



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ**  
**ΑΓΙΟΥ ΦΩΚΑ ΤΗΣ ΚΩ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ**  
**ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ      ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ      ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΕΜΜ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ      Δρ. ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΓΕΩΛΟΓΟΣ**

**ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ**

**ΧΑΝΙΑ 2006**

*Αφιερώνεται στον αδελφό μου,  
Θωμά.*

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο μηχανισμός που οδήγησε στην αστοχία ενός πρανούς στο οποίο εκδηλώθηκε κατολίσθηση. Η γεωτεχνική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην Ανατολική Κω κατά μήκος της οδού που συνδέει την περιοχή του Αγίου Φωκά με την περιοχή Θέρμες όπου εκδηλώθηκε κατολίσθηση. Η κατολίσθηση αυτή ενεργοποιήθηκε για πρώτη φορά το 2000.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δείγματα γεωτρήσεων για τον προσδιορισμό της γεωλογικής δομής και των γεωτεχνικών παραμέτρων των εδαφικών υλικών. Δημιουργήθηκε τομή του πρανούς εκατέρωθεν των γεωτρήσεων στο σχεδιαστικό πακέτο Autocad. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού Plaxis, όπου έγινε εισαγωγή της τομής και των παραμέτρων των εδαφικών σχηματισμών, έγινε προσομοίωση του γεωτεχνικού προβλήματος και μελετήθηκε η ευστάθεια του πρανούς. Εξάγονται συμπεράσματα τόσο για τιμή του συντελεστή ασφάλειας όσο και για την πιθανή επιφάνεια αστοχίας του πρανούς.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία για την καθοδήγηση, την υπομονή και την αμέριστη υποστήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Χωρίς την συμβολή του η διεκπεραίωση της εν λόγω εργασίας θα ήταν αδύνατη. Επίσης τους κύριους Εξαδάκτυλο Γεώργιο και Στειακάκη Εμμανουήλ για τον χρόνο που διέθεσαν για την εξέταση και διόρθωση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την: Καλογήρου Ειρήνη, για την πολύτιμη βοήθειά της στο σύνολο της διπλωματικής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια αλλά και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1	Περιγραφή του Προβλήματος .....	1
1.2	Διάρθρωση της Εργασίας .....	1
2	ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΠΡΑΝΩΝ .....	4
2.1	Γενικά.....	6
2.2	Μέρη Τυπικής Κατολίσθησης .....	7
2.3	Είδη Κατολισθήσεων .....	9
2.3.1	Αργιλικά πρανή.....	13
2.3.2	Κατολισθήσεις βραχωδών σχηματισμών.....	15
2.4	Αντιμετώπιση κατολισθήσεων.....	16
2.4.1	Αργιλικά πρανή.....	17
2.4.2	Βραχώδη πρανή.....	21
2.4.3	Πρανή με διεπιφάνεια βράχου-εδάφους .....	24
2.5	Αναγνώριση κατολισθήσεων .....	24
3	ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	25
3.1	Γενικά.....	25
3.2	Γεωλογία Της Περιοχής.....	30
3.3	Λιθολογικοί Σχηματισμοί .....	31
3.4	Τεκτονικά Στοιχεία της Περιοχής.....	36
3.5	Κλιματολογικά Στοιχεία της Περιοχής.....	36
3.6	Υδρογεωλογικά Στοιχεία της Περιοχής.....	36
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ .....	38
4.1	Ανάλυση Ολίσθησης σε Επίπεδη Επιφάνεια.....	38
4.2	Κυκλικές Επιφάνειες.....	40
4.2.1	Ανάλυση ελευθέρου σώματος.....	40
4.2.2	Μέθοδος των τομών.....	41
4.3	Μη Κυκλικές Επιφάνειες.....	46
4.4	Ανάλυση της περίπτωσης $\phi_u = 0$ .....	49
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	51
5.1	Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	52
5.2	Φιλοσοφία της Μεθόδου.....	53
5.3	Διακριτοποίηση.....	54
5.4	Συναρτήσεις Μορφής.....	55
5.5	Καταστατικές εξισώσεις.....	57
5.6	Συνοριακές Συνθήκες και Μοντέλα Συμπεριφοράς Υλικών.....	58
5.7	Κριτήρια Αστοχίας Γεωυλικών.....	60
5.7.1	Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb.....	60
5.7.2	Κριτήρια αστοχίας Von-misses και Tresca.....	64

5.7.3	Κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager.....	65
5.8	Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων Στην Ευστάθεια Πρανών.....	66
6	ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΗ ΚΑΙ ΜΗ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΟ PLAXIS .....	67
6.1	Γενικά.....	67
6.2	Τύπος Συμπεριφοράς Υλικού .....	67
6.2.1	Στραγγιζόμενη συμπεριφορά.....	67
6.2.2	Μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά.....	68
6.3	Μοναδιαίο Βάρος και Διαπερατότητα.....	70
6.3.1	Ξηρό και υγρό μοναδιαίο βάρος.....	70
6.3.2	Διαπερατότητες.....	71
6.4	Μέθοδοι Ανάλυσης με μη Στραγγιζόμενη Συμπεριφορά στο PLAXIS .....	71
6.4.1	Ανάλυση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς στο Plaxis με ενεργές παραμέτρους .....	72
6.4.2	Ανάλυση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς με ολικές παραμέτρους.....	77
6.5	Παραμετρική Ανάλυση για τη Διερεύνηση Στραγγιζόμενης και μη Στραγγιζόμενης Συμπεριφοράς στο Plaxis .....	77
6.5.1	Μοντέλο 1.....	77
6.5.2	Μοντέλο 2.....	85
7	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	91
7.1	Γενικά.....	91
7.2	Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα των γεωτρήσεων .....	93
7.2.1	Αποκλισημετρικές Μετρήσεις .....	93
7.2.2	Μετρήσεις διαπερατότητας.....	94
7.2.3	Δοκιμή πρότυπης διείδυσης.....	95
7.2.4	Προσδιορισμός κοκκομετρίας, φυσικής υγρασίας και ορίων Atteberg.....	96
7.2.5	Πυρηνοληψία και Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος.....	96
7.3	Μοντελοποίηση του Προβλήματος.....	97
7.3.1	Παρουσίαση του πρανού προς επίλυση .....	97
7.3.2	Βήματα που ακολουθούνται για τη μοντελοποίηση του πρανού.....	100
7.3.3	Υπολογισμοί .....	106
7.3.3.1	Πρώτο μοντέλο .....	106
7.3.3.2	Δεύτερο Μοντέλο .....	107
7.3.4	Αποτελέσματα.....	108
7.3.4.1	Πρώτο μοντέλο επίλυσης .....	109
7.3.4.2	Δεύτερο μοντέλο επίλυσης .....	112
7.3.4.3	Διερεύνηση της κατάστασης του πρανού μετά την αστοχία .....	113
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	117
8.1	Ευστάθεια του Πρανούς.....	117
8.2	Συμπεριφορά του Προγράμματος κατά την Επίλυση.....	118
8.3	Προτάσεις.....	118
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	120

## **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Περιγραφή Προβλήματος**

Σε αυτή την εργασία μελετάται ο μηχανισμός που οδήγησε στην αστοχία εδαφικού πρανούς, το οποίο βρίσκεται στο νησί της Κω. Συγκεκριμένα η εν λόγω αστοχία / κατολίσθηση σημειώθηκε κατά μήκος του επαρχιακού οδικού άξονα Αγ. Φωκά-Θέρμες στην περιοχή της ανατολικής Κω το έτος 2000. Από την αστοχία του πρανούς δημιουργήθηκαν σοβαρά προβλήματα όπως ρωγμές και αστοχία του οδικού άξονα.

Για να προσδιοριστεί το αίτιο που οδήγησε στην αστοχία και να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης της, πραγματοποιήθηκαν 8 γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή της εκδήλωσης της κατολίσθησης. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της επιφάνειας ολίσθησης και τον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας.

Σημειώνεται ότι υπάρχει η προφορική πληροφορία ότι η εμφάνιση της αστοχίας παρατηρήθηκε μετά από περίοδο έντονων βροχοπτώσεων. Έτσι η διερεύνηση ευστάθειας του πρανούς περιελάμβανε γεωτεχνικές συνθήκες και παραμέτρους με παρουσία νερού και κατά την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Με την παραδοχή αυτή και με την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων από τα περιορισμένα στοιχεία των διαθέσιμων γεωτρήσεων, φαίνεται ότι είναι πιθανή η αστοχία του πρανούς από την άνοδο του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή. Μία τέτοια ανύψωση του υδροφόρου είναι αναμενόμενη μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

### **1.2 Διάρθρωση Εργασίας**

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση αυτού του προβλήματος κατολίσθησης, και η επίλυση του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της επιφάνειας ολίσθησης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Plaxis, το οποίο χρησιμοποιεί δύο διαστάσεις για την πραγματοποίηση των επιλύσεων. Επίσης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση όσον αφορά στην επίδραση υδροφορίας στη διαδικασία επίλυσης με το λογισμικό Plaxis. Ακολουθεί η διάρθρωση της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε αναφορά στα είδη των κατολισθήσεων και στα κριτήρια με βάση τα οποία αυτές διαχωρίζονται. Αναφέρθηκαν οι κατολισθήσεις που πραγματοποιούνται στα εδαφικά και αυτές που πραγματοποιούνται στα βραχώδη πρανή. Ακόμα αναλύονται τα μέρη τα οποία διακρίνονται σε ένα πρανές και ο τρόπος εκδήλωσης μιας κατολίσθησης. Τέλος γίνεται λόγος για τη διαγνωστική των κατολισθήσεων, καθώς και για τα μέτρα που ακολουθούνται για την αντιμετώπισή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωλογία και στρωματογραφία της περιοχής. Επίσης γίνεται αναφορά στην γεωλογική εξέλιξη του νησιού της Κω μέσα στο χρόνο. Τέλος δίδονται τα υδρογεωλογικά στοιχεία της υπό μελέτη περιοχής.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους οριακής ισορροπίας οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της ευστάθειας πρανών. Αυτές διαχωρίζονται ανάλογα με το εάν θεωρούν επίπεδη, κυκλική ή σύνθετη επιφάνεια ολίσθησης και στη συνέχεια η κάθε μία διαφοροποιείται ανάλογα με την παραδοχή που χρησιμοποιεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Δίδονται επίσης τα κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών και γίνεται μία σύντομη αναφορά στην εφαρμογή της μεθόδου για προβλήματα ευστάθειας πρανών.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση της συμπεριφοράς του λογισμικού Plaxis, με βάση τις επιλογές του στραγγιζόμενη και αστράγγιστη συμπεριφορά. Πραγματοποιούνται επιλύσεις σε απλής γεωμετρίας πρανή και περιγράφεται ο υπολογισμός της πίεσης των πόρων από το πρόγραμμα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται σε πίνακα.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης και επίλυσης του προβλήματος της ευστάθειας του υπόψη πρανού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Περιγράφονται η δημιουργία του μοντέλου και τα βήματα επίλυσης.



## *1 Εισαγωγή*

Στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συνεκτίμηση όλων των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

## 2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΠΡΑΝΩΝ

Οι κατολισθήσεις και άλλες μετακινήσεις πρανών έχουν απασχολήσει τον άνθρωπο, καθώς και άλλα ανεξέλεγκτα φυσικά φαινόμενα όπως είναι οι σεισμοί και τα ηφαίστεια. Τα φαινόμενα αυτά απειλούν την περιουσία του ανθρώπου ακόμα και τη ζωή του. Σε κάποιες περιοχές οι κατολισθήσεις είναι φαινόμενα που συμβαίνουν σπάνια ενώ σε άλλες είναι τόσο συχνά ώστε να διαμορφώνουν το ανάγλυφο των περιοχών αυτών. Επειδή δημιουργούν σημαντικά προβλήματα σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας όπως είναι οικισμοί, κατασκευές, επικοινωνίες, αποτελούν και σοβαρό οικονομικό πρόβλημα (Zaruba and Mencil, 1982).

Συγκεκριμένα οι μετακινήσεις πρανών αποτελούν απειλή για:

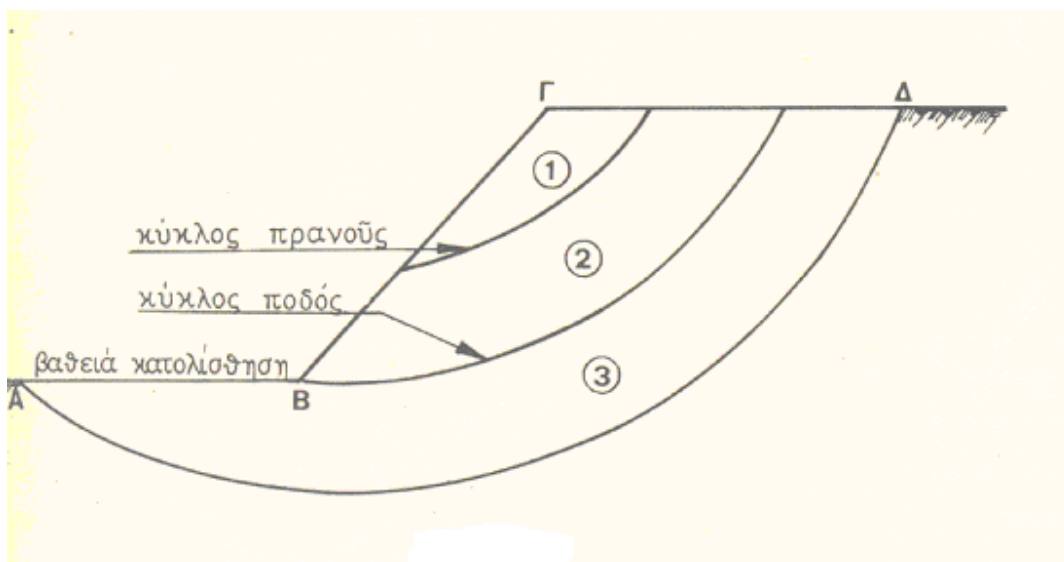
- κτίρια, χωριά ή και ολόκληρες πόλεις,
- αγροτικές καλλιέργειες και δάση,
- την λειτουργία των ορυχείων και συνεπώς την εξόρυξη ορυκτών κοιτασμάτων,
- δρόμους και σήραγγες υπό κατασκευή ή και αυτές που ήδη χρησιμοποιούνται,
- φράγματα και υδατοφράκτες,
- λίμνες και δεξαμενές.

Η μελέτη και αντιμετώπιση των κατολισθήσεων αποτελεί μία δύσκολη εργασία για το μηχανικό. Συνήθως δεν υπάρχει χρόνος αλλά ούτε και οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την εκτέλεση των απαραίτητων ερευνητικών διεργασιών που συμβάλλουν στην τεκμηριωμένη επίλυση του προβλήματος. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μια γενική και σωστή μεθοδολογία για την αντιμετώπιση τους. Επίσης δεν υφίσταται ένας συγκεκριμένος τρόπος μελέτης της συμπεριφοράς του εδάφους. Συνεπώς κάθε περίπτωση θα πρέπει να μελετάται ξεχωριστά και ανεξάρτητα από τις άλλες (Μαραγκάκη, 2003). Η εμπειρία παίζει σημαντικό ρόλο όπως και η σωστή χρήση των θεωριών εδαφομηχανικής, βραχομηχανικής τεχνικής γεωλογίας και υδρογεωλογίας (Charles, 1979).

Ως κατολισθήσεις με την στενή έννοια του όρου αναφέρονται οι ταχείες μετακινήσεις γεωυλικών με την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων που ολισθαίνουν σε σχέση με την υποκείμενη σταθερή επιφάνεια του πρανού κατά μήκος ενός συγκεκριμένου επιπέδου ολίσθησης. Επίσης, φαινόμενα ολίσθησης που αφορούν αργές και μακροχρόνιες παραμορφώσεις πρανών περιλαμβάνονται στις κατολισθήσεις (Zaruba and Mencl, 1982). Η κατολίσθηση λοιπόν εκφράζει το αποτέλεσμα της αναζήτησης μίας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους (Εξαδάκτυλος, 2001).

Τα πρανή διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα φυσικά και τα τεχνητά. Τα φυσικά πρανή έχουν τη μορφή μίας κεκλιμένης εδαφικής μάζας, η οποία μπορεί να είναι μία πλαγιά ή οι όχθες ενός ποταμού. Τα τεχνητά πρανή είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας και μπορεί να προέρχονται από μια εκσκαφή ή να δημιουργήθηκαν από μία επιχωμάτωση (Καλογήρου, 2003).

Γενικά το έδαφος μπορεί να διατηρεί την ισορροπία του ακόμα κι αν η ελεύθερη επιφάνεια του είναι κεκλιμένη. Πέρα όμως από μια συγκεκριμένη κλίση η ισορροπία διαταράσσεται και το αποτέλεσμα είναι η μερική ή ολική αστοχία του πρανού. Η επιφάνεια της κατολίσθησης έχει πολύπλοκη μορφή προσεγγιστικά όμως θα μπορούσε να θεωρηθεί περίπου κυλινδρική.



Εικόνα 2.1: Επιφάνειες κατολίσθησης (Βαλαλάς, 1981).

Η διατομή μίας κατολίσθησης μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις τρεις θέσεις του σχήματος. Οι κύκλοι 1 και 2 χαρακτηρίζουν αντίστοιχα τη μερική και την ολική κατολίσθηση ενώ ο κύκλος 3 αντιστοιχεί στη βαθιά κατολίσθηση (Βαλαλάς, 1981).

