317	0,124	2676,412	46,222	128,203
32	1,555	-0,109	0,184	1,371	0,124	2673,215	46,530	128,356
33	1,612	-0,112	0,186	1,426	0,126	2669,958	47,093	128,513
34	1,668	-0,115	0,188	1,480	0,127	2666,761	47,656	128,667
35	1,723	-0,117	0,190	1,533	0,128	2663,624	48,220	128,819
36	1,779	-0,119	0,192	1,587	0,130	2660,427	48,786	128,973
37	1,835	-0,122	0,194	1,641	0,131	2657,230	49,354	129,129
38	1,888	-0,124	0,195	1,693	0,132	2654,152	49,666	129,278
39	1,944	-0,126	0,198	1,746	0,134	2651,015	50,489	129,431
40	2,000	-0,129	0,199	1,801	0,135	2647,759	50,807	129,590
41	2,055	-0,131	0,201	1,854	0,136	2644,622	51,378	129,744
42	2,109	-0,133	0,203	1,906	0,137	2641,544	51,950	129,895
43	2,167	-0,135	0,205	1,962	0,139	2638,230	52,528	130,059
44	2,225	-0,137	0,206	2,019	0,139	2634,856	52,851	130,225
45	2,277	-0,140	0,208	2,069	0,141	2631,897	53,425	130,372
46	2,335	-0,142	0,210	2,125	0,142	2628,582	54,006	130,536
47	2,395	-0,144	0,211	2,184	0,143	2625,091	54,336	130,710
48	2,450	-0,146	0,213	2,237	0,144	2621,954	54,916	130,866
49	2,509	-0,148	0,214	2,295	0,145	2618,522	55,246	131,037
50	2,566	-0,150	0,216	2,350	0,146	2615,267	55,832	131,200
51	2,626	-0,152	0,218	2,408	0,147	2611,836	56,423	131,373
52	2,680	-0,154	0,219	2,461	0,148	2608,699	56,750	131,531
53	2,741	-0,155	0,220	2,521	0,149	2605,149	57,087	131,710
54	2,800	-0,157	0,221	2,579	0,149	2601,718	57,422	131,884
55	2,856	-0,158	0,223	2,633	0,151	2598,523	58,013	132,046
56	2,917	-0,160	0,223	2,694	0,151	2594,914	58,094	132,230
57	2,971	-0,161	0,225	2,746	0,152	2591,838	58,684	132,386
58	3,032	-0,163	0,226	2,806	0,153	2588,289	59,026	132,568
59	3,092	-0,164	0,226	2,866	0,153	2584,740	59,107	132,750

60	3,153	-0,165	0,228	2,925	0,154	2581,250	59,711	132,930
61	3,208	-0,166	0,228	2,980	0,154	2577,997	59,786	133,097
62	3,271	-0,168	0,230	3,041	0,155	2574,389	60,395	133,284
63	3,329	-0,170	0,231	3,098	0,156	2571,018	60,737	133,459
64	3,386	-0,171	0,231	3,155	0,156	2567,647	60,817	133,634
65	3,448	-0,173	0,233	3,215	0,158	2564,099	61,428	133,819
66	3,513	-0,174	0,234	3,279	0,158	2560,315	61,783	134,016
67	3,573	-0,176	0,235	3,338	0,159	2556,826	62,132	134,199
68	3,635	-0,177	0,236	3,399	0,160	2553,220	62,484	134,389
69	3,698	-0,179	0,237	3,461	0,160	2549,554	62,839	134,582
70	3,758	-0,180	0,237	3,521	0,160	2546,007	62,927	134,770
71	3,819	-0,181	0,238	3,581	0,161	2542,460	63,280	134,958
72	3,882	-0,183	0,239	3,643	0,162	2538,796	63,638	135,152
73	3,948	-0,184	0,241	3,707	0,163	2535,013	64,266	135,354
74	4,008	-0,185	0,242	3,766	0,164	2531,526	64,622	135,541
75	4,073	-0,186	0,243	3,830	0,164	2527,744	64,986	135,743
76	4,134	-0,187	0,243	3,891	0,164	2524,139	65,079	135,937
77	4,198	-0,187	0,245	3,953	0,166	2520,475	65,710	136,135
78	4,261	-0,188	0,247	4,014	0,167	2516,871	66,341	136,330
79	4,322	-0,188	0,248	4,074	0,168	2513,326	66,704	136,522
80	4,384	-0,187	0,248	4,136	0,168	2509,663	66,801	136,721
81	4,448	-0,187	0,249	4,199	0,168	2505,942	67,170	136,924
82	4,511	-0,187	0,252	4,259	0,170	2502,398	68,076	137,118
83	4,572	-0,186	0,253	4,319	0,171	2498,854	68,443	137,313
84	4,633	-0,185	0,254	4,379	0,172	2495,310	68,811	137,508
85	4,692	-0,184	0,253	4,439	0,171	2491,767	68,637	137,703
86	4,753	-0,183	0,254	4,499	0,172	2488,224	69,007	137,899
87	4,815	-0,181	0,254	4,561	0,172	2484,563	69,108	138,103
88	4,873	-0,181	0,254	4,619	0,172	2481,138	69,204	138,293
89	4,935	-0,181	0,255	4,680	0,172	2477,537	69,577	138,494
90	4,994	-0,180	0,257	4,737	0,174	2474,172	70,218	138,682
91	5,055	-0,179	0,257	4,798	0,174	2470,572	70,321	138,885
92	5,116	-0,178	0,258	4,858	0,174	2467,030	70,696	139,084
93	5,179	-0,177	0,261	4,918	0,176	2463,489	71,620	139,284
94	5,235	-0,176	0,263	4,972	0,178	2460,302	72,263	139,464
95	5,297	-0,174	0,263	5,034	0,178	2456,644	72,370	139,672
96	5,359	-0,173	0,258	5,101	0,174	2452,691	71,109	139,897
97	5,415	-0,173	0,259	5,156	0,175	2449,446	71,479	140,082
98	5,477	-0,172	0,260	5,217	0,176	2445,847	71,861	140,289
99	5,535	-0,170	0,261	5,274	0,176	2442,485	72,236	140,482
100	5,593	-0,169	0,261	5,332	0,176	2439,064	72,338	140,679
101	5,650	-0,168	0,262	5,388	0,177	2435,761	72,713	140,869
102	5,705	-0,166	0,263	5,442	0,178	2432,577	73,086	141,054
103	5,764	-0,164	0,263	5,501	0,178	2429,098	73,191	141,256
104	5,818	-0,162	0,264	5,554	0,178	2425,973	73,564	141,438
105	5,874	-0,160	0,264	5,610	0,178	2422,671	73,664	141,631
106	5,933	-0,157	0,267	5,666	0,180	2419,370	74,603	141,824
107	5,989	-0,156	0,267	5,722	0,180	2416,069	74,705	142,018
108	6,042	-0,153	0,268	5,774	0,181	2413,004	75,080	142,198
109	6,099	-0,152	0,268	5,831	0,181	2409,645	75,185	142,396
110	6,127	-0,150	0,269	5,858	0,182	2408,054	75,515	142,490

Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	75,52	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	142,49	kPa

Πίνακας Β.5: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ2β («καστανοκίτρινη μάργα» - φόρτιση 60 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375,00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0,001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	60,0	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2823,67
Ύψος H_0 (mm)	22,6	Όγκος V_0 (cm ³)	63,79
Μάζα m (g)	141,52	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	21,76

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	41,43
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	48,45
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	47,28
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	20,00

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	41,33
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	49,62
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	47,99
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	24,47

Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	60 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	64,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	225,31 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	292 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,016 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
02	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
03	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
04	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
05	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
06	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
07	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
08	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
09	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
10	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
11	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	2823,665	0,000	225,744
12	0,002	0,003	0,002	0,000	0,001	2823,665	0,479	225,744
13	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	2823,545	0,239	225,753
14	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002	2823,545	0,718	225,753
15	0,028	0,003	0,007	0,021	0,005	2822,406	1,677	225,844
16	0,067	0,003	0,007	0,060	0,005	2820,067	1,678	226,032
17	0,115	0,001	0,013	0,102	0,009	2817,549	3,119	226,234
18	0,157	-0,001	0,026	0,131	0,018	2815,810	6,242	226,373
19	0,208	-0,004	0,039	0,169	0,026	2813,532	9,370	226,557
20	0,249	-0,007	0,064	0,185	0,043	2812,572	15,382	226,634
21	0,289	-0,010	0,090	0,199	0,061	2811,733	21,638	226,702
22	0,330	-0,013	0,111	0,219	0,075	2810,534	26,698	226,798
23	0,375	-0,016	0,130	0,245	0,088	2808,975	31,285	226,924
24	0,421	-0,021	0,144	0,277	0,097	2807,056	34,678	227,079
25	0,472	-0,025	0,155	0,317	0,105	2804,658	37,359	227,274
26	0,528	-0,031	0,164	0,364	0,111	2801,839	39,568	227,502
27	0,582	-0,037	0,171	0,411	0,116	2799,021	41,299	227,731
28	0,633	-0,043	0,179	0,454	0,121	2796,443	43,271	227,941
29	0,687	-0,048	0,187	0,500	0,126	2793,685	45,249	228,166
30	0,742	-0,052	0,195	0,547	0,132	2790,867	47,233	228,397
31	0,796	-0,057	0,200	0,596	0,135	2787,929	48,495	228,637
32	0,847	-0,063	0,206	0,641	0,139	2785,231	49,998	228,859
33	0,902	-0,068	0,210	0,692	0,142	2782,173	51,025	229,110
34	0,956	-0,073	0,216	0,740	0,146	2779,295	52,537	229,347
35	1,016	-0,078	0,223	0,793	0,151	2776,118	54,302	229,610
36	1,068	-0,082	0,228	0,840	0,154	2773,300	55,576	229,843
37	1,123	-0,087	0,233	0,890	0,158	2770,302	56,856	230,092
38	1,181	-0,090	0,238	0,943	0,161	2767,125	58,143	230,356
39	1,235	-0,096	0,243	0,992	0,164	2764,187	59,427	230,601
40	1,294	-0,100	0,248	1,046	0,168	2760,950	60,721	230,871
41	1,349	-0,105	0,252	1,097	0,170	2757,892	61,769	231,127
42	1,405	-0,110	0,257	1,148	0,174	2754,835	63,064	231,384
43	1,459	-0,114	0,261	1,198	0,176	2751,837	64,116	231,636
44	1,519	-0,118	0,264	1,255	0,178	2748,420	64,933	231,924
45	1,575	-0,121	0,269	1,306	0,182	2745,363	66,237	232,182
46	1,634	-0,125	0,274	1,360	0,185	2742,126	67,548	232,456
47	1,692	-0,129	0,278	1,414	0,188	2738,889	68,615	232,731
48	1,749	-0,133	0,281	1,468	0,190	2735,652	69,437	233,006
49	1,810	-0,137	0,285	1,525	0,193	2732,236	70,514	233,298
50	1,866	-0,141	0,289	1,577	0,195	2729,119	71,585	233,564
51	1,927	-0,144	0,292	1,635	0,197	2725,642	72,420	233,862
52	1,987	-0,148	0,296	1,691	0,200	2722,286	73,503	234,150
53	2,044	-0,151	0,299	1,745	0,202	2719,049	74,336	234,429
54	2,102	-0,155	0,301	1,801	0,203	2715,693	74,926	234,719
55	2,164	-0,158	0,305	1,859	0,206	2712,217	76,019	235,020
56	2,219	-0,161	0,307	1,912	0,208	2709,041	76,607	235,295
57	2,277	-0,165	0,310	1,967	0,210	2705,745	77,450	235,582
58	2,337	-0,168	0,314	2,023	0,212	2702,389	78,547	235,874

59	2,392	-0,171	0,316	2,076	0,214	2699,213	79,140	236,152
60	2,450	-0,174	0,319	2,131	0,216	2695,917	79,989	236,441
61	2,510	-0,178	0,321	2,189	0,217	2692,441	80,595	236,746
62	2,568	-0,181	0,323	2,245	0,218	2689,086	81,198	237,041
63	2,628	-0,184	0,325	2,303	0,220	2685,611	81,806	237,348
64	2,688	-0,186	0,327	2,361	0,221	2682,136	82,416	237,656
65	2,744	-0,189	0,329	2,415	0,222	2678,900	83,021	237,943
66	2,802	-0,191	0,330	2,472	0,223	2675,486	83,379	238,246
67	2,855	-0,193	0,332	2,523	0,224	2672,430	83,980	238,519
68	2,911	-0,195	0,333	2,578	0,225	2669,135	84,337	238,813
69	2,967	-0,198	0,335	2,632	0,226	2665,901	84,947	239,103
70	3,020	-0,200	0,337	2,683	0,228	2662,846	85,552	239,377
71	3,076	-0,203	0,338	2,738	0,228	2659,551	85,912	239,674
72	3,130	-0,205	0,340	2,790	0,230	2656,437	86,522	239,955
73	3,182	-0,206	0,341	2,841	0,231	2653,382	86,876	240,231
74	3,238	-0,210	0,342	2,896	0,231	2650,088	87,239	240,530
75	3,293	-0,211	0,343	2,950	0,232	2646,854	87,601	240,823
76	3,349	-0,213	0,344	3,005	0,233	2643,560	87,966	241,123
77	3,401	-0,215	0,345	3,056	0,233	2640,506	88,324	241,402
78	3,457	-0,216	0,347	3,110	0,235	2637,273	88,945	241,698
79	3,515	-0,220	0,347	3,168	0,235	2633,800	89,062	242,017
80	3,566	-0,222	0,348	3,218	0,235	2630,806	89,421	242,292
81	3,625	-0,223	0,349	3,276	0,236	2627,334	89,796	242,613
82	3,683	-0,225	0,350	3,333	0,237	2623,921	90,170	242,928
83	3,738	-0,227	0,351	3,387	0,237	2620,688	90,540	243,228
84	3,795	-0,229	0,352	3,443	0,238	2617,336	90,914	243,539
85	3,853	-0,231	0,352	3,501	0,238	2613,864	91,035	243,863
86	3,909	-0,233	0,353	3,556	0,239	2610,572	91,408	244,170
87	3,968	-0,235	0,354	3,614	0,239	2607,101	91,789	244,496
88	4,028	-0,237	0,354	3,674	0,239	2603,510	91,916	244,833
89	4,092	-0,239	0,355	3,737	0,240	2599,739	92,309	245,188
90	4,151	-0,241	0,355	3,796	0,240	2596,209	92,435	245,521
91	4,211	-0,243	0,355	3,856	0,240	2592,618	92,563	245,861
92	4,274	-0,245	0,356	3,918	0,241	2588,909	92,957	246,214
93	4,337	-0,247	0,356	3,981	0,241	2585,139	93,092	246,573
94	4,395	-0,248	0,358	4,037	0,242	2581,789	93,737	246,892
95	4,458	-0,251	0,361	4,097	0,244	2578,200	94,654	247,236
96	4,518	-0,252	0,362	4,156	0,245	2574,671	95,046	247,575
97	4,581	-0,255	0,361	4,220	0,244	2570,843	94,925	247,944
98	4,644	-0,256	0,363	4,281	0,245	2567,194	95,586	248,296
99	4,707	-0,259	0,365	4,342	0,247	2563,546	96,249	248,649
100	4,770	-0,261	0,366	4,404	0,247	2559,839	96,653	249,010
101	4,837	-0,263	0,368	4,469	0,249	2555,952	97,329	249,388
102	4,900	-0,266	0,368	4,532	0,249	2552,185	97,473	249,756
103	4,965	-0,268	0,368	4,597	0,249	2548,299	97,621	250,137
104	5,030	-0,270	0,367	4,663	0,248	2544,353	97,507	250,525
105	5,094	-0,272	0,367	4,727	0,248	2540,528	97,654	250,902
106	5,160	-0,274	0,366	4,794	0,247	2536,523	97,541	251,298
107	5,225	-0,276	0,366	4,859	0,247	2532,638	97,691	251,684
108	5,291	-0,278	0,366	4,925	0,247	2528,694	97,843	252,077
109	5,351	-0,280	0,367	4,984	0,248	2525,169	98,248	252,428
110	5,416	-0,282	0,368	5,048	0,249	2521,345	98,665	252,811
111	5,479	-0,284	0,371	5,108	0,251	2517,760	99,611	253,171
112	5,545	-0,286	0,373	5,172	0,252	2513,937	100,300	253,556
113	5,607	-0,288	0,375	5,232	0,254	2510,353	100,982	253,918
114	5,673	-0,289	0,377	5,296	0,255	2506,530	101,675	254,306
115	5,738	-0,291	0,382	5,356	0,258	2502,947	103,171	254,670
116	5,796	-0,293	0,386	5,410	0,261	2499,722	104,386	254,998
117	5,858	-0,294	0,389	5,469	0,263	2496,199	105,346	255,358
118	5,926	-0,294	0,391	5,535	0,264	2492,258	106,055	255,762
119	5,984	-0,296	0,391	5,593	0,264	2488,795	106,202	256,118
120	6,046	-0,296	0,388	5,658	0,262	2484,915	105,552	256,518
121	6,109	-0,298	0,386	5,723	0,261	2481,035	105,172	256,919