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν τα είδη των κατολισθήσεων ο μηχανισμός γένεσής τους, τα αίτια που τις προκαλούν, και θα γίνει αναφορά στις μεθόδους πρόληψης και αντιμετώπισής τους.

## 2.1 Γενικά

Το γήινο ανάγλυφο μεταβάλλεται συνεχώς κάτω από την επίδραση μακροχρόνιων γεωλογικών διεργασιών ή και την επίδραση έντονων φυσικών φαινομένων όπως οι σεισμοί καθώς επίσης και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η σταθερότητα του γήινου ανάγλυφου οφείλεται στη γεγονός ότι η διατμητική αντοχή των εδαφών είναι μεγαλύτερη από τις διατμητικές τάσεις που ασκεί σε αυτά το βάρος τους ή άλλες εξωτερικές φορτίσεις. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις η ευστάθεια ανατρέπεται με αποτέλεσμα την κατολίσθηση των φυσικών ή τεχνητών πρανών (Μαραγκάκη, 2003). Ο όρος ευστάθεια αναφέρεται στην αντίσταση μίας κατασκευής ή ενός πρανού στο να αστοχήσει με κατάρρευση ή ολίσθηση κάτω από τις συνθήκες για τις οποίες έχει σχεδιασθεί (Charles, 1979).

Η αστοχία ενός πρανού μπορεί να αποδοθεί σε διάφορες αιτίες. Συνήθως σε μία κατολίσθηση συμβάλλουν περισσότερες από μία αιτίες. Πολλοί παράγοντες συνυπάρχουν και συντελούν στη δημιουργία μιας κατολίσθησης. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 2 μεγάλες κατηγορίες (Charles, 1979).

- Παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση των διατμητικών τάσεων όπως η αφαίρεση πλευρικών τάσεων, η επιβάρυνση του πρανού με πρόσθετα φορτία, δημιουργία παροδικών τάσεων στο έδαφος (σεισμικές δονήσεις), η αφαίρεση μίας υποκείμενης υποστήριξης του πρανού, σημαντική αλλαγή στη γεωμετρία της περιοχής, και δημιουργία πλευρικών πιέσεων κυρίως από το νερό των πόρων όταν έχουμε αύξηση στη περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους.

- Παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση της διατμητικής αντοχής, όπως αλλαγές στις δυνάμεις συνοχής του εδάφους λόγω της περιεκτικότητας σε νερό και τις πιέσεις που ασκεί αυτό στους πόρους, τα ίδια τα χαρακτηριστικά του εδάφους (προσανατολισμός ασυνεχειών), φυσικοχημικές διεργασίες (διάβρωση), αποδυνάμωση ευαίσθητων εδαφών.

Όσον αφορά το μηχανισμό δημιουργίας μιας κατολίσθησης, κάθε μετακίνηση ενός πρανούς, συνοδεύεται από μία σταδιακή ανάπτυξη. Αρχικά εμφανίζονται ενδείξεις διατάραξης της ισορροπίας, όπως ρωγμές στο ανώτερο μέρος του πρανούς. Στη συνέχεια το τμήμα της χαλαρωμένης μάζας αρχίζει να κινείται προς το κατώτερο μέρος του πρανούς και σιγά σιγά συσσωρεύεται στο πόδι του πρανούς. Δηλαδή υπάρχει αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο της μετακίνησης του πρανούς (Zaruba and Mencl, 1982).

## 2.2 Μέρη Τυπικής Κατολίσθησης

Τα διάφορα μέρη στα οποία διακρίνεται μια τυπική κατολίσθηση είναι τα εξής (Στειακάκης, 2004):

- α) *Το κύριο μέτωπο*. Πρόκειται για την απότομη κρημνώδη επιφάνεια στο σταθερό (αδιατάρακτο) έδαφος περιφερειακά της κατολίσθησης
- β) *Τα μικρότερα μέτωπα*. Απότομες κρημνώδεις επιφάνειες μέσα στη μάζα που κατολίσθησε
- γ) *Η κεφαλή*. Τα ανώτερα τμήματα των υλικών που κατολίσθησαν κατά μήκος της επαφής μεταξύ των διαταραγμένων υλικών και του κύριου μετώπου
- δ) *Η κορυφή του κεφαλιού*. Το υψηλότερο σημείο της επαφής μεταξύ των υλικών και του κυρίου μετώπου.
- ε) *Το πόδι*. Η γραμμή που ορίζεται από το κατώτερο μέρος της επιφάνειας διάρρηξης και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

στ) *Το δάκτυλο*. Το περιθώριο των υλικών που κατολίσθησαν το οποίο βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από το κύριο μέτωπο της κατολίσθησης.

ζ) *Η κορυφή*. Το υλικό που είναι ακόμα στη θέση του πρακτικά αδιατάρακτο και βρίσκεται στα υψηλότερα σημεία του κυρίου μετώπου.

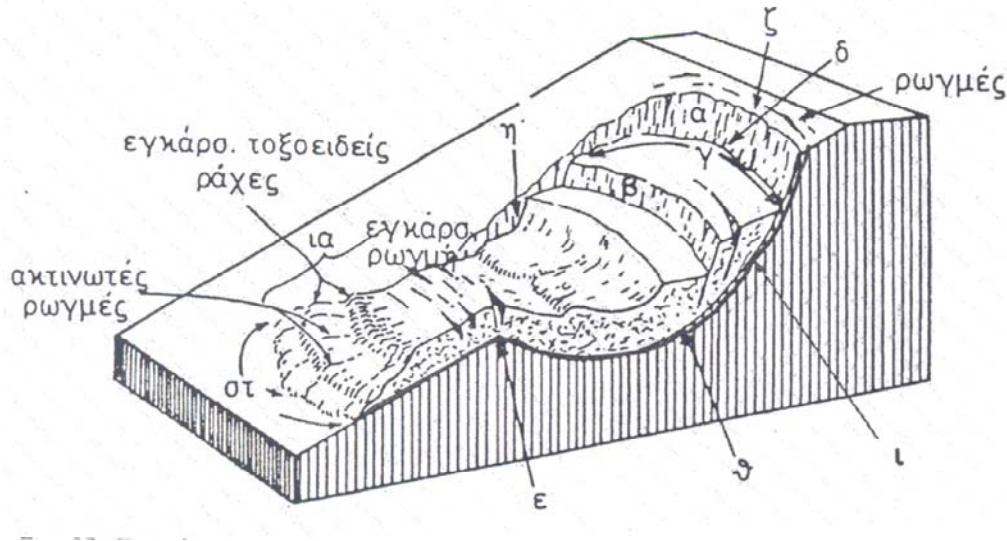
η) *Οι πλευρές*. Δεξιά θεωρείται η πλευρά που βρίσκεται στο δεξί χέρι κάποιου όταν αυτός βρίσκεται στην κορυφή και κοιτάει προς το δάκτυλο της κατολίσθησης.

θ) *Η επιφάνεια διάρρηξης*. Είναι η επιφάνεια αποχωρισμού της κατολισθαίνουσας μάζας από το σταθερό υπόβαθρο.

ι) *Η επιφάνεια ολίσθησης*. Είναι εκείνη η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η σχετική μετακίνηση της μάζας που κατολισθαίνει. Ένα τμήμα (το ανώτερο), της επιφάνειας αυτής ταυτίζεται με την επιφάνεια διάρρηξης. Σε χαμηλότερα τμήματα, κάτω από το πόδι, η ολίσθηση γίνεται πάνω στην αρχική επιφάνεια του πρανούς.

ια) *Κώνος (ή γλώσσα)*. Δημιουργείται από τα γεωυλικά που έχουν υπερβεί την επιφάνεια διάρρηξης και ολισθαίνουν πάνω στην αρχική επιφάνεια του πρανούς.

Στην Εικόνα 2.2 διακρίνονται τα διάφορα μέρη και τα χαρακτηριστικά στοιχεία μιας τυπικής κατολίσθησης.



Εικόνα 2.2: Μέρη τυπικής κατολίσθησης (Στειακάκης, 2004).

Στην πλειοψηφία των κατολισθήσεων η κατάρρευση του πρανού διαδίδεται από το πόδι. Ο συντελεστής ασφάλειας ποικίλει από σημείο σε σημείο μέσα στο ίδιο το πρανές. Γενικά ο κίνδυνος διατμητικής αστοχίας είναι πολύ μεγαλύτερος κοντά στο πόδι του από ότι σε ψηλότερα σημεία του πρανού. Σε άλλες περιπτώσεις η αστοχία εκδηλώνεται μέσα σε όλη τη μάζα του. Επίσης η αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί στο μέτωπο του πρανού περίπου στο μέσο του ύψους του. Σε περιπτώσεις όπου η κατολίσθηση οφείλεται σε επιβολή φορτίων στο πρανές η αστοχία εμφανίζεται κυρίως στη κορυφή αυτού.

### 2.3 Είδη Κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Έτσι με βάση την ηλικία οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε πρόσφατες και παλαιότερες. Οι παλαιότερες κατολισθήσεις που δεν είναι δυνατό να ενεργοποιηθούν κάτω από τις υπάρχουσες κλιματολογικές και μορφολογικές συνθήκες ονομάζονται απολιθωμένες κατολισθήσεις (fossil). Όταν έχουν επικαλυφθεί από διάφορα

άλλα αποθέματα αναφέρονται ως θαμμένες κατολισθήσεις. Σύμφωνα με το βαθμό σταθερότητας οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε ενεργές, πιθανές και σταθεροποιημένες (stabilized).

Ενεργές ονομάζονται οι κατολισθήσεις οι οποίες είναι εύκολο να αναγνωριστούν από τη διαμόρφωση τους, γιατί οι μορφές των επιφανειών είναι ακόμα ευδιάκριτες και δεν έχουν εξαλειφθεί, αλλοιωθεί από τη δράση κλιματολογικών συνθηκών όπως η διάβρωση. Επίσης τα δέντρα έχουν μετακινηθεί από την αρχική τους θέση, οι δρόμοι οι οποίοι διασχίζουν την περιοχή όπου εκδηλώνονται οι κατολισθήσεις παρουσιάζουν ρηγματώσεις και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και κτίρια παθαίνουν σοβαρές ζημιές.

Οι πιθανές κατολισθήσεις είχαν αλλοιωθεί από διάβρωση, έτσι ώστε τα ίχνη της τελευταίας μετακίνησης να είναι δύσκολο να διακριθούν. Εφόσον οι παράγοντες που προκάλεσαν αρχικά τη μετακίνηση συνεχίζουν να λειτουργούν, μία νέα μετατόπιση είναι πιθανό να συμβεί.

Οι σταθεροποιημένες κατολισθήσεις είναι αυτές που δε διακρίνονται εύκολα γιατί έχουν επηρεαστεί-κινητοποιηθεί από μορφολογικούς και κλιματολογικούς παράγοντες οι οποίοι πλέον δεν υφίστανται και βρίσκονται μόνιμα σε κατάσταση αδράνειας (Zaruba and Mencl, 1982).

Αυτού του είδους η διάκριση είναι αρκετά βολική για σκοπούς που αφορούν μελέτες μηχανικών. Επίσης ένας ακόμη διαχωρισμός των κατολισθήσεων γίνεται με βάση το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης.



**Πίνακας 2.1: Διάκριση κατολισθήσεων ανάλογα με το βάθος (Τσότσος 1991).**

Τύπος	Μέγιστο βάθος, D
Επιφανειακές ολισθήσεις	< 1,5 m
Αβαθείς ολισθήσεις	1,5 - 5,0 m
Βαθείς ολισθήσεις	5,0 - 20,0 m
Πολύ βαθιές ολισθήσεις	> 20,0 m

Ακόμα ένα κριτήριο διαχωρισμού είναι η ταχύτητα εξέλιξης της κατολίσθησης.

**Πίνακας 2.2: Διάκριση κατολισθήσεων ανάλογα με την ταχύτητα εξέλιξης κατά Varnes (Τσότσος 1991).**

Τύπος ολισθήσεων	Ταχύτητα
Εξαιρετικά ταχείες	> 3,0 m/sec
Πολύ ταχείες	0,3 m/min - 3,0 m/sec
Ταχείες	1,6 m/ημ.- 0,3 m/min
Μέσες	1,6 m/μην.- 1,6 m/ημέρα
Αργές	1,6 m/έτ.- 1,6 m/μήνας
Πολύ αργές	0,06 m/έτ. - 1,6 m/έτος
Εξαιρετικά αργές	< 0,06 m/έτος

Το 1978 ο Varnes έκανε διάκριση των κατολισθήσεων ανάλογα με τον τρόπο κίνησης της βραχομάζας εισάγοντας 5 κύριους τύπους μετακίνησης και προσθέτοντας μία ακόμη που περιλαμβάνει κατολισθήσεις που εμφανίζουν χαρακτηριστικά των 5 προηγούμενων τύπων. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

α) **πτώσεις**-εκδηλώνονται σε πρανή μεγάλης κλίσης και το τμήμα αποχωρίζεται αμέσως από την αρχική μάζα.

β) **ανατροπές**-η βραχομάζα αναποδογυρίζει ως προς ένα σημείο κάτω από το κέντρο βάρους της.

γ) **ολισθήσεις**

- περιστροφικές-κατολισθήσεις κατά μήκος μίας κυκλικής επιφάνειας η μιας επιφάνειας με παραπλήσια μορφή.
- επιμήκεις -η βραχομάζα κινείται κατά μήκος επίπεδης η σχεδόν επίπεδης επιφάνειας.

δ) **πλευρικές εκτάσεις**-πλευρικές διατάσεις πρανών συμβαίνουν σε κατακερματισμένες μάζες γεωολικών.

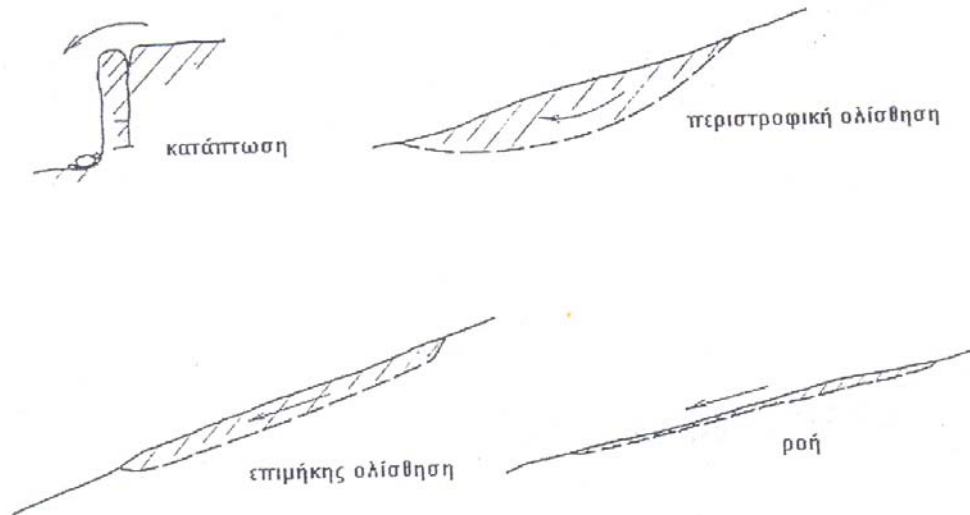
ε) **ροές**

- σε βραχομάζα-περιλαμβάνουν την συνεχή παραμόρφωση που εξελίσσεται ιδιαίτερα αργά και τμηματικά σε σχεδόν ακέραια τμήματα της βραχομάζας.
- στο έδαφος-η μετακίνηση πραγματοποιείται σε εδάφη μικρής αντοχής, τα οποία κινούνται με μικρή ταχύτητα χάνοντας την εσωτερική τους δομή.

στ) **σύνθετες μετακινήσεις**-είναι μετακινήσεις που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο η περισσότερες από τις παραπάνω κατηγορίες.

Ο Bromhead διακρίνει τις κατολισθήσεις σε τρεις κατηγορίες:

1. **Πτώσεις.**
2. **Ολισθήσεις**, περιστροφικές και επιμήκεις.
3. **Ροές.**



Εικόνα2.3: Διαχωρισμός κατολισθήσεων ανάλογα με τον τρόπο μετακίνησης της μάζας (Βαλαλάς, 1981).

Οι παραπάνω μετακινήσεις ταξινομούνται ανάλογα με το είδος των πρανών. Τα δύο κυριότερα είδη στα οποία παρατηρούνται κατολισθήσεις είναι τα αργίλικά και τα βραχώδη.