122	6,166	-0,298	0,384	5,782	0,260	2477,514	104,776	257,284
123	6,229	-0,300	0,383	5,846	0,259	2473,695	104,664	257,681
124	6,287	-0,301	0,382	5,905	0,258	2470,174	104,540	258,048
125	6,347	-0,303	0,383	5,964	0,259	2466,654	104,963	258,417
126	6,408	-0,304	0,383	6,025	0,259	2463,015	105,118	258,798
127	6,472	-0,305	0,381	6,091	0,258	2459,077	104,737	259,213
128	6,530	-0,306	0,375	6,155	0,254	2455,260	103,248	259,616
129	6,590	-0,307	0,372	6,218	0,251	2451,503	102,579	260,014
130	6,654	-0,309	0,368	6,286	0,249	2447,448	101,644	260,445
131	6,710	-0,309	0,368	6,342	0,249	2444,109	101,783	260,800
132	6,771	-0,311	0,353	6,418	0,239	2439,578	97,815	261,285
133	6,829	-0,314	0,351	6,478	0,237	2436,001	97,404	261,668
134	6,883	-0,315	0,351	6,532	0,237	2432,782	97,533	262,015
135	6,943	-0,316	0,352	6,591	0,238	2429,266	97,952	262,394
136	7,000	-0,318	0,352	6,648	0,238	2425,869	98,089	262,761
137	7,059	-0,319	0,352	6,707	0,238	2422,353	98,232	263,143
138	7,117	-0,320	0,353	6,764	0,239	2418,957	98,649	263,512
139	7,145	-0,320	0,353	6,792	0,239	2417,289	98,717	263,694

Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	104,96	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	258,42	kPa

Πίνακας Β.6: Αποτελέσματα δοκιμής διάτμησης δοκιμίου Δ2γ («καστανοκίτρινη μάργα» - φόρτιση 90 kg).

ΣΥΣΚΕΥΕΣ		
Συσκευή διάτμησης	Εταιρία	Wykem Farrance
	Βάρος ζυγού φόρτισης (g)	4500
	Βάρος πλάκας φόρτισης (g)	375.00
Δυναμομετρικός δακτύλιος	Συντ. μετατροπής (N/div)	0,676
	Αντιστ. ενδείξεων (mm/div)	0.001
Κυψέλη	Σχήμα διατομής	ΚΥΚΛΙΚΗ
	Ονομαστική διάμετρος (mm)	63,3

ΕΛΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	
Τύπος και περιγραφή	Αδιατάρακτο δείγμα μετά από κορεσμό 24 ωρών
Προετοιμασία δείγματος	Διαμόρφωση με μήτρα

ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ			
Διάμετρος/πλάτος D (mm)	59,7	Εμβαδόν A_0 (mm ²)	2802,04
Ύψος H_0 (mm)	23,9	Όγκος V_0 (cm ³)	67,02
Μάζα m (g)	151,33	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	22,15

ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΡΙΝ	
Μάζα υποδοχέα (g)	40,42
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	51,92
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	49,95
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	20,67

ΥΓΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑ	
Μάζα υποδοχέα (g)	40,39
Μάζα υποδ. + δείγματος (g)	52,22
Μάζα υποδ. + ξηρ. δείγμ. (g)	49,95
Περιεχόμενη υγρασία w (%):	23,74

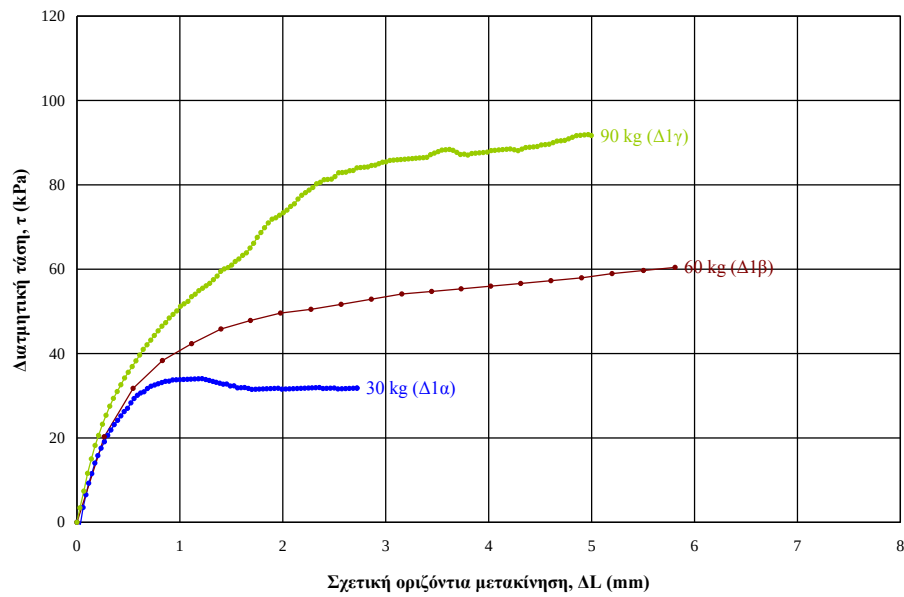
Επιβαλλόμενο φορτίο στο ζυγό φόρτισης:	90 kg
Συνολικά επιβαλλόμενο φορτίο:	94,88 kg
Συνολικά επιβαλλόμενη αρχική τάση:	332,05 kPa
Μέγιστη διάρκεια διάτμησης:	292 min
Ρυθμός διάτμησης:	0,016 mm/min