### 2.3.1 Εδαφικά Πρανή

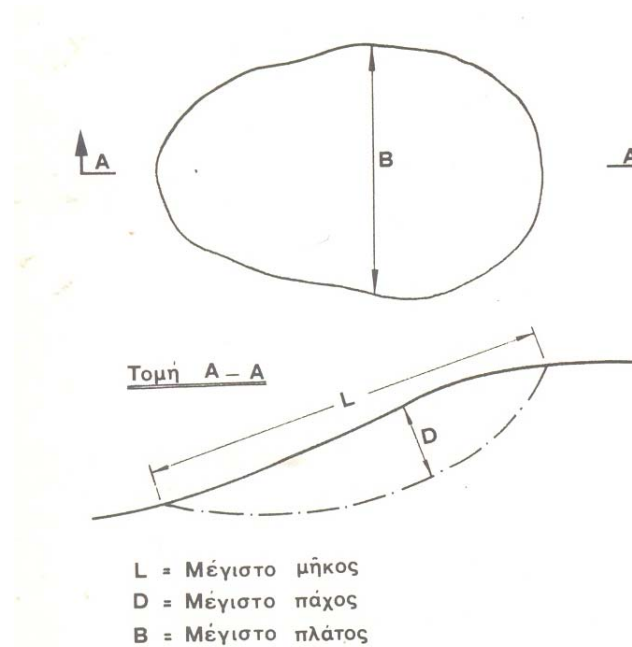
Στα αργίλικά πρανή οι μετακινήσεις που παρατηρούνται είναι:

- α) οι περιστροφικές μετακινήσεις,
- β) οι επίπεδες μετατοπίσεις,
- γ) οι ροές.

Οι περιστροφικές μετακινήσεις γίνονται κατά μήκος μίας κυκλικής ή παραπλήσιας επιφάνειας. Συχνά η επιφάνεια αποτελείται από ένα σύνολο διαδοχικών κυκλικών επιφανειών. Η κυκλική κατολίσθηση χαρακτηρίζεται από το λόγο  $D/L$ , του μεγίστου

βάθους  $D$  προς το μήκος  $L$  της κατολίσθησης. Για τις τιμές του λόγου αυτού ισχύουν οι ανισότητες.

$$0,15 \leq D / L \leq 0,33$$



Εικόνα 2.4: Κυκλική κατολίσθηση (Βαλαλάς, 1981).

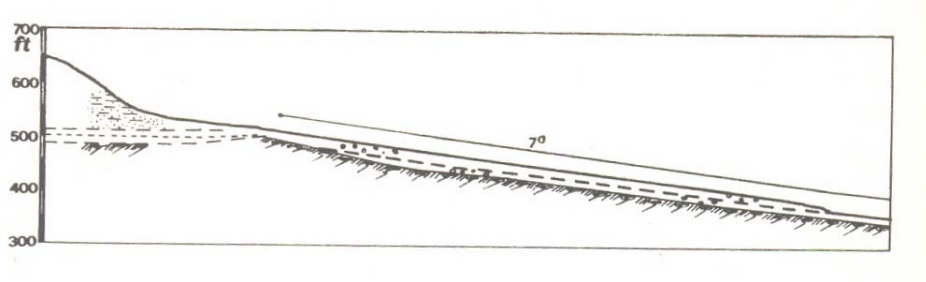
Κυκλικές κατολισθήσεις παρατηρούνται σε εδάφη αρκετά ομοιογενή. Οι πολλαπλές κυκλικές κατολισθήσεις αντιστοιχούν σε εδάφη που παρουσιάζουν ανομοιογένεια.

Οι επίπεδες μετατοπίσεις παρατηρούνται όταν σε μικρό βάθος βρίσκεται στρώμα μαλακό, το οποίο μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις συνήθως, προκαλεί τις κινήσεις της επιφανειακής στρώσης. Ο λόγος  $D/L$  είναι μικρότερος από 0,1 μερικές φορές η μετατόπιση συνδυάζεται και με κυκλικές κινήσεις.



Εικόνα 2.5: Επίπεδη μετατόπιση (Βαλαλάς, 1981).

Οι ροές παρατηρούνται σε εδάφη μικρής αντοχής, τα οποία κινούνται με μικρή ταχύτητα χάνοντας την εσωτερική τους δομή. Η κλίση των πρανών είναι μικρότερη από 15 μοίρες (Βαλαλάς, 1981).

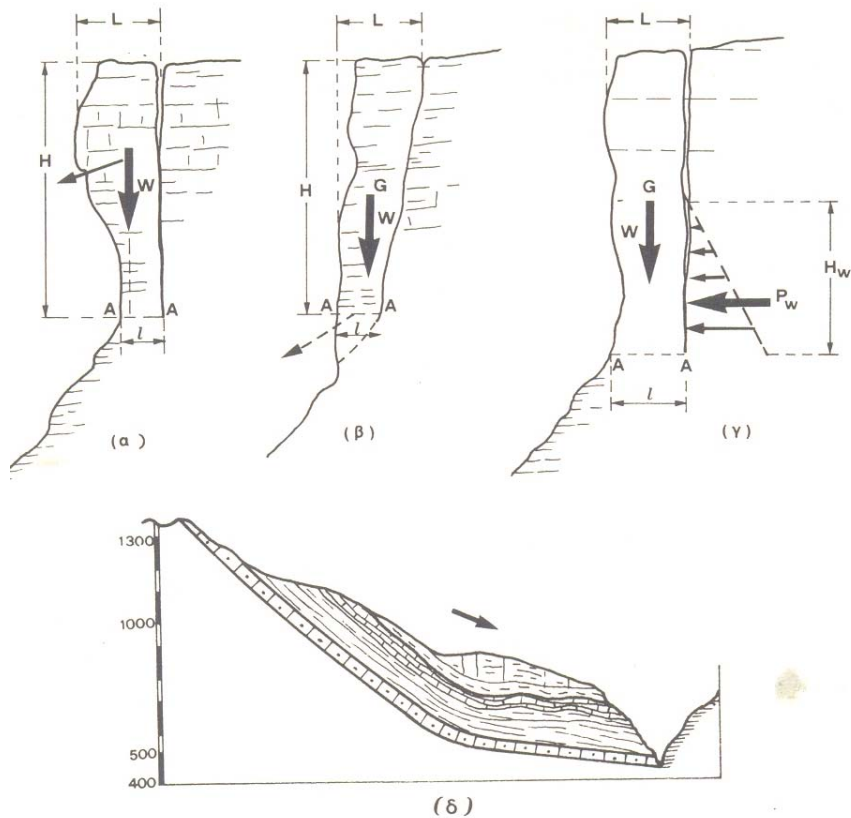


Εικόνα 2.6: Ροές (Βαλαλάς, 1981).

### 2.3.2 Κατολισθήσεις Βραχωδών Σχηματισμών

Οι κατολισθήσεις αυτές παρουσιάζονται πολύ συχνά στον Ελλαδικό χώρο. Οι μορφές των κατολισθήσεων αυτών εξαρτώνται απόλυτα από το βαθμό και τη διαμόρφωση της ρηγμάτωσης του βράχου. Οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται είναι οι εξής:

- Τις κατολισθήσεις πρανών που παρουσιάζουν μία περιορισμένη ρηγμάτωση. Στην περίπτωση αυτή ο βράχος συμπεριφέρεται σαν κατακερματισμένο έδαφος.
- Τις κατολισθήσεις που γίνονται κατά μήκος συγκεκριμένης επιφάνειας θραύσης. Παράδειγμα τέτοιων κατολισθήσεων παρατηρείται στο φλύσχη, όταν τα επίπεδα ρηγμάτωσης είναι παράλληλα περίπου προς το πρανές.
- Τις κατολισθήσεις που γίνονται κατά μήκος ενός συνδυασμού επιφανειών θραύσης και που επηρεάζονται από τις γενικές συνθήκες ισορροπίας.
- Πτώσεις βράχων λόγω θραύσης επιφάνειας πάκτωσής τους.



Εικόνα 2.7: Κατολισθήσεις βραχωδών σχηματισμών (Βαλαλάς, 1981).

Μία άλλη ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών γίνεται με βάση την κλίμακά τους (Βαλαλάς, 1981).

Καταστροφικές κατολισθήσεις: πάνω από  $10^6 \text{ m}^3$

Μεγάλες κατολισθήσεις: από  $10^4$  έως  $10^6 \text{ m}^3$

Κατολισθήσεις συνήθεις: από  $10^4$  έως  $10^3 \text{ m}^3$

Καταπτώσεις ογκολίθων και λίθων: μέχρι  $0,1 \text{ m}^3$

## 2.4 Αντιμετώπιση Κατολισθήσεων.

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κατολισθήσεων είναι απαραίτητο να γίνεται όσο το δυνατό καλύτερα η διερεύνηση των αιτιών που τις προκαλούν. Αλλιώς υπάρχει κίνδυνος τα προτεινόμενα μέτρα να επιδεινώσουν την κατάσταση.

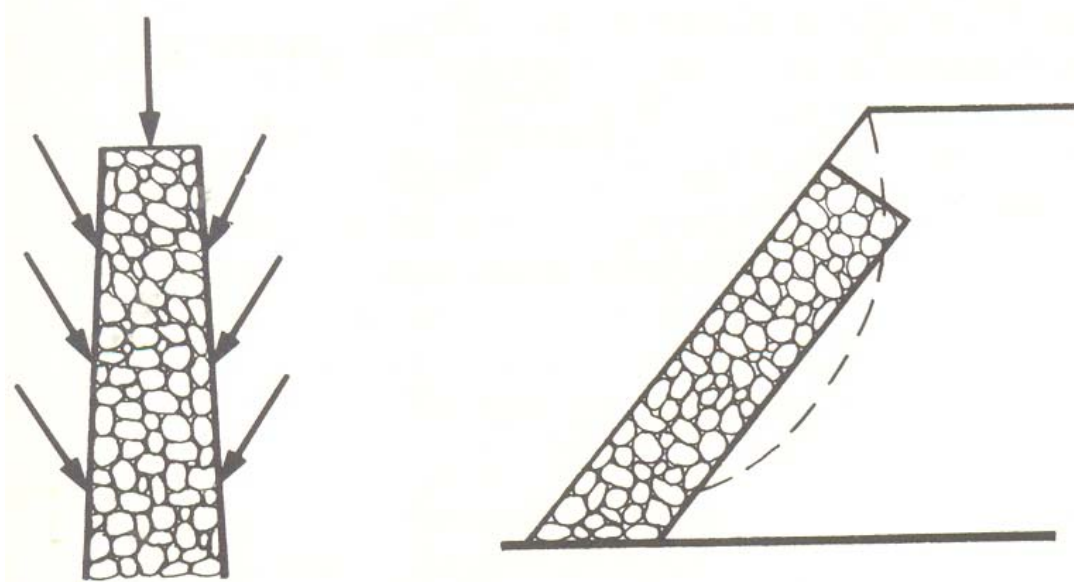
Όταν διαπιστωθεί ότι η ανάσχεση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα μέσα, τεχνικά και οικονομικά, που υπάρχουν, η μόνη λύση είναι η εγκατάλειψη των προσπαθειών. Πολλές φορές αυτό οδηγεί σε μετατόπιση ολόκληρων οικισμών.

#### 2.4.1 Εδαφικά Πρανή

α) Όταν η κατολίσθηση οφείλεται στην επίδραση του νερού.

Θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ώστε να απομακρυνθεί το νερό που βρίσκεται μέσα στη ζώνη, ή για να εμποδιστεί η εισροή νέων ποσοτήτων νερού.

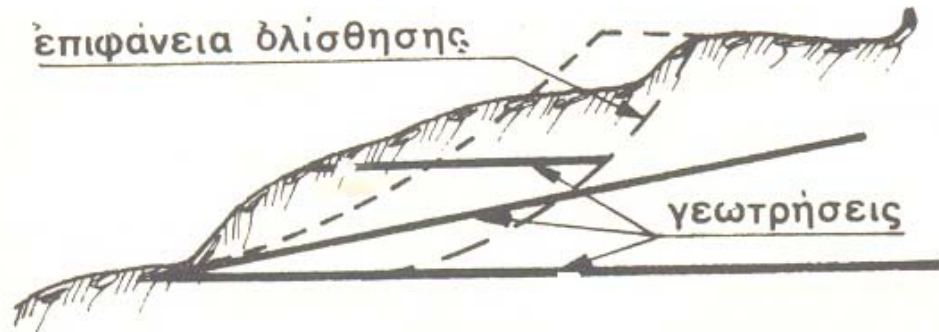
1. Ο απλούστερος τρόπος αποξήρανσης του εδάφους είναι η διάνοιξη χαντακιών στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, που να απέχουν μεταξύ τους 6 περίπου μέτρα, και να έχουν βάθος ίσο περίπου με το βάθος του υποτιθέμενου κύκλου κατολίσθησης. Τα χαντάκια αυτά γεμίζονται με χοντρά λιθορίματα και επιτρέπουν την απομάκρυνση του υπόγειου νερού. Επιπλέον αυξάνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Χαντάκια με λιθορίματα (Βαλαλάς, 1981).

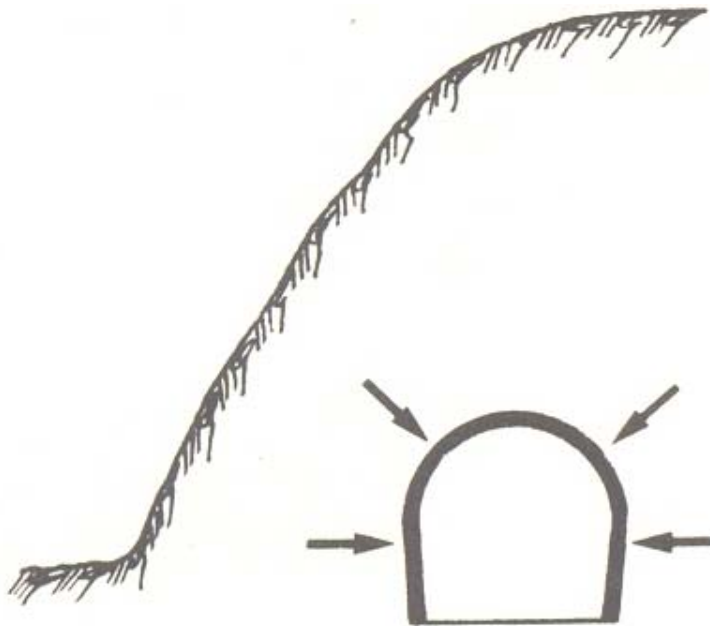
Υπάρχει όμως ο κίνδυνος μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, να πληρωθούν τα κενά με αργιλώδες έδαφος, με συνέπεια τη μείωση της αποτελεσματικότητας.

2. Πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι η εκτέλεση γεωτρήσεων, περίπου οριζόντιων από τη βάση του πρανού, με διάμετρο 70 ως 100 μέτρα οι οποίες λειτουργούν σα φίλτρα (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Γεωτρήσεις για αποστράγγιση (Βαλαλάς, 1981).

3. Τέλος είναι δυνατό να εκτελεστεί κάτω από το πρανές αποξηραντική σήραγγα. Η μέθοδος αυτή είναι ικανοποιητική αλλά πολύ πιο δαπανηρή από τις προηγούμενες. Πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις μεγάλης ανάγκης.



Εικόνα 2.10: Αποξηραντική σήραγγα (Βαλαλάς, 1981).

4. Επίσης προτείνεται η δημιουργία περιφερειακής τάφρου. Η μέθοδος αυτή όμως μόνο τα επιφανειακά νερά μπορεί να απομακρύνει. Επίσης μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής του εδάφους και να διευκολύνει την κατολίπηση.



5. Όταν η κατολίσθηση οφείλεται στη διείδυση του μετεωρικού νερού μέσα στο έδαφος, από τις επιφανειακές ρωγμές, γίνεται σφράγισμα των ρωγμών αυτών. Συνήθως γίνεται χρήση τσιμεντενέσεων. Προσοχή πρέπει να δίνεται στο προσδιορισμό της πίεσης των ενέσεων για να αποφεύγεται ο πρόσθετος κίνδυνος κατολίσθησης που θα οφειλόταν στις πιέσεις αυτές.

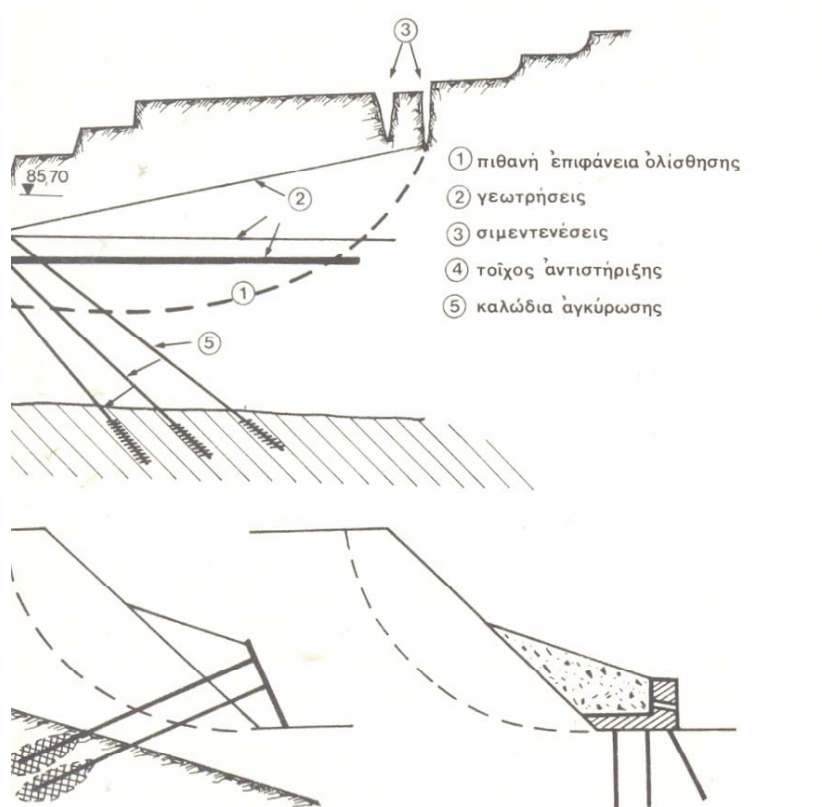
β) Η κατολίσθηση μπορεί να οφείλεται στον ερπυσμό της αργίλου ή στη μείωση της αντοχής του. Η αποξήρανση εδώ δεν έχει ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται οι οποίες είναι όμως δαπανηρές είναι οι εξής:

1. Ηλεκτροχημική στερεοποίηση με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα η οποία προκαλεί ηλεκτρόσμωση.
2. Ψήσιμο του εδάφους. Αν το έδαφος δεν είναι κορεσμένο και αποτελείται από ιλύ χωρίς πολύ άργιλο, μπορεί να μεταβληθεί σε στερεό, αν θερμανθεί στους  $800^{\circ}\text{C}$ , μία μέθοδος ανάλογη με την παραγωγή των πλίνθων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται κατά πολύ η αντοχή του εδάφους και αποφεύγεται η κατολίσθηση.
3. Πάγωμα του εδάφους. Είναι δυνατό να στερεοποιηθεί το έδαφος με τη μεταβολή σε πάγο του νερού των πόρων.

Επίσης σαν μέτρο αντιμετώπισης μιας κατολίσθησης, συνηθίζεται η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης στη βάση των πρανών με ή χωρίς αγκυρώσεις στο στερεό έδαφος.

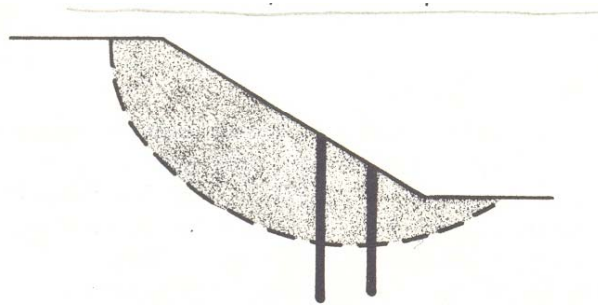
Χωρίς αγκύρωση η αποτελεσματικότητα των τοίχων είναι μικρή, επειδή η αντοχή τους δεν είναι στην κλίμακα του φαινομένου και υπάρχει κίνδυνος μετατόπισης τους.

Αν οι αγκυρώσεις γίνουν με την τεχνική της προέντασης τα αποτελέσματα θα είναι ικανοποιητικά. Αλλά πρέπει να εξετάζεται το πρόβλημα της διατήρησης των δυνάμεων αγκύρωσης σε όλη τη διάρκεια του έργου. Αγκυρώσεις χωρίς τοίχο που να επιτρέπει την καλή κατανομή των δυνάμεων στο έδαφος, έχουν μικρή αποτελεσματικότητα. Αντί για τοίχο είναι δυνατό να κατασκευαστούν σχάρες από δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος κατά μήκος του πρανού.



Εικόνα 2.11:Τοίχοι αντιστήριξης με αγκύρια (Βαλαλάς, 1981).

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάσχεση πραγματοποιείται με την τοποθέτηση μεγάλου αριθμού πασσάλων στη ζώνη της βάσης του πρανούς (Εικόνα 2.12).

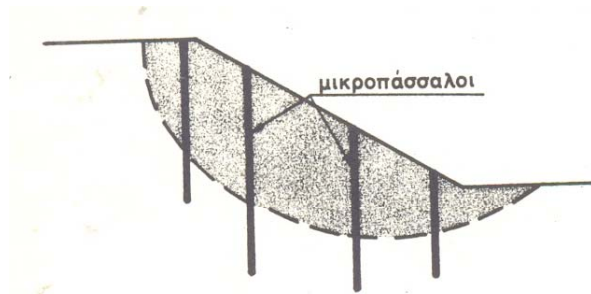


Εικόνα 2.12:Πάσσαλοι στη βάση της ζώνης του πρανούς (Βαλαλάς, 1981).

Οι πάσσαλοι αυτοί πρέπει να κατεβαίνουν κάτω από την πιθανή ζώνη κατολίσθησης, και να έχουν την απαιτούμενη αντοχή για να αντισταθούν στις πιθανές ωθήσεις που

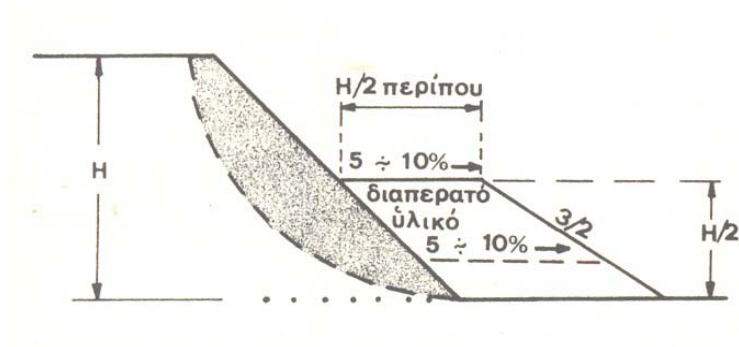
μεταφέρει η μάζα του εδάφους. Οι πάσσαλοι είναι από ξύλο, χάλυβα ή από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μικροπάσσαλοι από σκυρόδεμα διαστάσεων λίγων εκατοστών που τοποθετούνται σε όλη την επιφάνεια του πρανού σε απόσταση δύο μέτρων περίπου μεταξύ τους



Εικόνα 2.13: Τοποθέτηση μικροπασσάλων (Βαλαλάς, 1981).

Τέλος μία απλή λύση είναι η κατασκευή ενός βοηθητικού αναχώματος στη βάση του πρανού (Βαλαλάς, 1981).

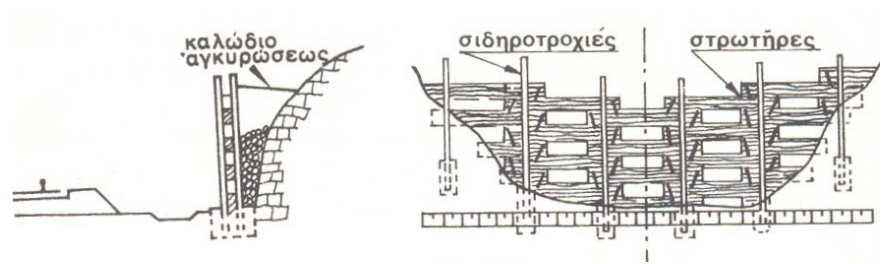


Εικόνα 2.14: Βοηθητικό ανάχωμα (Βαλαλάς, 1981).

#### 2.4.2 Βραχώδη Πρανή.

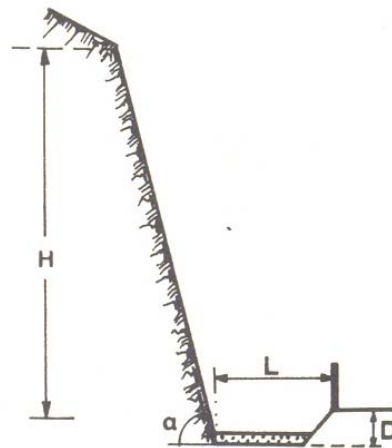
α) Όταν ο κίνδυνος περιορίζεται στην πτώση μεμονωμένων βράχων εφαρμόζονται οι εξής λύσεις:

1. Κατασκευάζεται στη βάση του πρανού και σε μια σχετική απόσταση ένα διάφραγμα από σκυρόδεμα ή και άλλα υλικά με τρόπο που τα προϊόντα των ολισθήσεων να πέφτουν πίσω από το διάφραγμα.



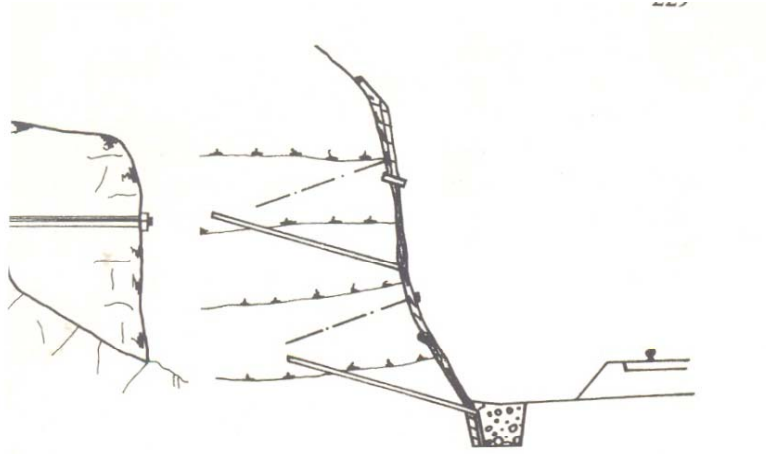
Εικόνα 2.15: Διάφραγμα από σκυρόδεμα (Βαλαλάς, 1981).

2. Σε ορισμένες περιπτώσεις αρκεί να προβλεφθεί μια ζώνη ασφαλείας μεταξύ της οδού και της βάσης του πρανού. Το πλάτος της είναι συνάρτηση της γωνίας  $\alpha$  του πρανού και του ύψους  $H$ . Είναι καλό να προστίθεται και ένας προστατευτικός φράκτης (Εικόνα 2.16).



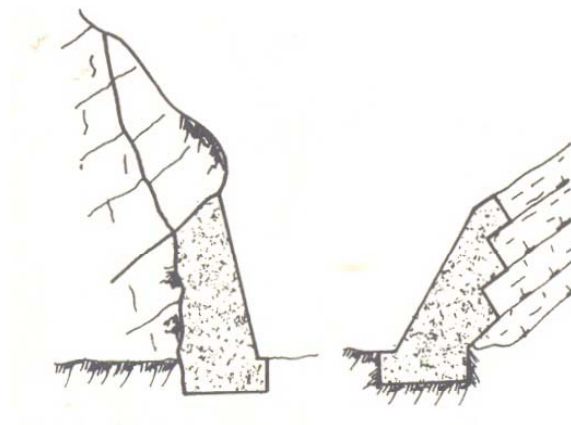
Εικόνα 2.16: Ζώνη ασφαλείας μεταξύ της οδού και του πρανού (Βαλαλάς, 1981).

3. Τοποθετείται ένα μεταλλικό πλέγμα που οδηγεί τους βράχους μικρών διαστάσεων προς τον πόδα. Το πλέγμα αγκυρώνεται στην κορυφή και είναι ανοιχτό στη βάση.
- β) Για πιο σημαντικές κατολισθήσεις χρησιμοποιούνται τα εξής μέτρα (Βαλαλάς, 1981):
1. Γίνονται αγκυρώσεις μέσα στο βράχο. Οι αγκυρώσεις μπορεί να είναι απλές ή προεντεταμένες, οριζόντιες ή με κλίση προς τα κάτω. Συνοδεύονται συχνά με την κατασκευή πεδίου αγκύρωσης.



**Εικόνα2.17: Αγκυρώσεις μέσα στο βράχο (Βαλαλάς, 1981).**

2. Ενίσχυση του βράχου με βοηθητικά μέτρα αντιστήριξης, με προστασία της επιφάνειας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με ένα μεταλλικό πλέγμα ή και με την κατασκευή προστατευτικής στοάς.



**Εικόνα2.18: Βοηθητικά μέτρα αντιστήριξης (Βαλαλάς, 1981).**

3. Στεγανή επένδυση του εδάφους πάνω από το πρανές για να εμποδιστούν οι διηθήσεις των νερών της βροχής.
4. Τέλος δεν πρέπει να αποκλείεται και η προκαταβολική αφαίρεση επικίνδυνου τμήματος του βραχώδους εδάφους με τη βοήθεια εκρηκτικών υλών η και μετατόπιση της οδού (Βαλαλάς, 1981).

### 2.4.3 Πρανή με Διεπιφάνεια Βράχου-Εδάφους

Το νερό της βροχής σε αυτού του είδους τα πρανή θα βρει δίοδο μέσω της μάζας του εδάφους προς τη διεπιφάνεια οδηγώντας σε αστοχία. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την αποφυγή κατολισθήσεων σε αυτή την περίπτωση είναι να κατασκευαστεί ένα χαντάκι αποστράγγισης, το οποίο θα συλλέξει τα νερά της βροχής πριν αυτά εισχωρήσουν στη μάζα του πρανού (Ortigao and Sayao, 2004).

## 2.5 Αναγνώριση Κατολισθήσεων

Οι απαραίτητες έρευνες που πραγματοποιούνται για την αναγνώριση μιας κατολίσθησης συνήθως είναι συνοπτικά:

- Οπτικός έλεγχος των μετακινήσεων του εδάφους σε σχέση με κάποια σταθερά σημεία.
- Περιγραφή της περιοχής.
- Χαρτογράφηση της στάθμης των υπόγειων νερών και των περιοχών κορεσμού, εκτέλεση γεωτρήσεων.
- Κατάταξη των εδαφών. Η κατάταξη των εδαφών γίνεται με δοκιμές οι οποίες είτε λαμβάνουν χώρα στη περιοχή (in situ), ή γίνονται στο εργαστήριο.

Οι πληροφορίες που πρέπει να συγκεντρωθούν είναι:

- Οι γεωλογικοί σχηματισμοί.
- Η γεωμετρία του πρανού.
- Στοιχεία αποσάθρωσης και διάβρωσης.
- Η δομή των εδαφών και των πετρωμάτων: διάταξη στρωμάτων, λιθολογικές επαφές.
- Υδρογεωλογία.
- Αποδείξεις ότι υπάρχει κατολίσθηση και η επιφάνεια της.
- Ενδείξεις για μετακινήσεις του εδάφους όπως ρωγμές, κυρτώσεις, ρήγματα.
- Βλάστηση.
- Η ύπαρξη κατασκευών και άλλων ανθρώπινων ενεργειών, όπως εκσκαφές.

### 3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 3.1 Γενικά

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στο νησί της Κω.

Η δομή της ορεινής Κω είναι πολύπλοκη, συνδυάζοντας διάφορες τεκτονικές ζώνες (Lagios and Papanikolaou, 1998):

1. Την αυτόχθονη ζώνη που εμφανίζεται στην επιφάνεια του νοτιότερου μέρους του Κέφαλου και στην κεντρική επιφάνεια του Δίκαιου. Περιλαμβάνει μεταμορφωμένα πετρώματα με ένα κατώτερο στρώμα από σχιστολιθικούς σχηματισμούς από το Παλαιοζωικό και ένα ανώτερο στρώμα από μεταμορφωμένα ανθρακικά από το Μεσοζωικό. Αυτή η βασική μονάδα είναι καλυμμένη από ένα στρώμα μολάσσας του κατώτερου Μειοκαίνου με πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων στη περιοχή του Κέφαλου.
2. Ο αλλόχθονος φλύσχης της Θέρμης που εμφανίζεται στο ανατολικό μέρος της Κω. Περιέχει τμήματα από τις ανώτερες τεκτονικές ζώνες και βρίσκεται σε επαφή με το Παλαιοζωικό της αυτόχθονης ζώνης με ένα σημαντικό σχεδόν κάθετο ρήγμα (B.BA-N.NΔ).
3. Το στρώμα της Ζίας (Τριπόλεως) το οποίο βρίσκεται πάνω στο αυτόχθονο. Δεν είναι μεταμορφωμένο και βρίσκεται σε άμεση τεκτονική επαφή με το μονζονίτη του Μειοκαίνου του Δίκαιου. Ένα μικρό τεκτονικό τμήμα αυτού του στρώματος υπάρχει επίσης στον Κέφαλο στη Δυτική Κω πάνω από την μολάσα του κατώτερου Μειοκαίνου και κάτω από τα ηφαιστειακά του ανώτερου Μειοκαίνου.
4. Το στρώμα του προφήτη Ηλία, που βρίσκεται πάνω στο στρώμα της Ζίας. Περιέχει χαρακτηριστικές πελαγικές σειρές (Πίνδος).

Η μετά αλπική δομή χαρακτηρίζεται από παχύ ιζηματογενές στρώμα του Μειοκαίνου που επεκτείνεται κατά μήκος των βόρειων πρανών του Δικαίου και στα γειτονικά όρη σε μία διεύθυνση ανατολή-δύση. Η κύρια νεοτεκτονική δομή είναι η τεκτονική λεκάνη της Αντιμαχίας η οποία εκτείνεται από τον Κέφαλο ως τα δυτικά πρανή του Δικαίου.

Αυτή η περιοχή έχει υποστεί καθίζηση κατά τη διάρκεια του Μειοκαίνου και του Πλειόκαινου και μερικές εκατοντάδες μέτρα ιζημάτων έχουν συσσωρευτεί. Οι δύο περιφερειακές τεκτονικές ζώνες του βυθίσματος είναι διαφορετικές παρόλο που τείνουν προς την ίδια κατεύθυνση (Β.Δ.-Ν.Α.). Το ανατολικό όριο προς το Δίκαιο έχει δημιουργηθεί από ένα μεγάλης γωνίας ανάστροφο ρήγμα φέρνοντας το ορεινό υπόβαθρο σε επαφή με τον εμφανιζόμενο μονζονίτη πάνω από τα ιζήματα του Μειοκαίνου δυτικά. Αυτή η τεκτονική κίνηση φαίνεται να έχει απολιθωθεί από την απόθεση ιζημάτων κατά το Πλειο-τεταρτογενές και για αυτό πρέπει να αντιπροσωπεύει δομή του Μειοκαίνου. Αυτή η δομή θα πρέπει να σχετίζεται με τον μονζονίτη του ανώτερου Μειοκαίνου του Δικαίου. Αντίθετα το δυτικό όριο της λεκάνης της Αντιμαχίας προς τον Κέφαλο, έχει δημιουργηθεί από μία ζώνη από κανονικά ρήγματα με μία μικρή δεξιόστροφη επιφάνεια ολίσθησης, το οποίο έχει ενεργοποιηθεί κατά τη διάρκεια του μέσω Μειοκαίνου-Ολοκαίνου.