A/A	Οριζ. μετακίνηση L (mm)	Σχετ. κατ. μετακίνηση ΔH (mm)	Ένδ. δυν. δακτυλίου (mm)	Σχετ. οριζ. μετακίνηση ΔL (mm)	Διατμητική δύναμη F (kN)	Επιφάνεια επαφής A (mm ²)	Διατμητική τάση τ (kPa)	Ορθή τάση σ (kPa)
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2802,044	0,000	332,516
02	0,004	0,002	0,003	0,001	0,002	2801,984	0,724	332,523
03	0,041	0,000	0,022	0,019	0,015	2800,909	5,310	332,651
04	0,092	-0,001	0,040	0,052	0,027	2798,938	9,661	332,885
05	0,140	-0,007	0,061	0,079	0,041	2797,325	14,741	333,077
06	0,187	-0,011	0,097	0,090	0,066	2796,668	23,446	333,155
07	0,231	-0,018	0,128	0,103	0,087	2795,892	30,948	333,248
08	0,282	-0,026	0,153	0,129	0,103	2794,339	37,013	333,433
09	0,328	-0,034	0,177	0,151	0,120	2793,025	42,840	333,590
10	0,381	-0,040	0,195	0,186	0,132	2790,934	47,232	333,840
11	0,436	-0,048	0,208	0,228	0,141	2788,425	50,426	334,140
12	0,486	-0,054	0,219	0,267	0,148	2786,096	53,137	334,419
13	0,541	-0,059	0,231	0,310	0,156	2783,528	56,100	334,728
14	0,594	-0,066	0,239	0,355	0,162	2780,840	58,099	335,051
15	0,650	-0,072	0,249	0,401	0,168	2778,092	60,590	335,383
16	0,705	-0,078	0,258	0,447	0,174	2775,345	62,842	335,715
17	0,757	-0,083	0,264	0,493	0,178	2772,597	64,367	336,048
18	0,809	-0,089	0,271	0,538	0,183	2769,909	66,138	336,374
19	0,864	-0,094	0,277	0,587	0,187	2766,983	67,674	336,729
20	0,918	-0,097	0,284	0,634	0,192	2764,176	69,454	337,071
21	0,974	-0,103	0,289	0,685	0,195	2761,130	70,755	337,443
22	1,030	-0,109	0,297	0,733	0,201	2758,263	72,789	337,794
23	1,083	-0,113	0,301	0,782	0,203	2755,336	73,848	338,153
24	1,140	-0,118	0,306	0,834	0,207	2752,231	75,159	338,534
25	1,197	-0,122	0,311	0,886	0,210	2749,125	76,474	338,917
26	1,251	-0,127	0,315	0,936	0,213	2746,139	77,542	339,285
27	1,310	-0,132	0,320	0,990	0,216	2742,914	78,865	339,684
28	1,364	-0,136	0,324	1,040	0,219	2739,928	79,938	340,054
29	1,422	-0,141	0,328	1,094	0,222	2736,703	81,020	340,455
30	1,480	-0,144	0,332	1,148	0,224	2733,478	82,105	340,857
31	1,538	-0,150	0,336	1,202	0,227	2730,253	83,192	341,259
32	1,597	-0,154	0,340	1,257	0,230	2726,969	84,284	341,670
33	1,650	-0,158	0,343	1,307	0,232	2723,983	85,121	342,045
34	1,709	-0,162	0,346	1,363	0,234	2720,639	85,971	342,465
35	1,768	-0,166	0,349	1,419	0,236	2717,295	86,823	342,887
36	1,824	-0,170	0,353	1,471	0,239	2714,190	87,919	343,279
37	1,883	-0,174	0,355	1,528	0,240	2710,786	88,528	343,710
38	1,943	-0,178	0,358	1,585	0,242	2707,383	89,388	344,142
39	1,999	-0,181	0,361	1,638	0,244	2704,218	90,243	344,545
40	2,057	-0,186	0,363	1,694	0,245	2700,875	90,855	344,971
41	2,117	-0,190	0,366	1,751	0,247	2697,471	91,721	345,407
42	2,174	-0,194	0,368	1,806	0,249	2694,188	92,335	345,828
43	2,230	-0,198	0,371	1,859	0,251	2691,024	93,197	346,234
44	2,286	-0,202	0,373	1,913	0,252	2687,800	93,812	346,649
45	2,348	-0,206	0,376	1,972	0,254	2684,278	94,691	347,104
46	2,402	-0,210	0,378	2,024	0,256	2681,173	95,305	347,506
47	2,461	-0,213	0,380	2,081	0,257	2677,771	95,931	347,948
48	2,522	-0,216	0,383	2,139	0,259	2674,309	96,813	348,398
49	2,585	-0,221	0,385	2,200	0,260	2670,667	97,451	348,873
50	2,643	-0,225	0,387	2,256	0,262	2667,325	98,080	349,310
51	2,706	-0,229	0,389	2,317	0,263	2663,684	98,722	349,788
52	2,764	-0,233	0,391	2,373	0,264	2660,342	99,354	350,227
53	2,828	-0,237	0,393	2,435	0,266	2656,641	100,001	350,715
54	2,890	-0,239	0,394	2,496	0,266	2653,001	100,393	351,196
55	2,949	-0,244	0,395	2,554	0,267	2649,540	100,780	351,655
56	3,009	-0,247	0,397	2,612	0,268	2646,079	101,423	352,115
57	3,073	-0,251	0,399	2,674	0,270	2642,379	102,076	352,608
58	3,132	-0,254	0,400	2,732	0,270	2638,918	102,466	353,071

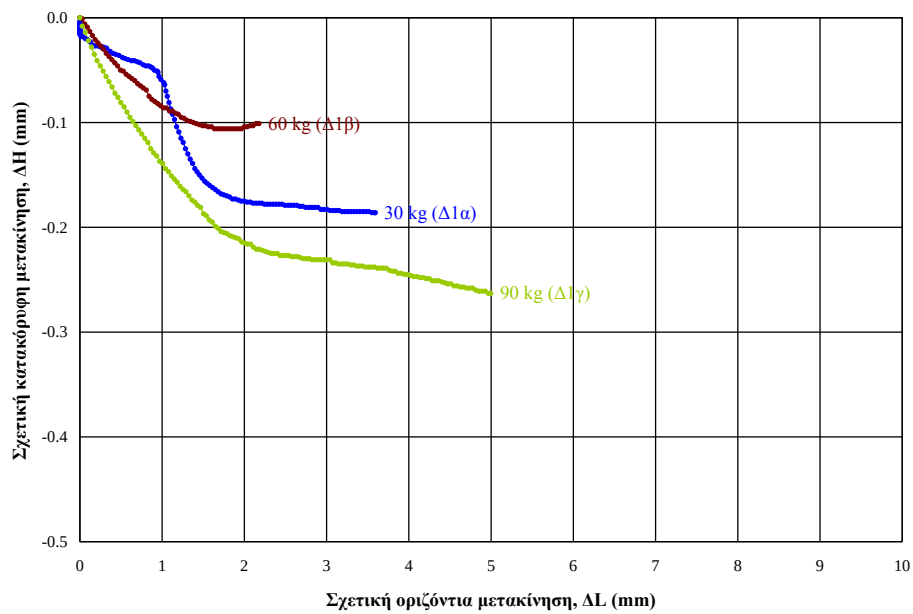
59	3,194	-0,258	0,401	2,793	0,271	2635,279	102,864	353,558
60	3,250	-0,261	0,403	2,847	0,272	2632,057	103,504	353,991
61	3,311	-0,264	0,404	2,907	0,273	2628,477	103,902	354,473
62	3,369	-0,267	0,405	2,964	0,274	2625,077	104,294	354,932
63	3,431	-0,271	0,407	3,024	0,275	2621,497	104,952	355,417
64	3,489	-0,274	0,409	3,080	0,276	2618,157	105,603	355,870
65	3,549	-0,277	0,410	3,139	0,277	2614,638	106,003	356,349
66	3,611	-0,280	0,412	3,199	0,279	2611,059	106,666	356,838
67	3,670	-0,283	0,413	3,257	0,279	2607,600	107,067	357,311
68	3,728	-0,286	0,413	3,315	0,279	2604,140	107,209	357,786
69	3,788	-0,289	0,415	3,373	0,281	2600,682	107,872	358,262
70	3,850	-0,293	0,416	3,434	0,281	2597,044	108,283	358,763
71	3,905	-0,294	0,417	3,488	0,282	2593,824	108,678	359,209
72	3,968	-0,298	0,418	3,550	0,283	2590,127	109,094	359,721
73	4,028	-0,301	0,419	3,609	0,283	2586,609	109,504	360,211
74	4,088	-0,304	0,420	3,668	0,284	2583,092	109,915	360,701
75	4,150	-0,307	0,421	3,729	0,285	2579,455	110,332	361,210
76	4,210	-0,309	0,423	3,787	0,286	2575,998	111,005	361,695
77	4,264	-0,311	0,423	3,841	0,286	2572,779	111,144	362,147
78	4,323	-0,313	0,423	3,900	0,286	2569,262	111,296	362,643
79	4,384	-0,317	0,426	3,958	0,288	2565,806	112,236	363,131
80	4,438	-0,319	0,430	4,008	0,291	2562,826	113,422	363,554
81	4,496	-0,320	0,433	4,063	0,293	2559,548	114,359	364,019
82	4,556	-0,322	0,433	4,123	0,293	2555,973	114,519	364,528
83	4,610	-0,324	0,436	4,174	0,295	2552,934	115,450	364,962
84	4,670	-0,325	0,437	4,233	0,295	2549,418	115,874	365,465
85	4,729	-0,327	0,439	4,290	0,297	2546,023	116,560	365,953
86	4,783	-0,329	0,440	4,343	0,297	2542,865	116,970	366,407
87	4,842	-0,331	0,440	4,402	0,297	2539,350	117,132	366,914
88	4,901	-0,333	0,436	4,465	0,295	2535,598	116,239	367,457
89	4,960	-0,336	0,436	4,524	0,295	2532,084	116,401	367,967
90	5,017	-0,338	0,436	4,581	0,295	2528,689	116,557	368,461
91	5,076	-0,342	0,437	4,639	0,295	2525,235	116,984	368,965
92	5,136	-0,344	0,439	4,697	0,297	2521,781	117,680	369,471
93	5,195	-0,346	0,441	4,754	0,298	2518,387	118,376	369,969
94	5,255	-0,348	0,443	4,812	0,299	2514,934	119,076	370,477
95	5,315	-0,350	0,445	4,870	0,301	2511,481	119,778	370,986
96	5,378	-0,353	0,448	4,930	0,303	2507,910	120,757	371,514
97	5,435	-0,356	0,449	4,986	0,304	2504,576	121,188	372,009
98	5,496	-0,358	0,451	5,045	0,305	2501,065	121,898	372,531
99	5,558	-0,360	0,452	5,106	0,306	2497,434	122,346	373,073
100	5,616	-0,363	0,452	5,164	0,306	2493,983	122,516	373,589
101	5,678	-0,367	0,451	5,227	0,305	2490,234	122,429	374,151
102	5,740	-0,371	0,445	5,295	0,301	2486,188	120,996	374,760
103	5,801	-0,374	0,446	5,355	0,301	2482,619	121,443	375,299
104	5,862	-0,377	0,445	5,417	0,301	2478,930	121,351	375,857
105	5,926	-0,380	0,445	5,481	0,301	2475,124	121,537	376,435
106	5,986	-0,382	0,446	5,540	0,301	2471,615	121,983	376,970
107	6,048	-0,385	0,446	5,602	0,301	2467,927	122,166	377,533
108	6,105	-0,388	0,446	5,659	0,301	2464,538	122,334	378,052
109	6,171	-0,391	0,448	5,723	0,303	2460,733	123,072	378,637
110	6,237	-0,394	0,449	5,788	0,304	2456,868	123,541	379,233
111	6,302	-0,398	0,449	5,853	0,304	2453,004	123,736	379,830
112	6,363	-0,401	0,450	5,913	0,304	2449,438	124,192	380,383
113	6,429	-0,404	0,450	5,979	0,304	2445,515	124,391	380,993
114	6,495	-0,407	0,451	6,044	0,305	2441,653	124,865	381,596
115	6,556	-0,410	0,451	6,105	0,305	2438,028	125,050	382,163
116	6,623	-0,413	0,451	6,172	0,305	2434,047	125,255	382,788
117	6,686	-0,416	0,452	6,234	0,306	2430,364	125,723	383,368
118	6,750	-0,418	0,452	6,298	0,306	2426,562	125,920	383,969
119	6,814	-0,421	0,452	6,362	0,306	2422,761	126,117	384,571
120	6,878	-0,423	0,453	6,425	0,306	2419,020	126,592	385,166
121	6,939	-0,426	0,454	6,485	0,307	2415,457	127,058	385,734

122	7,006	-0,429	0,455	6,551	0,308	2411,538	127,545	386,361
123	7,070	-0,431	0,456	6,614	0,308	2407,798	128,024	386,961
124	7,131	-0,433	0,456	6,675	0,308	2404,177	128,217	387,544
125	7,196	-0,436	0,456	6,740	0,308	2400,320	128,423	388,167
126	7,261	-0,438	0,458	6,803	0,310	2396,581	129,187	388,772
127	7,322	-0,440	0,458	6,864	0,310	2392,961	129,383	389,360
128	7,387	-0,442	0,459	6,928	0,310	2389,164	129,871	389,979
129	7,452	-0,444	0,459	6,993	0,310	2385,308	130,081	390,610
130	7,508	-0,446	0,460	7,048	0,311	2382,046	130,543	391,145
131	7,572	-0,448	0,461	7,111	0,312	2378,309	131,033	391,759
132	7,633	-0,451	0,461	7,172	0,312	2374,692	131,232	392,356
133	7,692	-0,453	0,462	7,230	0,312	2371,253	131,708	392,925
134	7,754	-0,455	0,462	7,292	0,312	2367,577	131,912	393,535
135	7,813	-0,456	0,463	7,350	0,313	2364,139	132,390	394,107
136	7,875	-0,459	0,463	7,412	0,313	2360,464	132,596	394,721
137	7,936	-0,462	0,463	7,473	0,313	2356,849	132,799	395,326
138	7,998	-0,463	0,463	7,535	0,313	2353,175	133,007	395,944
139	8,059	-0,467	0,463	7,596	0,313	2349,561	133,211	396,553
140	8,122	-0,470	0,463	7,659	0,313	2345,828	133,423	397,184
141	8,123	-0,470	0,463	7,660	0,313	2345,769	133,427	397,194

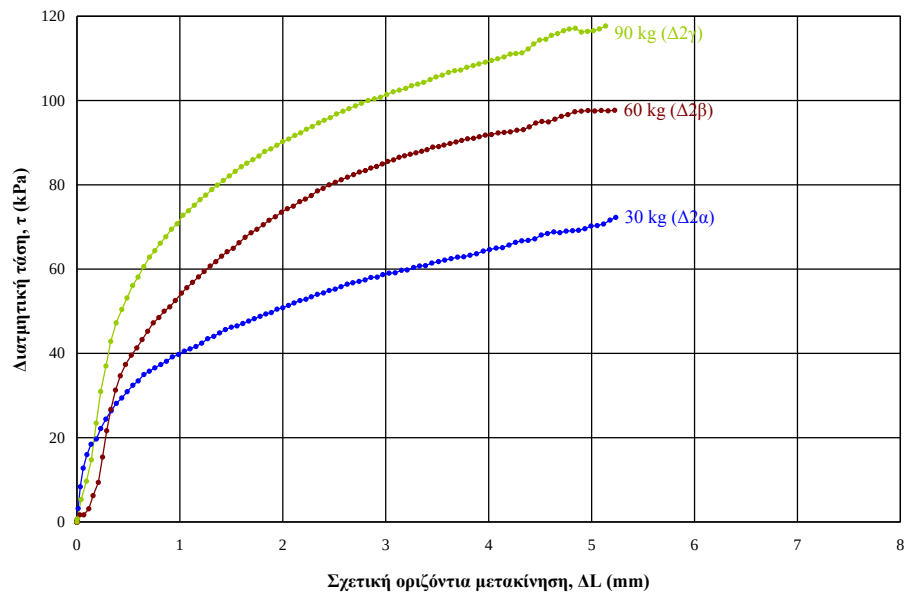
Μέγιστη διατμητική τάση (στο 10% παραμόρφωσης) =	124,19	kPa
Ορθή τάση στην μέγιστη διατμητική τάση =	380,38	kPa