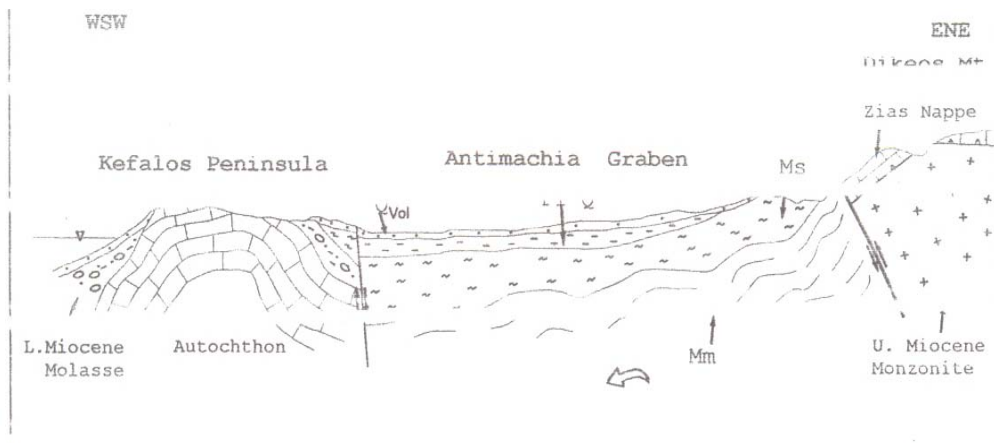
Εικόνα 3.1: Χάρτης της Κω.



Η συνεχόμενη τεκτονική δραστηριότητα αποδεικνύεται από το γεγονός ότι:

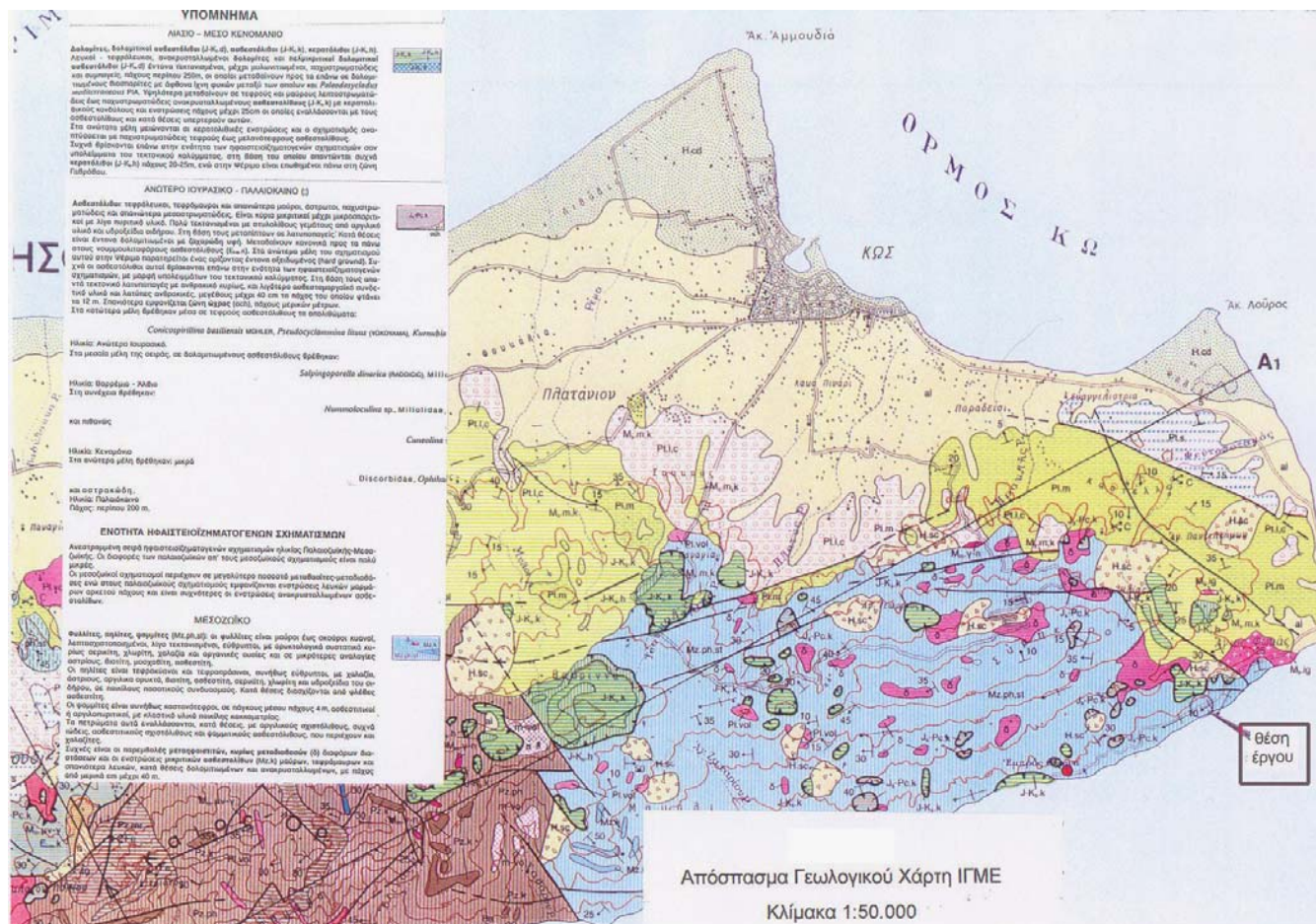
- η αλπική βάση έχει υποστεί καθίζηση μέσα στο βύθισμα, ενώ
- τα θαλάσσια ιζήματα του Πλειο-τεταρτογενούς είναι περιορισμένα από αυτή την τεκτονική ζώνη χωρίς να προεκτείνεται στη δύση και
- τα ηφαίστεια του ανώτερου Πλειστόκαινου έχουν καθιζήσει κατά τη διάρκεια του Ολόκαινου περισσότερο από 60 m στο βύθισμα όπως στον Κέφαλο.

Η εμφάνιση της εκρηξιγενούς περιοχής στην ενεργή ζώνη κανονικής ρωγμάτωσης, διαχωρίζοντας το βύθισμα της Αντιμάχιας από τη ρηξιγενή προεξοχή του Κέφαλου, δίνει έμφαση στη συσχέτιση ανάμεσα στη νεοτεκτονική δραστηριότητα και την πρόσφατη ηφαιστειότητα.



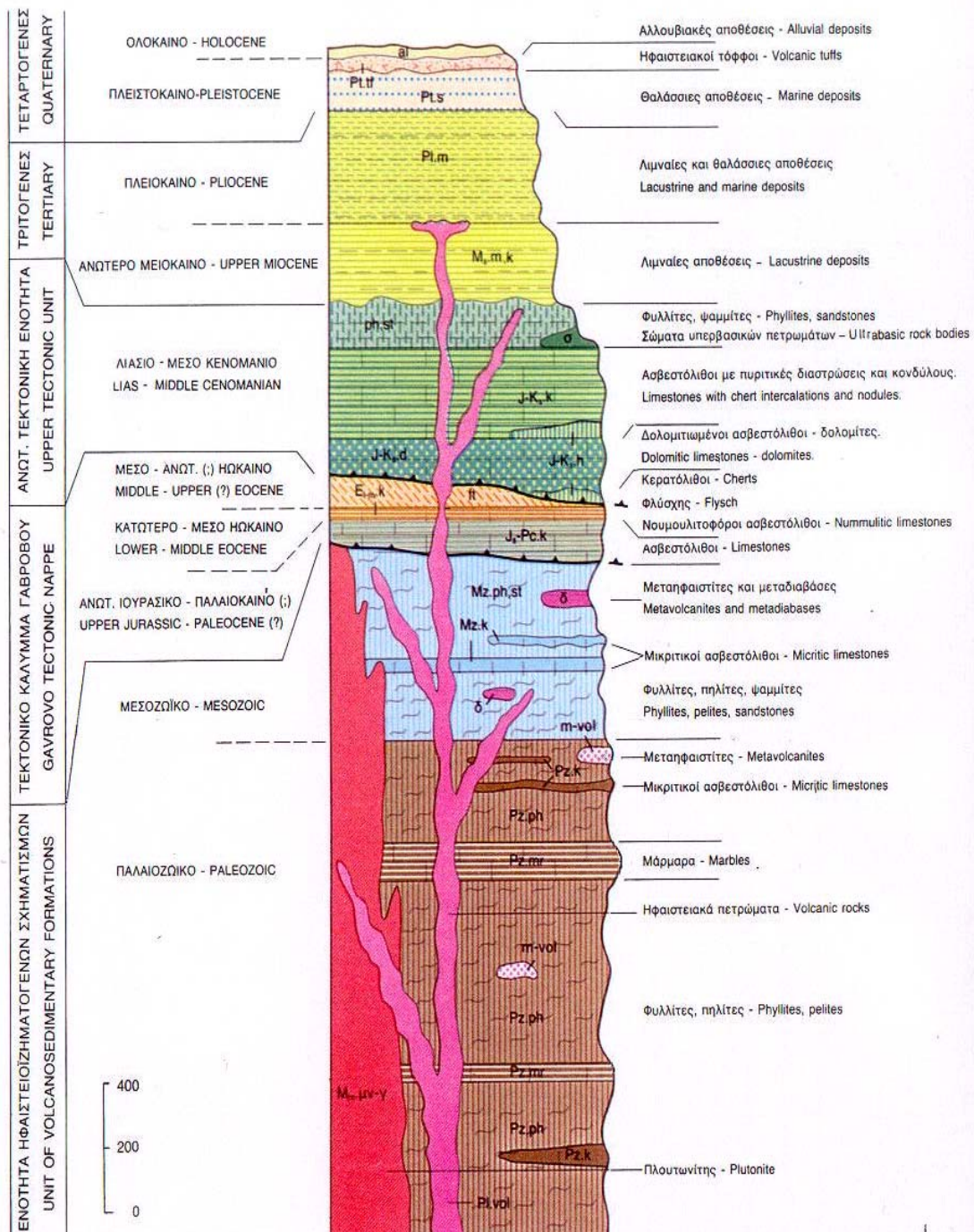
Εικόνα 3.2: Γεωτεχνικό σκίτσο του γεωλογικού χάρτη της Κω (Lagios and Papanikolaou, 1998).

Η ολική τεκτονική γεωμετρία κατά μήκος της λεκάνης της Αντιμάχιας δείχνει ένα εδαφικό σχηματισμό με κλίση Δ.ΝΔ. όπου εμφανίζεται η ηφαιστειακή ακολουθία του ανώτερου σε πολύ χαμηλά ύψη σε αντίθεση με το ανατολικό όριο όπου εμφανίζεται στα 200-300 m. Τελικά, έχει εμφανιστεί μία ρηξιγενής προεξοχή του νεοτεκτονικού τετραγώνου της λεκάνης της Αντιμάχιας Β.ΒΔ και στο Πλείο-τεταρτογενές και στο Ολόκαινο όπως φαίνεται από τα πρόσφατα ηφαιστειακά που έχουν μία σταθερή κλίση προς τη βόρεια ακτή και βυθίζονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ στη νότια ακτή τα ηφαιστειακά αυτά παρατηρούνται σε μεγαλύτερα ύψη (περίπου 100-150 m).



**Εικόνα3.3: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής κλίμακας 1:50.000.**

### 3 Γεωλογικά Στοιχεία



Εικόνα 3.4: Σύνθετη στρωματογραφική στήλη Ανατολικής Κω (Ι.Γ.Μ.Ε.)



### 3.2 Μορφολογία της Περιοχής

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στην Ανατολική Κω επί της οδού που συνδέει την περιοχή Αγίου Φωκά με την περιοχή Θέρμες.



Εικόνα 3.5: Αστοχία στο οδόστρωμα λόγω κατολίσθησης.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως λοφώδης με έντονο ανάγλυφο και υψομετρικά δεν ξεπερνά τα 150 m.

Τα πρανή είναι ομοιόμορφα και εμφανίζουν λίγες μορφολογικές αναβαθμίδες. Πάνω από το επίπεδο του δρόμου εμφανίζουν κλίσεις που κυμαίνονται από 6:1 έως 1:1 (οριζ:κατ), οι οποίες διακόπτονται μόνο σε θέσεις βραχωδών εξάρσεων, όπου τα πρανή είναι κατακόρυφα.

Χαμηλότερα από το επίπεδο του δρόμου οι κλίσεις αυξάνουν και κυμαίνονται από 2:1 έως 4:1 (οριζ:κατ). Στις θέσεις των ρεμάτων και κοντά στη θάλασσα τα πρανή είναι σχεδόν κατακόρυφα λόγω διάβρωσης.

### 3 Γεωλογικά Στοιχεία

Η περιοχή εμφανίζει αραιή κάλυψη με θάμνους και οι δύο δρόμοι, ο κεντρικός ασφάλτινος και ο παλαιός ιταλικός χωμάτινος, βρίσκονται αντίστοιχα σε υψόμετρα 70 και 86 m.



Εικόνα 3.6: Εμφάνιση πλευρικής διάρρηξης στο δυτικό όριο της κύριας κατολίσθησης.

### 3.3 Γεωλογικοί Σχηματισμοί

#### 1) Υλικά Επιχώσεων

Μη συνεκτικός σχηματισμός που αποτελείται από υλικά που προήλθαν από τη διάνοιξη του δρόμου, κεραμικά, απορρίμματα και κατά θέσεις φυσικό εδαφικό υλικό. Το πάχος δεν ξεπερνά τα 4 m.

#### 2) Ασύνδετες αμμοχαλικώδεις αποθέσεις

Αλλουβιακές και ελλουβιακές αποθέσεις που έχουν προέλθει από έντονη επιφανειακή διάβρωση. Αποτελούνται από χάλικες και λίθους ποικίλης σύστασης (ιλυολιθικοί, φυλλιτικοί, ψαμμιτικοί) χωρίς συνοχή. Το πάχος δεν ξεπερνά το 1 m (Εικόνα 3.6).



### 3 Γεωλογικά Στοιχεία

#### 3) Ποταμοχειμάρριες αποθέσεις

Εμφανίζονται στις κοίτες και αποτελούνται από χάλικες, λίθους και ογκολίθους ποικίλης σύστασης (ιλυολιθικοί, φυλλιτικοί, ψαμμιτικοί και ασβεστολιθικοί).

#### 4) Πλευρικά κορήματα

Ασβεστολιθικά και κερατολιθικά κορήματα με αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό, με λίθους και ογκολίθους κατά θέσεις.



Εικόνα 3.6: Εμφάνιση χαλαρών αμμοχαλικώδων αποθέσεων.

#### 5) Αλλουβιακές αποθέσεις με συνοχή

Αποθέσεις αποτελούμενες από αμμώδη άργιλο στιφρή με χαλίκια ασβεστολιθικά, κερατολιθικά, σκοτεινού καστανού χρώματος. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 2 m.

#### 6) Ολισθόλιθοι

Τεμάχη λευκότεφρου ασβεστολίθου με ενστρώσεις κερατολίθου. Πρόκειται για υπολειμματικό σχηματισμό που εμφανίζεται υπό μορφή ογκολίθων ή κατακερματισμένων και εξαλλοιωμένων ζωνών. Έχει προέλθει από ολίσθηση τεμαχών από υψηλότερες υψομετρικά θέσεις, όπου επικρατεί σχηματισμός πλακωδών ασβεστολίθων με κερατολιθικές ενστρώσεις. Είναι διάσπαρτοι στην περιοχή μελέτης

και εμφανίζονται μέχρι και μέσα στη θάλασσα.

7) Ασβεστόλιθοι

- Πλακώδης ασβεστόλιθος με κερατόλιθους

Ασβεστόλιθος λευκότεφρος ως τεφρός με ενστρώσεις ή και φακούς κερατολίθου καστανού ως καστανέρυθρου χρώματος. Ο ασβεστόλιθος εμφανίζεται πλακώδης σε στρώσεις πάχους 10-50 cm, ενώ οι κερατόλιθοι σε στρώσεις που δεν ξεπερνούν σε πάχος τα 20 cm. Εμφανίζονται πτυχωμένοι κατά θέσεις και η αντοχή τους χαρακτηρίζεται υψηλή.

- Μικριτικός ασβεστόλιθος

Ασβεστόλιθος άστρωτος, μικριτικός, μικροκρυσταλλικός, με χαλαζιακές φλέβες, τεφρού-τεφροπράσινου ως τεφροκύανου χρώματος. Είναι συμπαγής και χαρακτηρίζεται ως πολύ υψηλής αντοχής, κατά θέσεις εμφανίζεται κατακερματισμένος.

8) Κροκαλολατυποπαγές

Συνεκτικό τεκτονικό κροκαλολατυποπαγές, με κροκάλες και λατύπες ποικίλης σύστασης (περιδοιτικές, διοριτικές, ασβεστιτικές), υποπράσινου χρώματος. Εμφανίζεται στη βάση του μικριτικού ασβεστολίθου και το ορατό του πάχος δεν ξεπερνά τα 40-50 cm.

9) Ηφαιστειοϊζηματογενής ακολουθία

Πρόκειται για ανεστραμμένη σειρά ηφαιστειοϊζηματογενών σχηματισμών, στη περιοχή μελέτης μας εμφανίζεται το Μεσοζωικό της κομμάτι που αποτελείται από τα ακόλουθα μέλη:

- Εξαλλοιωμένη ενότητα

Εξαλλοιωμένοι φυλλίτες και ψαμμίτες υπό τη μορφή αργιλώδους άμμου με χαλίκια έως αργιλώδους αμμοχάλικου με χαλίκια ποικίλης σύστασης (ψαμμιτικά, φυλλιτικά), καστανότεφρου χρώματος.

- Ενότητα μεταηφαιστιτών

Διαβάσης έως Δολερίτης, μικρής έως μέσης αποσάθρωσης, ισχυρά μεταμορφωμένος, τεφροπράσινος-καστανέρυθρος.

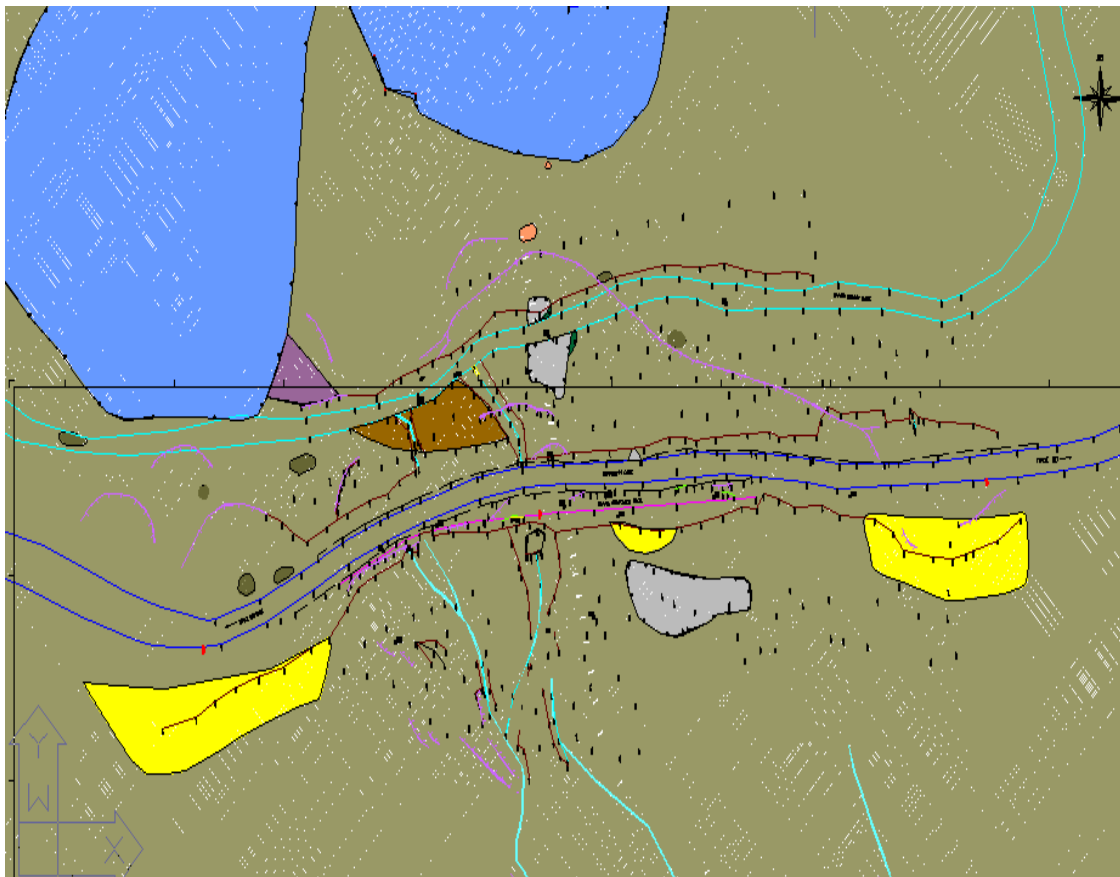
- Ενότητα φυλλιτών

Φυλλίτης έως Σχιστόλιθος κατά θέσεις, με χαλαζιακές και ασβεστιτικές φλέβες πάχους 0,3-0,4 cm, φυλλώδης έως πλακώδης με πάχη στρώσεων από 1-15 cm. Η αποσάθρωσή του κυμαίνεται από μικρή έως μέτρια ενώ από πλευράς κερματισμού χαρακτηρίζεται λίγο κερματισμένος έως κατακερματισμένος. Εμφανίζει αποχωρισμό πλακώδη έως φυλλώδη παράλληλα με τις στρώσεις. Είναι οξειδωμένος στις εξωτερικές επιφάνειες. Το χρώμα του ποικίλει από καστανότεφρο-μελανότεφρο έως τεφροκύανο-τεφροπράσινο.

- Ενότητα ψαμμιτών

Ψαμμίτης υψηλής αντοχής και μικρής αποσάθρωσης, κατά θέσεις κερματισμένος, με φλέβες χαλαζία, τεφρός-τεφροπράσινος έως καστανότεφρος (Κανάρης, 2006).

Στην Εικόνα 3.7 παρατίθεται ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 3.7: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής 1:1000 (Γεωσύμβουλοι ΕΠΕ).





Εικόνα 3.8: Υπόμνημα Γεωλογικού χάρτη Εικόνας 3.7(Γεωσύμβουλοι ΕΠΕ).

### 3.4 Τεκτονικά Στοιχεία της Περιοχής

Οι κύριες τεκτονικές μορφές που απαντώνται είναι οι παρακάτω:

- 1) Οι τεκτονικές επαφές (επωθήσεις) των σχηματισμών Γαβρόβου - Τρίπολης και Πίνδου πάνω στην ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία.
- 2) Το μεγάλο κανονικό ρήγμα διεύθυνσης BA-NΔ, κατά μήκος των νοτίων ακτών της Κω, που συνεχίζεται στο χώρο της Μικράς Ασίας, ελαφρά καμπτόμενο με διεύθυνση A.BA-N.NΔ. Το νότιο τμήμα του ρήγματος βυθίζεται διαμορφώνοντας το θαλάσσιο χώρο μεταξύ των νήσων Κω και Νισύρου.
- 3) Το κατακόρυφο ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ, που φέρνει σε επαφή το Παλαιοζωικό και το Μεσοζωικό κομμάτι της στρωματογραφικής στήλης της ηφαιστειοϊζηματογενούς ακολουθίας (Κανάρης, 2006).

### 3.5 Κλιματολογικά Στοιχεία της Περιοχής

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 754 mm, ενώ το μέσο ύψος βροχής ανά ημέρα είναι 139 mm με μέση ετήσια διανομή ημερών βροχής τις 80 ημέρες. Η αντίστοιχη τιμή για ημέρες καταιγίδας είναι 25 και για ημέρες χιονιού 0,1.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,7°C, με μέση ελάχιστη τους -5,0°C και μέση μέγιστη τους 37,8°C.

Με βάση τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από τον τύπο του Turc, διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του ετήσιου ύψους βροχής, σε ποσοστό 74%, εξατμίζεται και διαπνέεται. Το υπόλοιπο ποσοστό απορρέει στο μεγαλύτερο μέρος του επιφανειακά και κατεισδύει λίγο.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ημίξηρο (Κανάρης, 2006).

### 3.6 Υδρογεωλογικά Στοιχεία της Περιοχής

Ανάλογα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους και την έκταση που καταλαμβάνουν, οι διάφοροι λιθολογικοί σχηματισμοί μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

### 3 Γεωλογικά Στοιχεία

- ο Υδροπερατοί. Είναι τα ασβεστολιθικά καλύμματα, οι χαλαρές αμμώδεις και χειμάρριες αποθέσεις.
- ο Ημιπερατοί έως περατοί σχηματισμοί. Σε αυτούς ανήκουν οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή.
- ο Ημιπερατοί. Είναι τα πλευρικά κορήματα, τα εξαλλοιωμένα μέλη της ηφαιστειοϊζηματογενούς ακολουθίας και οι ολισθόλιθοι λόγω της πεπερασμένης έκτασης που καταλαμβάνουν.
- ο Αδιαπέρατοι. Σε αυτούς ανήκουν οι φυλλίτες και οι αργιλικής σύστασης αλλουβιακές αποθέσεις (Κανάρης, 2006).

## 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

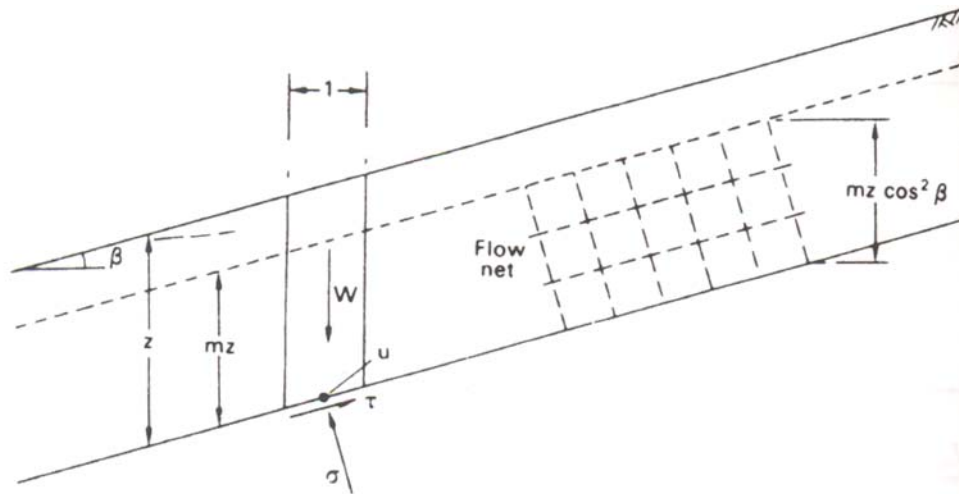
Η κατασκευή μιας σειράς τεχνικών έργων όπως η όρυξη σηράγγων και διαμόρφωση πρανών προκαλεί σημαντικές αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για την ερμηνεία των φαινομένων που εμφανίζονται κατά την κατασκευή των έργων αυτών, απαιτείται ο υπολογισμός των δυνάμεων, τάσεων, μετατοπίσεων καθώς και των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Αρχικά και σε απλής γεωμετρίας προβλήματα χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι αναλυτικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τα σύνθετα αυτά φαινόμενα. Οι πρώτες τεχνικές πρόβλεψης και μελέτης των εντατικών καταστάσεων εφάρμοσαν μεθόδους οριακής ισορροπίας, οι οποίες θεωρούνται προσεγγιστικές μέθοδοι και οι οποίες εξετάζουν τη συμπεριφορά διακριτών τεμαχίων με βάση την ισορροπία τάσεων ή δυνάμεων. Κύριο μειονέκτημα των μεθόδων αυτών θεωρείται το γεγονός ότι παρόλο που χρησιμοποιούν συνθήκες ισορροπίας δυνάμεων, δε λαμβάνουν υπόψη τις παραμορφώσεις των υλικών λόγω των δυνάμεων αυτών (Αγιουτάντης, 2002).

### 4.1 Ανάλυση Ολίσθησης σε Επίπεδη Επιφάνεια.

Θεωρείται ότι η υποθετική επιφάνεια αστοχίας είναι παράλληλη προς την επιφάνεια του πρανούς και ότι το βάθος της κατολίσθησης είναι μικρό σε σχέση με το μήκος του πρανούς. Τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρανές έχει άπειρο μήκος.

Η κλίση του πρανούς ως προς την οριζόντια ισούται με  $\beta$  και το βάθος της επιφάνειας αστοχίας ισούται με  $z$ . Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται ότι είναι παράλληλος με το πρανές και ότι βρίσκεται σε ύψος  $mz$  (όπου  $0 < m < 1$ ) πάνω από την επιφάνεια αστοχίας. Επίσης θεωρείται ότι υπάρχει σταθερή ροή παράλληλα με το πρανές. Οι δυνάμεις στα πλάγια κάθε τομής είναι ίσες και αντίθετες, και οι τασικές συνθήκες είναι οι ίδιες σε κάθε σημείο της επιφάνειας αστοχίας.



Εικόνα 4.1 Πρανές απείρου μήκους (Craig, 2004).

Η διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας εκφραζόμενη με ενεργές παραμέτρους (συνοχή  $c$  και γωνία εσωτ. τριβής  $\phi$ ) είναι:

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi' \quad (4.1)$$

όπου:

$\sigma$ : ολική τάση,

$u$ :πίεση πόρων.

Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (4.2)$$

Όπου  $\tau_f$  η διατμητική αντοχή του πετρώματος και  $\tau$  η διατμητική τάση που εφαρμόζεται σε αυτό.

Η κάθετη τάση  $\sigma$ , η διατμητική  $\tau$  και η πίεση πόρων  $u$  ισούνται με:

$$\begin{aligned} \sigma &= \{(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}\}z \cos^2 \beta \\ \tau &= \{(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}\}z \sin \beta \cos \beta \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$u = mz\gamma_w \cos^2 \beta$$

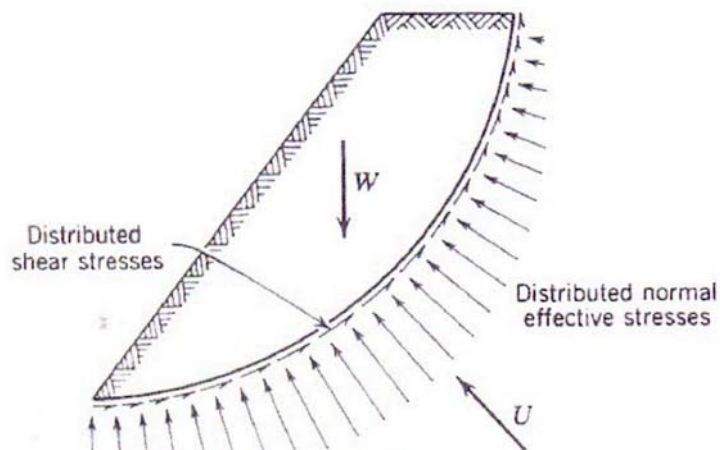
Η ερμηνεία των συμβολισμών φαίνεται στην Εικόνα 4.1.

## 4.2 Ολίσθηση σε Κυκλικές Επιφάνειες

### 4.2.1 Ανάλυση Ελευθέρου Σώματος.

Το σώμα του πρανούς το οποίο ολισθαίνει πάνω σε μία επιφάνεια αστοχίας υποκινείται από τις εξής δυνάμεις.

- Το βάρος της μάζας του ελευθέρου σώματος.
- Την πίεση του νερού των πόρων που κατανέμεται στη μάζα του σώματος.
- Την ενεργή τάση που ασκείται στην υποτιθέμενη επιφάνεια αστοχίας.
- Την διατμητική τάση που ασκείται κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας.



Εικόνα 4.2: Δυνάμεις που δρουν στο ελεύθερο σώμα (Lambe and Whitman, 1979).

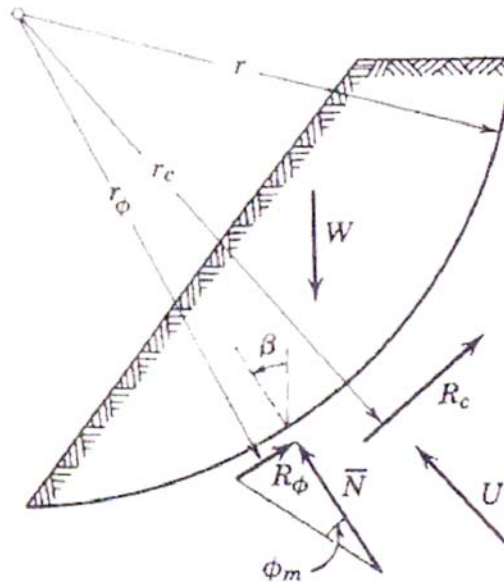
Για ένα ομογενές εδαφικό σώμα το βάρος ισούται με την επιφάνεια επί το μοναδιαίο βάρος.

Ο συντελεστής ασφάλειας  $F$  ορίζεται ως η διατμητική αντοχή, προς τη διατμητική τάση που εφαρμόζεται.

Οι τρεις συνισταμένες δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια αστοχίας είναι (Εικόνα 4.3):

1. Η συνισταμένη της διατμητικής αντοχής  $R_c$ .
2. Η συνισταμένη της κάθετης τάσης  $\bar{N}$ .
3. Η συνισταμένη των τριβών  $R_\phi$ .

Το πρόβλημα έχει συνολικά τέσσερις άγνωστες ποσότητες: α) την κάθετη τάση  $\bar{N}$  β) τη γωνία  $\beta$  που καθορίζει τη διεύθυνση της  $\bar{N}$  γ) το συντελεστή ασφάλειας  $F$  και δ) την  $r_\phi$  μία διάσταση που περιγράφει τη γραμμή δράσης της  $R_\phi$ . Το πρόβλημα αυτό έχει τέσσερις αγνώστους και τρεις εξισώσεις που μας δίνει η ισορροπία άρα είναι στατικώς απροσδιόριστο, δηλαδή οι εξισώσεις ισορροπίας δεν επαρκούν για την επίλυσή του. (Lambe and Whitman, 1979).