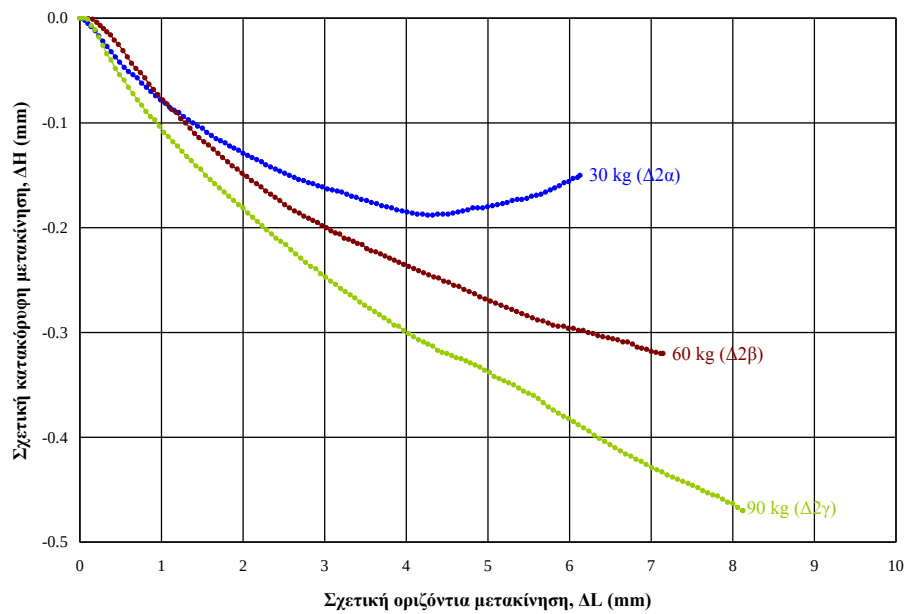
Σχήμα Β.1: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης – διατμητικής τάσης «κυανότεφρης μάργας».



Σχήμα Β.2: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης – κατακόρυφης μετακίνησης «κυανότεφρης μάργας».



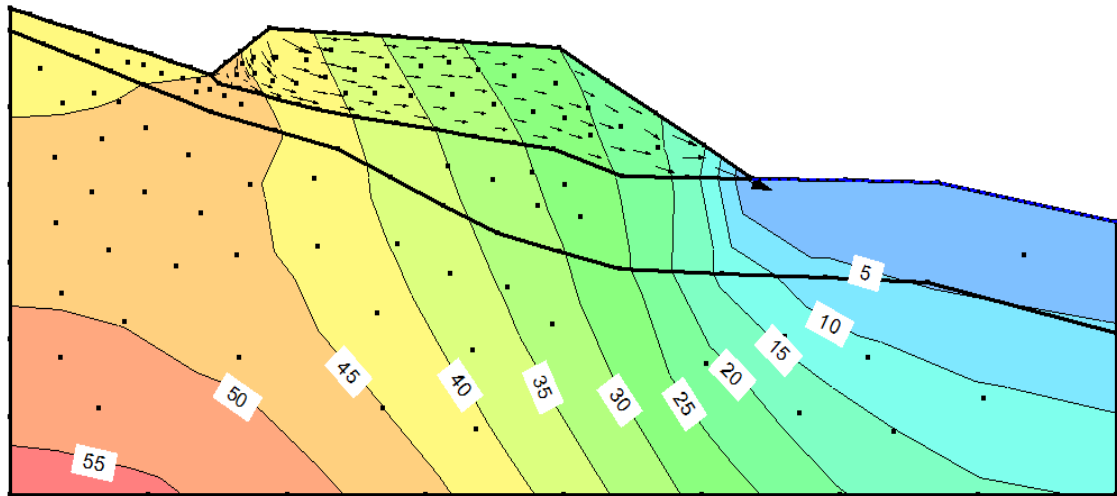
Σχήμα B.3: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης – διατμητικής τάσης «καστανοκίτρινης μάργας».



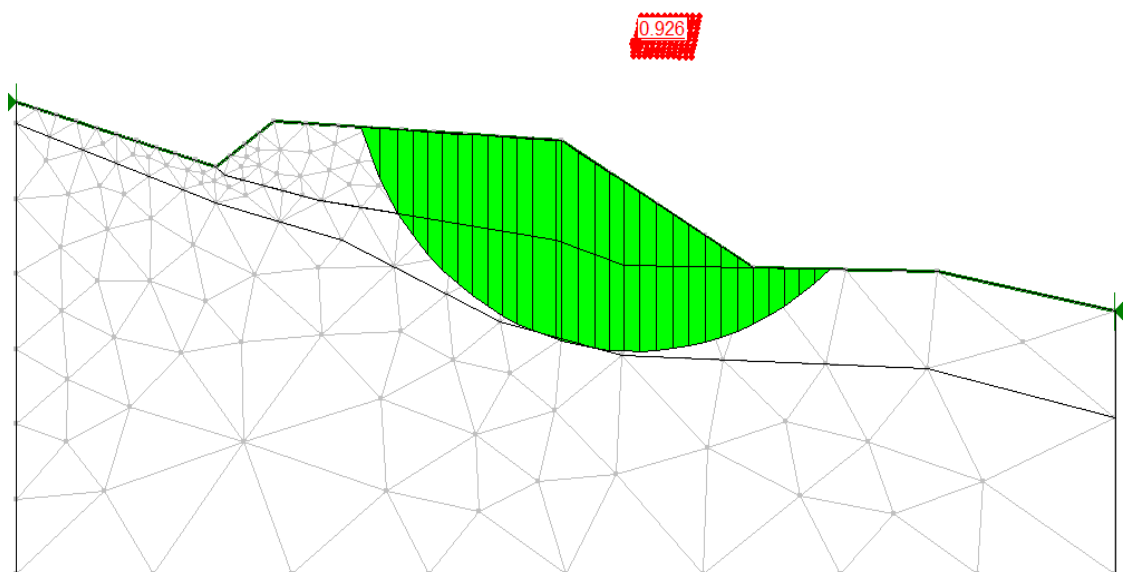
Σχήμα B.4: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης – κατακόρυφης μετακίνησης «καστανοκίτρινης μάργας».

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης

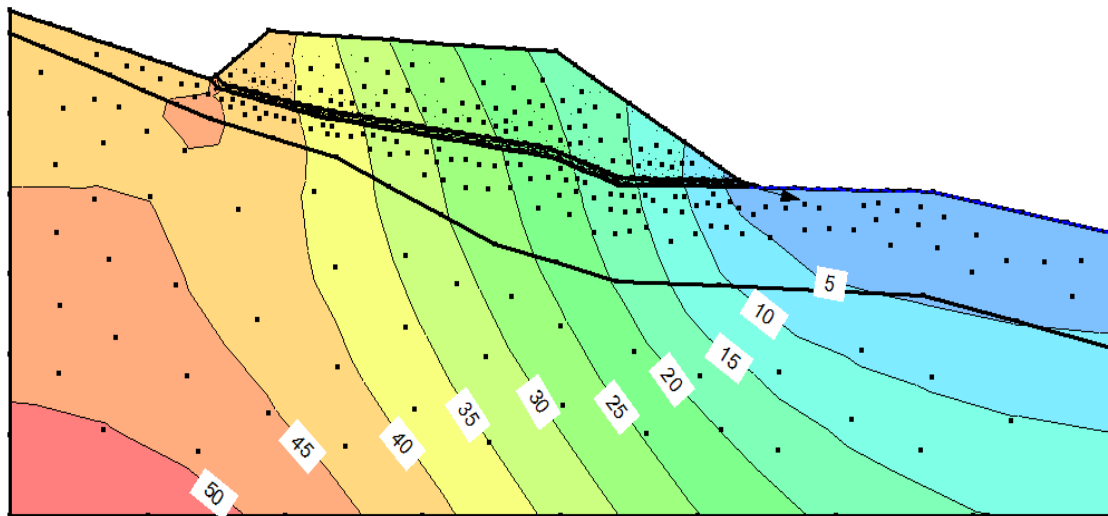
- Αποτελέσματα επίλυσης μοντέλων παραμετρικής ανάλυσης. Γραφήματα ευστάθειας πρανών.



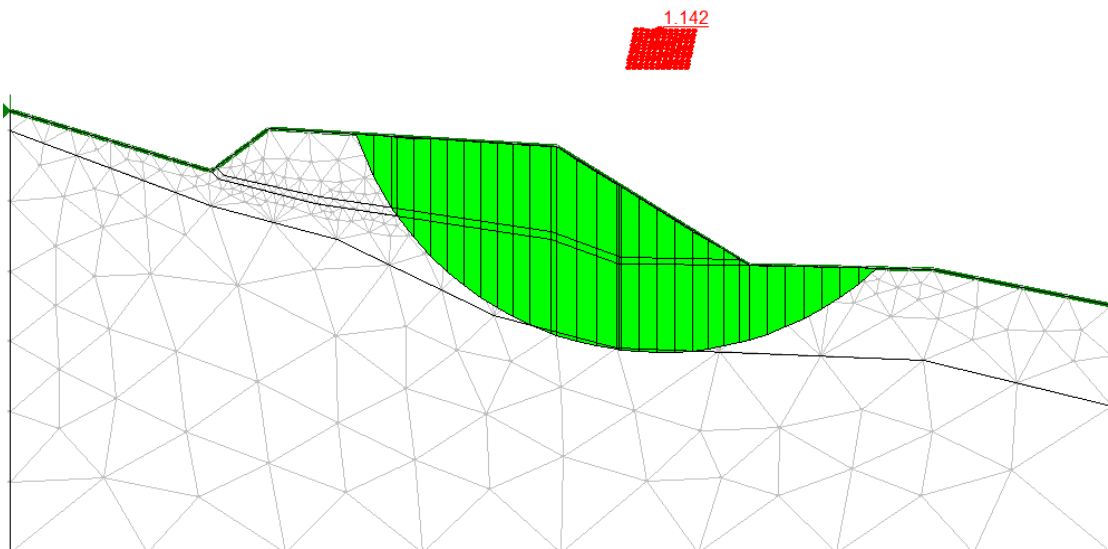
Σχήμα Γ.1: Μοντέλο βάσης σεναρίου Α: Γράφημα ανάλυσης πίεσης πόρων.



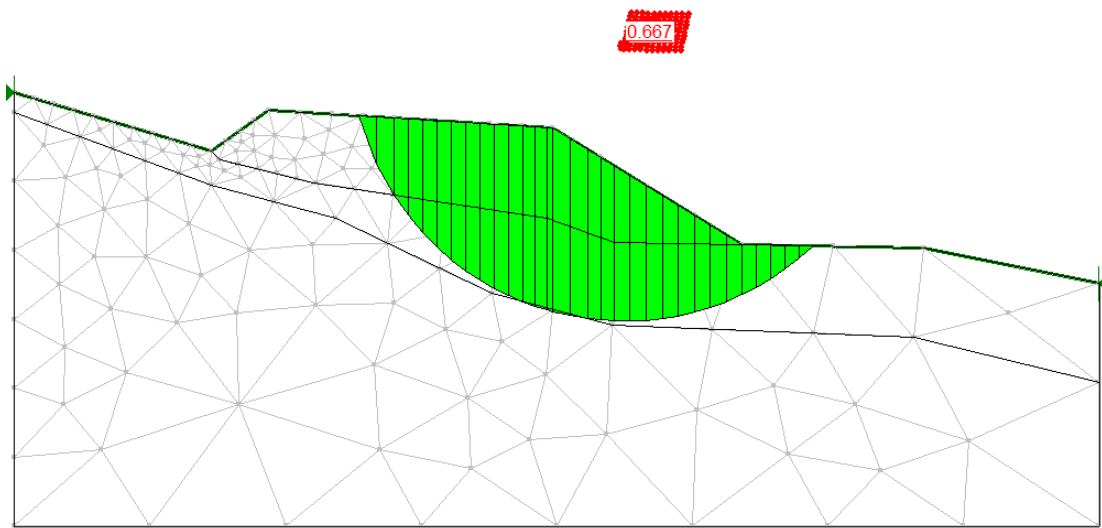
Σχήμα Γ.2: Μοντέλο βάσης σεναρίου Α: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς.



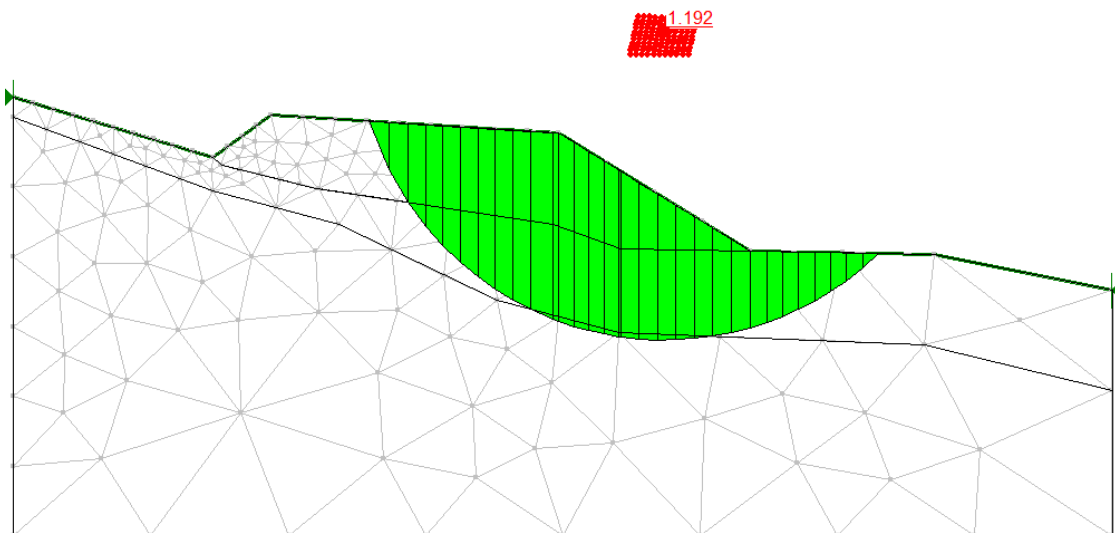
Σχήμα Γ.3: Μοντέλο H2 σεναρίου A: Γράφημα ανάλυσης πίεσης πόρων με στραγγιστήριο.