Εικόνα 4.3: Συνισταμένες των δυνάμεων στην επιφάνεια αστοχίας (Lambe and Whitman, 1979).

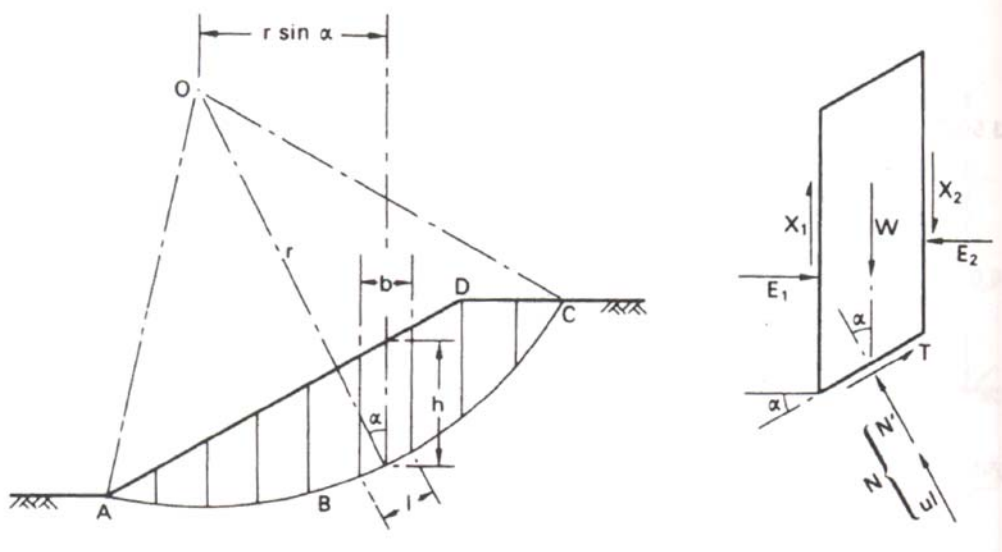
#### 4.2.2 Μέθοδος των Λωρίδων (τομών)

Σε αυτή τη μέθοδο η επιφάνεια αστοχίας θεωρείται κυκλική σε τομή με κέντρο  $O$  και ακτίνα  $r$ . Η εδαφική μάζα (ABCD), πάνω από μία υποθετική επιφάνεια αστοχίας (AC), διαιρείται από κάθετα επίπεδα σε μία σειρά τομών πλάτους  $b$  (Εικόνα 4.2).

Η βάση κάθε τομής θεωρείται ότι είναι ευθεία. Η γωνία της ευθείας με την οριζόντιο για κάθε τομή είναι  $\alpha$  και το ύψος το οποίο αντιστοιχεί στην κεντρική γραμμή της τομής

είναι  $h$ . Η ανάλυση βασίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας, ο οποίος υπολογίζεται ως ο λόγος ροπών των δυνάμεων της διατμητικής αντοχής προς τη ροπή των δυνάμεων που τείνουν να προκαλέσουν αστοχία.. Γενικά ο συντελεστής ασφάλειας ορίζεται ως ο λόγος της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής ( $\tau_f$ ), προς τη διατμητική αντοχή που απαιτείται για τη διατήρηση συνθηκών οριακής ισορροπίας.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (4.5)$$



Εικόνα 4.4 Η μέθοδος των τομών (Craig, 2004).

Ο συντελεστής ασφάλειας θεωρείται ότι είναι ο ίδιος για κάθε τομή, εφόσον υπάρχει αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ των τομών, δηλαδή δρουν δυνάμεις μεταξύ των τομών. Οι δυνάμεις που δρουν είναι οι εξής (Εικόνα 4.4):

- Το βάρος της τομής  $W = \gamma b h$  ( $\gamma_{sat}$  όπου χρειάζεται).
- Την ολική κάθετη δύναμη  $N$  στη βάση. Η δύναμη αυτή έχει δύο συνιστώσες, την ενεργή τάση  $N'$  ( $\sigma l = \text{τάση} * \text{επιφάνεια}$ ), και την συνοριακή πίεση των πόρων  $U$  ( $ul$ ) στη βάση.
- Τη διατμητική δύναμη  $T$  ( $\tau_m l$ ) στη βάση.
- Τις κάθετες δυνάμεις στις πλευρές,  $E_1$  και  $E_2$ .
- Τις διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές  $X_1$  και  $X_2$ .



Κάθε άλλη εξωτερική δύναμη θα πρέπει να συμπεριληφθεί επίσης στην ανάλυση δυνάμεων.

Το πρόβλημα είναι στατικά απροσδιόριστο και θα πρέπει να γίνουν παραδοχές για τις δυνάμεις ανάμεσα στις τομές E και X. Γενικότερα το αποτέλεσμα του συντελεστή ασφάλειας δεν είναι ακριβές. Παίρνοντας τις ροπές ως προς το O, γίνεται η παραδοχή ότι το άθροισμα των ροπών των διατμητικών δυνάμεων T στο τόξο αστοχίας AC πρέπει να είναι ίσο με τη ροπή του βάρους της εδαφικής μάζας ABCD.

$$\Sigma Tr = \Sigma W r \sin \alpha \quad (4.6)$$

$$T = \tau_m l = \frac{\tau_f}{F} l \text{ άρα}$$

$$F = \frac{\Sigma \tau_f l}{\Sigma W \sin \alpha}$$

Εάν γίνει ανάλυση με ενεργές τάσεις προκύπτει:

$$F = \frac{\Sigma (c' + \sigma' \tan \phi') l}{\Sigma W \sin \alpha} \quad \text{ή}$$

$$F = \frac{c' L_\alpha + \tan \phi' \Sigma N'}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (4.7)$$

Όπου  $L_\alpha$  είναι το μήκος τόξου AC. Οι εξισώσεις 4.7 είναι ικανοποιητικά ακριβής, αλλά έχουν γίνει κάποιες προσεγγίσεις στον υπολογισμό των ενεργών τάσεων  $N'$ . Για δεδομένη επιφάνεια αστοχίας η τιμή του συντελεστή ασφάλειας  $F$ , θα εξαρτηθεί από τον τρόπο με τον οποίο οι δυνάμεις αυτές θα υπολογιστούν. Ωστόσο η κρίσιμη διατμητική αντοχή που υπολογίζεται από αυτή τη μέθοδο είναι γενικά αποδεκτή (Craig, 2004). Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των  $N'$  περιγράφονται στη συνέχεια.

#### Μέθοδος του Fellenius ή Σουηδική

Σε αυτή την επίλυση γίνεται η παραδοχή για κάθε τομή ότι η συνιστώσα των δυνάμεων μεταξύ των τομών είναι μηδέν. Η λύση προκύπτει με ισορροπία των δυνάμεων που δρουν κάθετα στη βάση κάθε τομής.

$$N' = W \cos \alpha - ul \quad (4.8)$$

Οπότε με βάση τις ενεργές τάσεις ο συντελεστής ασφάλειας ισούται με:

$$F = \frac{c' L \alpha + \tan \phi' \Sigma (W \cos \alpha - ul)}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (4.9)$$

Οι συνιστώσες  $W \cos \alpha$  και  $W \sin \alpha$  μπορούν να προσδιοριστούν γραφικά για κάθε τομή.

Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του  $\alpha$ . Και σε αυτή την ανάλυση επιλέγεται μια σειρά πιθανών επιφανειών αστοχίας για να βρεθεί ο μικρότερος συντελεστής ασφάλειας. Σε αυτή την επίλυση ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίζεται είναι μικρότερος του πραγματικού. Το σφάλμα σε σύγκριση με άλλες πιο ακριβείς μεθόδους ανάλυσης κυμαίνεται από 5-20%.

Αν η ανάλυση γίνεται με βάση τις ολικές τάσεις ( $\phi_u = 0$ ) τότε  $u = 0$  και η 4.9 γίνεται:

$$F = \frac{c_u L_\alpha}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (4.10)$$

Γενικότερα η χρήση της μεθόδου αυτής δε συνιστάται στην πράξη (Craig, 2004).

#### Η Μέθοδος του Bishop

Κατά την επίλυση αυτή θεωρείται ότι οι συνισταμένες δυνάμεις που δρουν στα πλαϊνά των τομών είναι οριζόντιες, δηλαδή ισχύει:

$$X_1 - X_2 = 0 \quad (4.11)$$

Η ισορροπία των δυνάμεων δίνει τη διατμητική δύναμη στη βάση του πρανούς.

$$T = \frac{1}{F} (c'l + N' \tan \phi') \quad (4.12)$$

Αναλύοντας τις κάθετες δυνάμεις προκύπτει:

$$W = N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + \frac{c'l}{F} \sin \alpha + \frac{N'}{F} \tan \phi' \sin \alpha \quad (4.13)$$

$$N' = \frac{[W - (c'l / F) \sin \alpha - ul \cos \alpha]}{[\cos \alpha + (\tan \phi' \sin \alpha) / F]} \quad (4.14)$$

Το  $l$  μπορεί να αντικατασταθεί από  $b \sec \alpha$ .

Από τη σχέση 4.7 με κάποιες αλλαγές προκύπτει:

$$F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \Sigma [ \{c'b + (W - ub) \tan \phi'\} \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi' / F)} ] \quad (4.15)$$

Μπορεί στην σχέση 4.15 να εισαχθεί η πίεση πόρων η οποία ισούται με:

$$r_u = \frac{u}{W/b} \quad (4.16)$$

Και η σχέση 4.15 μπορεί να γραφεί:

$$F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \Sigma [ \{c'b + W(1 - r_u) \tan \phi'\} \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi' / F)} ] \quad (4.17)$$

Τα σύμβολα ερμηνεύονται στην Εικόνα 4.4.

Ο συντελεστής ασφάλειας εμφανίζεται και στα δύο μέρη της εξίσωσης. Για το λόγο αυτό απαιτείται μια σειρά διαδοχικών επαναλήψεων. Ωστόσο η σύγκλιση επιτυγχάνεται

γρήγορα. Λόγω των επαναλήψεων που χρειάζονται για την επίλυση και την ανάγκη να επιλεγθεί ο κατάλληλος αριθμός επιφανειών αστοχίας, η μέθοδος των τομών είναι κατάλληλη για πραγματοποίηση επιλύσεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίζεται με αυτή τη μέθοδο αυτή είναι και πάλι μικρότερος από τον πραγματικό. Το σφάλμα είναι απίθανο να ξεπεράσει το 7% και στις περισσότερες περιπτώσεις ισούται με 2% (Craig, 2004).

#### Janbu

Η μέθοδος Janbu είναι ανάλογη προς τη μέθοδο του Bishop. Η σχέση 4.18 είναι η βασική εξίσωση της μεθόδου του Janbu, η οποία προκύπτει ουσιαστικά από την κύρια συνθήκη ισορροπίας δυνάμεων.

$$FS = \frac{\sum \{c'b + (W + Q - ub)\} \left\{ \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}} \right\}}{\sum [(W + Q) \sin \alpha]} \quad (4.18)$$

### 4.3 Ολίσθηση σε Μη Κυκλικές Επιφάνειες

#### Morgenstern and Price

Οι Morgenstern & Price ανέπτυξαν μία γενική μέθοδο ανάλυσης με την οποία όλες οι συνοριακές συνθήκες και οι συνθήκες ισορροπίας εξασφαλίζονται ανεξαρτήτου σχήματος της επιφάνειας αστοχίας (κυκλικό, μη κυκλικό, ή και σύνθετο). Η επιφάνεια του εδάφους εκφράζεται με την εξίσωση  $y = y(x)$ .

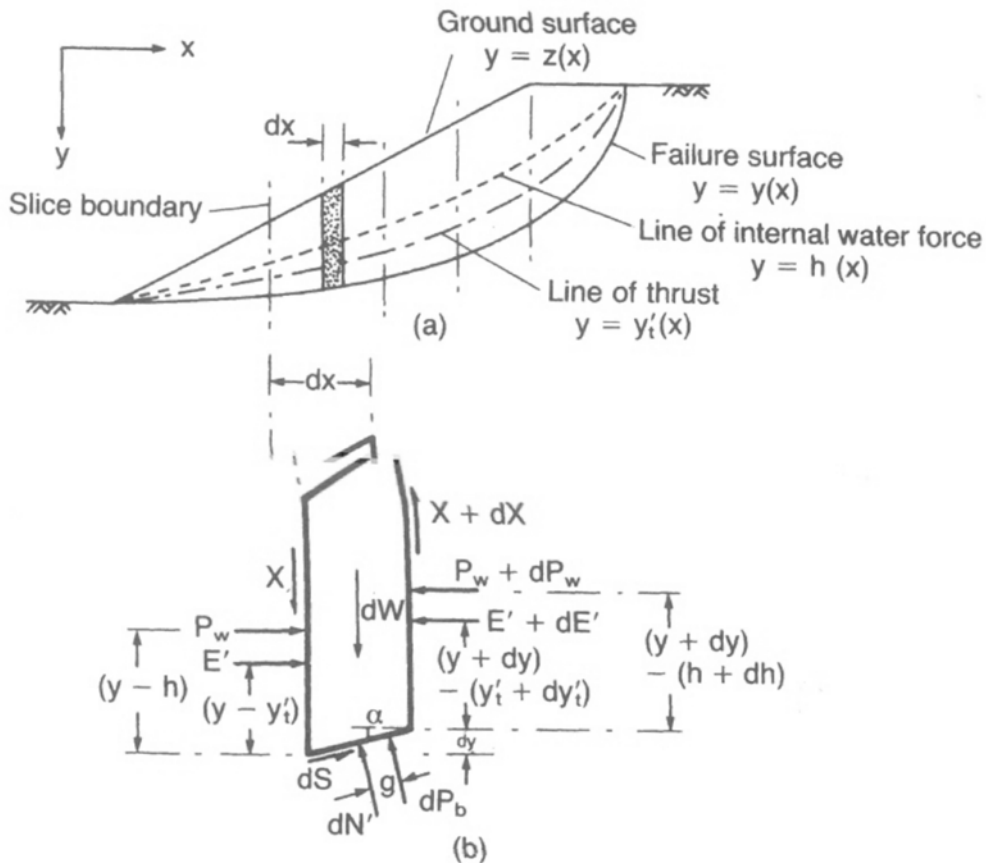
Οι δυνάμεις που φαίνονται στην Εικόνα 4.5 είναι οι εξής:

- $E'$ : ενεργή τάση, κάθετη σε μια πλευρά της τομής
- $X$ : διατμητική δύναμη σε μια πλευρά
- $P_w$ : συνοριακή δύναμη του νερού σε μία πλευρά της τομής
- $dN'$ : ενεργή τάση κάθετη στη βάση της τομής

$dS$ : διατμητική δύναμη στη βάση της τομής

$dP_b$  = συννοριακή δύναμη του νερού στη βάση

$dW$  = ολικό βάρος της τομής



Εικόνα 4.5: Η μέθοδος των Morgenstern & Price (Craig, 2004).

Η γραμμή της ώθησης των ενεργών δυνάμεων ( $E'$ ) εκφράζεται από τη συνάρτηση  $y = y_t'(x)$  και αυτή των εσωτερικών δυνάμεων ( $P_w$ ) από την εξίσωση  $y = h(x)$ . Εάν εξισωθούν οι ροπές ως προς το μέσο της βάσης και ληφθεί η ισορροπία δυνάμεων σε κάθετη και οριζόντια διεύθυνση, προκύπτουν δύο διαφορικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις απλοποιούνται αν εκφραστούν με βάση την ολική κάθετη τάση  $E$ , όπου

$$E = E' + P_w \quad (4.19)$$

Το πρόβλημα μετατρέπεται σε στατικώς προσδιορίσιμο, εισάγοντας μια σχέση μεταξύ των δυνάμεων  $E$  και  $X$ , της μορφής

$$X = \lambda f(x)E \quad (4.20)$$

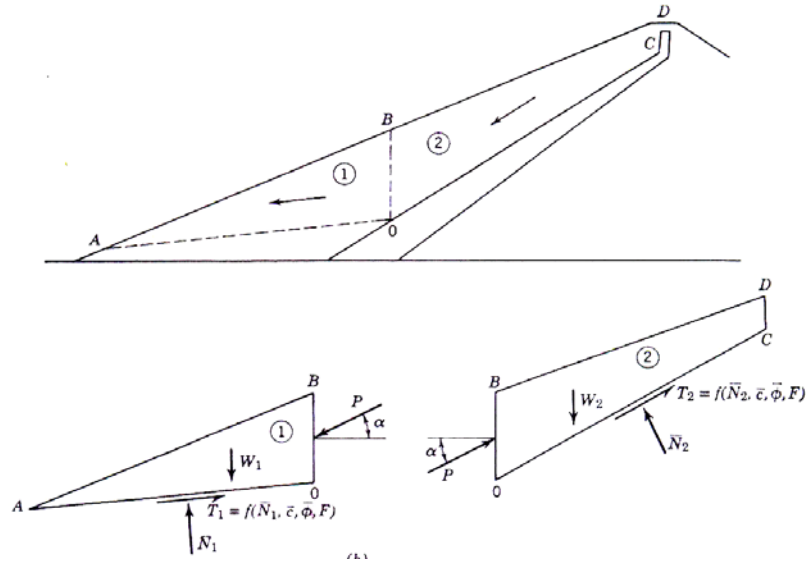
Όπου  $f(x)$  είναι μια συνάρτηση, ειδικά επιλεγμένη ώστε να προσδιορίζει την εναλλαγή του λόγου  $\frac{X}{E}$  μέσα στη μάζα που αστοχεί και  $\lambda$  είναι ένας συντελεστής. Η τιμή του συντελεστή λαμβάνεται ως μέρος της επίλυσης μαζί με το συντελεστή ασφάλειας. Για την επίλυση η μάζα που αστοχεί διαιρείται σε τομές πεπερασμένου πλάτους, έτσι ώστε η επιφάνεια αστοχίας κάθε τομής να μπορεί να θεωρηθεί ως ευθεία γραμμή. Με τη μέθοδο αυτή επιλέγονται πιθανές τιμές του συντελεστή  $\lambda$  και του συντελεστή ασφάλειας  $F$ , θέτοντας την  $E$  μηδέν στην αρχή της επιφάνειας αστοχίας και ολοκληρώνοντας σε κάθε τομή προκύπτουν οι τιμές των  $E$ ,  $X$  και  $Y_i$ . Σε κάθε τομή επιλύεται μία εξίσωση ισορροπίας ροπών και μια ισορροπίας δυνάμεων. Με μια τεχνική διαδοχικών επαναλήψεων, βασισμένη στη μέθοδο Newton -Raphson προσδιορίζονται οι τιμές των  $\lambda$  και  $F$  μέχρι οι τιμές των συνισταμένων των ροπών και των δυνάμεων να μηδενιστούν στο τέλος της επιφάνειας αστοχίας. Η  $f(x)$  δεν επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή ασφάλειας και συνήθως λαμβάνει την τιμή ένα (Craig 2004).