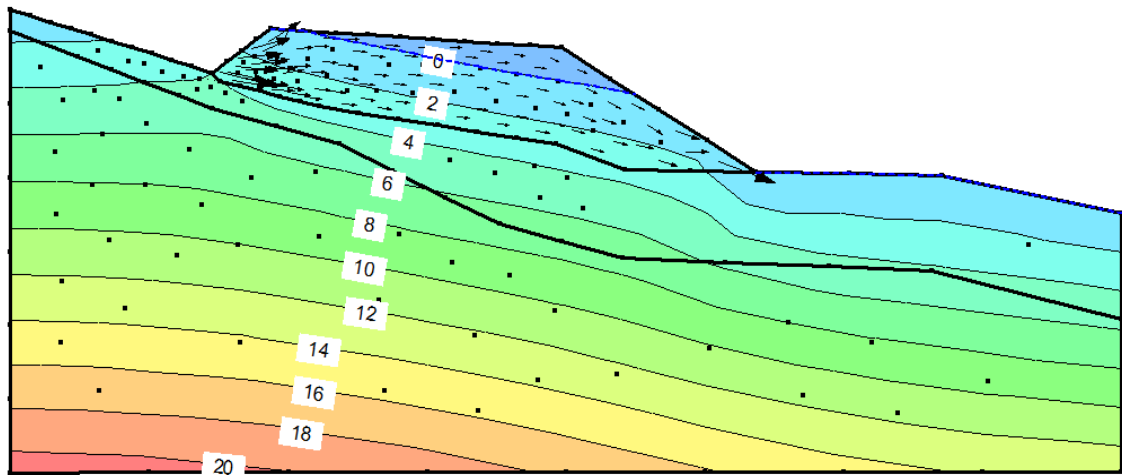
Σχήμα Γ.4: Μοντέλο H2 σεναρίου A: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς με στραγγιστήριο.



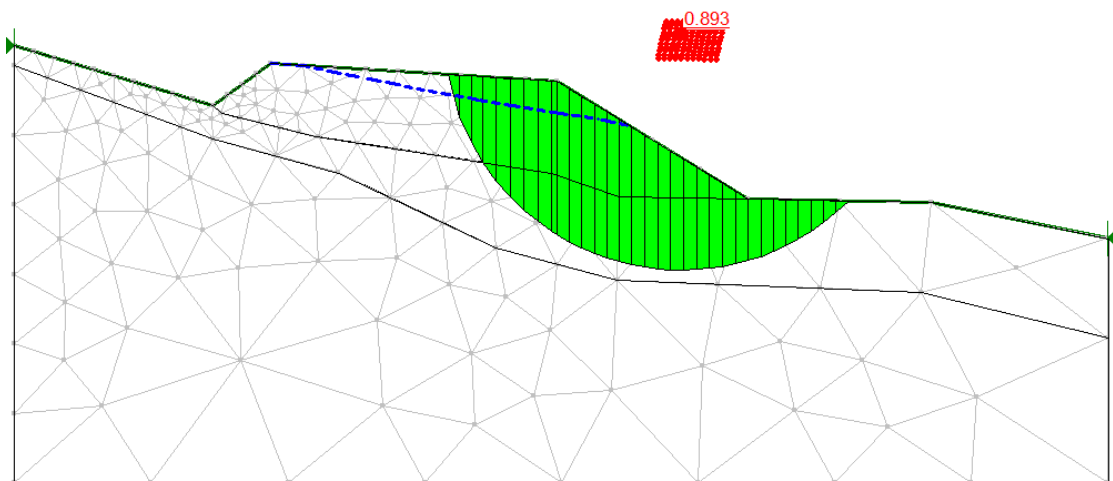
Σχήμα Γ.5: Μοντέλο D1: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς (Σενάριο Α).



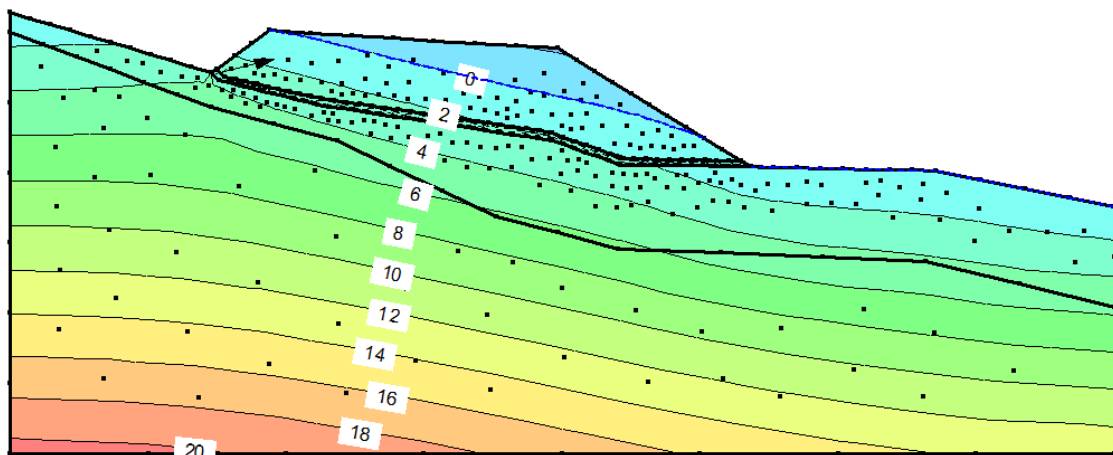
Σχήμα Γ.6: Μοντέλο D2: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς (Σενάριο Α).



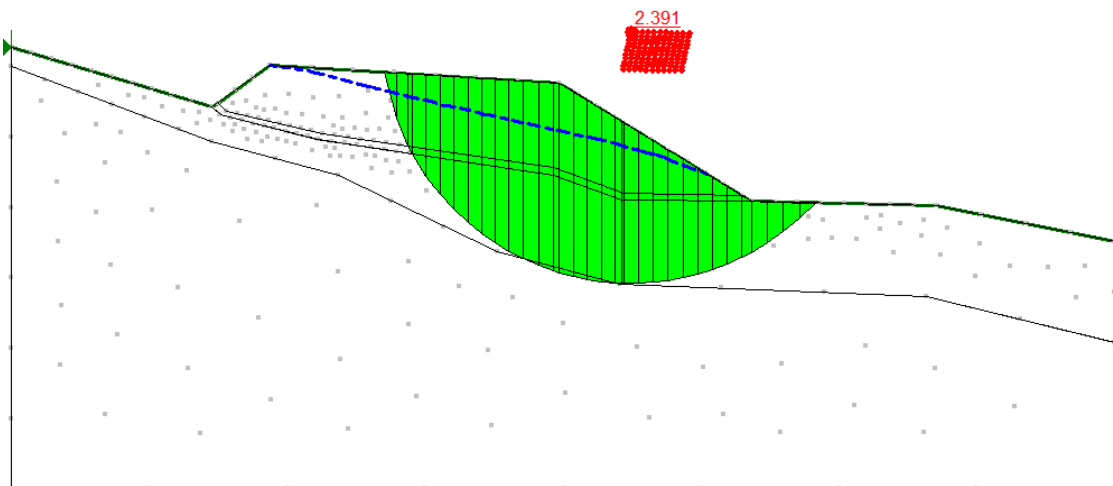
Σχήμα Γ.7: Μοντέλο βάσης σεναρίου Β: Γράφημα ανάλυσης πίεσης των πόρων.



Σχήμα Γ.8: Μοντέλο βάσης σεναρίου Β: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς.



Σχήμα Γ.10: Μοντέλο βάσης σεναρίου Β: Γράφημα ανάλυσης πίεσης των πόρων με στραγγιστήριο.



Σχήμα Γ.9: Μοντέλο βάσης σεναρίου Β: Γράφημα ανάλυσης ευστάθειας πρανούς με στραγγιστήριο.