#### Μέθοδος της Σφήνας

Σε πολλές περιπτώσεις η πιθανή επιφάνεια αστοχίας μπορεί να προσεγγιστεί από δύο ή τρεις ευθείες γραμμές. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η μάζα που ολισθαίνει βρίσκεται πάνω σε ένα σχηματισμό με πολύ καλές ιδιότητες. Και σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των τομών όμως με τη μέθοδο της σφήνας προκύπτει μία ικανοποιητική εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας.

Στη μέθοδο αυτή η μάζα που πρόκειται να ολισθήσει χωρίζεται σε δύο ή τρεις σφήνες. Οι άγνωστες ποσότητες που υπάρχουν είναι οι ακόλουθες πέντε: α) οι κάθετες τάσεις,  $N_1$ ,  $N_2$ , β) η πίεση των πόρων  $P$ , γ) ο συντελεστής ασφάλειας  $F$  και δ) η γωνία  $\alpha$ . Προκύπτουν τέσσερις εξισώσεις ισορροπίας οπότε το πρόβλημα είναι στατικώς

απροσδιόριστο. Για το λόγο αυτό γίνεται υπόθεση της τιμής της γωνίας  $\alpha$  και στη συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας (Lambe and Whitman, 1979).



Εικόνα 4.4.6: Μέθοδος της σφήνας (Lambe and Whitman, 1979).

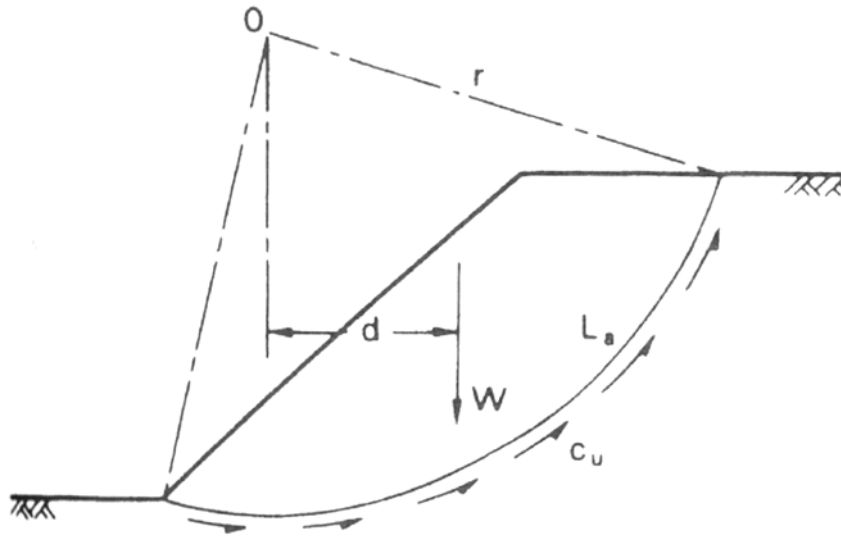
#### 4.4 Ανάλυση της Περίπτωσης $\phi_u = 0$ .

Αυτή η ανάλυση γίνεται με βάση την ολική τάση και χρησιμοποιείται για την περίπτωση κορεσμένης αργίλου κάτω από αστράγγιστες συνθήκες. Σε αυτή την ανάλυση θεωρείται μόνο ότι υπάρχει ισορροπία ροπών. Σε τομή η πιθανή επιφάνεια αστοχίας είναι κυκλική.

Η πιθανή αστοχία οφείλεται στο βάρος  $W$  της εδαφικής μάζας πάνω από την επιφάνεια αστοχίας. Η διατμητική αντοχή για την διατήρηση της ισορροπίας είναι:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c_u}{F} \quad (4.21)$$

Όπου  $F$  είναι ο συντελεστής ασφάλειας.



**Εικόνα 4.7: Ανάλυση με γωνία τριβής 0 (Craig, 2004).**

Θεωρώντας ισορροπία ροπών ως προς το Ο προκύπτει (Εικόνα 4.7):

$$Wd = \frac{c_u}{F} L_a r$$

Οπότε

$$F = \frac{c_u L_a r}{Wd} \quad (4.22)$$

Είναι απαραίτητο να γίνει ανάλυση για έναν αριθμό από πιθανές επιφάνειες αστοχίας, ώστε να προσδιοριστεί ο μικρότερος συντελεστής ασφάλειας (Craig 2004).



## 5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι διαδικασίες επίλυσης των γεωμηχανικών προβλημάτων περιλαμβάνουν τις εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους.

Οι εμπειρικές λύσεις προϋποθέτουν την ύπαρξη μιας ικανής βάσεως εμπειρικών δεδομένων σχετικών με το πρόβλημα. Οι λύσεις αυτές, που βασίζονται κυρίως σε προυπάρχουσες συσχετίσεις παρατηρηθέντων αιτίων και αποτελεσμάτων, αποτελούν συνήθως μία ευρεία αντιμετώπιση του προβλήματος της μελέτης της συμπεριφοράς ενός γεωυλικού.

Οι αναλυτικές επιλύσεις των προβλημάτων προϋποθέτουν την ύπαρξη αναλυτικής λύσης των διαφορικών ή των απλών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα (καταστατικές εξισώσεις), για τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες.

Με τον όρο αριθμητική ή υπολογιστική μέθοδος νοείται η αριθμητική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα, για τις ίδιες συνοριακές συνθήκες. Οποιαδήποτε διαδικασία κι αν ακολουθηθεί, καταλήγει συνήθως στην επίλυση γραμμικού συστήματος εξισώσεων, των οποίων το πλήθος εξαρτάται από τη διαίρεση του αρχικού πεδίου και από τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας κατά την επίλυση του προβλήματος.

Η πλειοψηφία των αριθμητικών μεθόδων απαιτεί τη διαίρεση του μέσου σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία), έκαστο από τα οποία έχει γνωστή γεωμετρία, καθώς και γνωστές παραμέτρους συμπεριφοράς. Η λύση του προβλήματος προκύπτει από την επίλυση ενός γραμμικού ή μη γραμμικού συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων για όλα τα επιμέρους τμήματα του μέσου (Αγιουτάντης, 2002).

Με τις αριθμητικές μεθόδους μπορούν να αναλυθούν προβλήματα που με άλλους μεθόδους δεν είναι εύκολο ή πολλές φορές εφικτό να επιλυθούν με άλλους μεθόδους. Η χρήση των μεθόδων αυτών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για το μηχανικό αφενός μεν κατά τη φάση του σχεδιασμού, αφετέρου δε κατά τη φάση της εκτελέσεως ενός έργου. Ένας λόγος είναι ότι οι κλασσικές μέθοδοι είχαν περιορισμένη

ικανότητα στο να προσδιορίσουν την ανάπτυξη της διατάραξης της υπό μελέτης περιοχής η οποία έχει σημαντική επίδραση στην τελική αντοχή του εδάφους. Για αυτό το λόγο σχεδιάστηκαν διαδικασίες αριθμητικών μεθόδων (πεπερασμένων στοιχείων), τα οποία προσομοιάζουν την επιφάνεια αστοχίας σε ελαστοπλαστικά υλικά (Beer et al., 1992).

Μερικές από τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Αγιουτάντης, 2002):

- Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method).
- Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method).
- Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary element method).
- Μέθοδος των διακριτών ή διακεκριμένων στοιχείων (distinct element method)
- Υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους.

Στη συνέχεια αναλύεται αναλυτικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην οποία βασίζεται η λειτουργία του λογισμικού Plaxis.

### 5.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία).

Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους. Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής υπολογίζονται στα υπόλοιπα σημεία του μέσου. Έτσι είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου.

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Desai, 1979):

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα.

- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με την μετατόπιση (strain-displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress-strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equation).
- Υπέρθεση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και ορισμός των συνοριακών συνθηκών.
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.
- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κ.λ.π.)
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη ΜΠΣ.

## 5.2 Φιλοσοφία της Μεθόδου

Τα βασικά χαρακτηριστικά επίλυσης με τη ΜΠΣ είναι τα εξής:

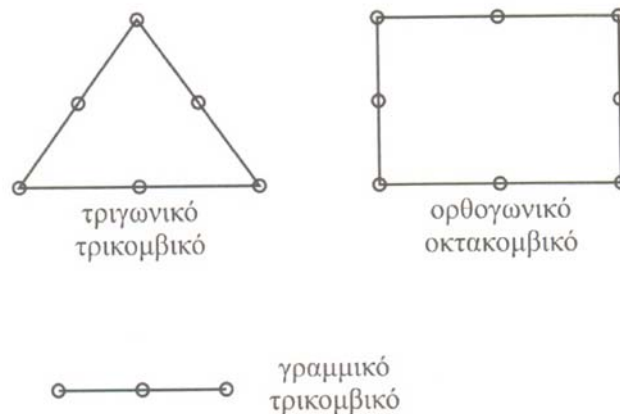
- Η ΜΠΣ αποτελεί μία μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς.
- Το πεδίο ορισμού των εξισώσεων αυτών απαιτεί κυρίως συνεχή μέσα. Όταν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν ασυνέχειες στην περιγραφή του μέσου, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ασυνεχειών, τα οποία εξασφαλίζουν μεν μια μαθηματική συνέχεια με το υπόλοιπο μέσο, αλλά χαρακτηρίζονται από μία ‘χαλαρότητα’ σε σχέση με τα συνήθη στοιχεία.

- Η καταστατική εξίσωση συμπεριφοράς του υλικού, η οποία επιλύεται στο συγκεκριμένο μέσο, συνδέει ουσιαστικά το αίτιο(δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση, παραμόρφωση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.

### 5.3 Διακριτοποίηση

Με τον όρο διακριτοποίηση εννοείται η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία (elements) με τη βοήθεια νοητών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμα ή καμπύλα τμήματα και βρίσκονται στις κορυφές των στοιχείων.

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Στις γεωτεχνικές εφαρμογές είναι συνήθης η χρήση τριγωνικών ή τετραπλευρικών (επίπεδων) στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν τμήματα υλικού, των οποίων η τρίτη διάσταση είναι μοναδιαία (όπου είναι δυνατή μία απλοποιητική παραδοχή).



Εικόνα 5.1: Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης 2002).

Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών, όπως για παράδειγμα τα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου περισσότεροι κόμβοι περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά

στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά. Στους κόμβους αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου αναφέρεται στο σύνολο των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο. Στις συνήθεις περιπτώσεις των προβλημάτων μηχανικής, κάθε κόμβος έχει δύο ή τρεις βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης του κόμβου. Εάν οι κόμβοι μεταφέρουν ροπές, τότε οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο μπορεί να αυξηθούν κατά έναν στις δύο διαστάσεις και κατά τρεις στις τρεις διαστάσεις.

Η διαδικασία της διακριτοποίησης περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους.

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου.
- Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας του στοιχείου.
- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου.
- Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου.

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια.

#### 5.4 Συναρτήσεις Μορφής

Οι συναρτήσεις μορφής εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους. Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη γραμμικές. Στις περιπτώσεις στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους εφαρμόζονται γραμμικές συναρτήσεις, ενώ, όταν ο αριθμός των κόμβων υπερβαίνει τον αριθμό των ακμών ενός στοιχείου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές συναρτήσεις.

Αρχικά θα μελετηθούν οι συναρτήσεις μορφής σε μια διάσταση. Η μετατόπιση για ένα στοιχείο με δύο κόμβους εκφράζεται από τη σχέση 5.1.

$$u = a_1 + a_2 y \quad (5.1)$$

$$\{u\} = [1 \ y] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \{u\} = [\Phi] \{a\} \quad (5.2)$$

Όπου τα  $a_1$  και  $a_2$  περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1,2. Αντικαθιστώντας στη σχέση 5.1 τα διανύσματα  $u$  και  $y$  με τις επιμέρους συνιστώσες τους προκύπτει:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 + a_2 y_1 \\ u_2 &= a_1 + a_2 y_2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Και επομένως,

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{q\} = [A] \{a\} \quad (5.4)$$

Όπου  $\{q\}$  είναι το διάνυσμα των άγνωστων μετατοπίσεων,  $[A]$  είναι ο πίνακας με τις συντεταγμένες του στοιχείου και  $a$  οι άγνωστο συντελεστές. Επιλύοντας προκύπτει:

$$\{a\} = [A^{-1}] \{q\} \Rightarrow \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} y_2 & -y_1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

Επομένως:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{y_2 u_1 - y_1 u_2}{l} \\ a_2 &= \frac{-u_1 + u_2}{l} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Αντικαθιστώντας στην αρχική εξίσωση, προκύπτει μία εξίσωση της μορφής:

$$\{u\} = [\Phi] \{a\} \Rightarrow \{u\} = [\Phi] [A]^{-1} \{q\} \Rightarrow \{u\} = [N] \{q\} \quad (5.7)$$

Όπου  $[N] = [\Phi] [A]^{-1} \{q\} \Rightarrow \{u\} = [N] \{q\}$ , δηλαδή:

$$u = \sum_{i=1}^n u_i N_i \quad (5.8)$$

που είναι μια έκφραση της μετατόπισης για ένα στοιχείο ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους. Επίσης, οι συναρτήσεις  $N_i$  μπορούν να εκφραστούν σε τοπικές και αδιαστατοποιημένες συντεταγμένες.

Στην περίπτωση που έχουμε δύο διαστάσεις η 5.8 γίνεται:

$$u = \sum_{i=1}^4 u_i N_i \quad (5.9)$$

Με τη σειρά της κι αυτή εκφράζει τη μετατόπιση ενός στοιχείου σε συνάρτηση με τις μετατοπίσεις στους κόμβους. Η εξίσωση 5.10 δίνει τη γενική συνάρτηση μορφής όσον αφορά τις μετατοπίσεις στοιχείων.

$$u = \sum_{i=1}^n u_i N_i \quad (5.10)$$

Όπου  $u$  η μετατόπιση σε τυχαίο σημείο ενός στοιχείου,  $N_i$  η συνάρτηση μορφής, και  $u_i$  οι τιμές της μετατόπισης σε κάθε κόμβο (Αγιουτάντης, 2002).

## 5.5 Καταστατικές Εξισώσεις

Οι παραμορφώσεις συνδέονται με τις μετατοπίσεις με τη σχέση:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \quad (5.11)$$

Όπου  $\{\varepsilon\}$  ο πίνακας παραμορφώσεων με διάσταση  $[3 \times 1]$ ,  $\{q\}$  το μοναδιαίο διάνυσμα των μετατοπίσεων στους κόμβους με διάσταση  $[n \times 1]$ ,  $[B]$  ο πίνακας συσχετισμού με τη διάσταση  $[3 \times n]$ , και  $n$  οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου.

Οι καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα είναι της μορφής

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \quad (5.12)$$

οι οποίες σε μορφή πινάκων γράφονται ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (5.13)$$

Όπου ο πίνακας  $[E]$  παριστάνει ένα γενικευμένο μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού.

## 5.6 Συνοριακές Συνθήκες και Μοντέλα Συμπεριφοράς Υλικών

Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος και συνήθως εκφράζεται με τις συνθήκες ισορροπίας του πεδίου.

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δύο παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.



Στην περίπτωση των προβλημάτων ελαστικότητας, οι γεωμετρικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned}u_x &= u_o \\ u_y &= u_o\end{aligned}\tag{5.14}$$

Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από τις εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned}f_x &= f_0 \\ f_y &= f_0\end{aligned}\tag{5.15}$$

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού (material model), καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση συμπεριφοράς των φυσικών υλικών. Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό το οποίο δεν είναι το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται ελαστικά και ισότροπα και στην περίπτωση της μιας διάστασης δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = E\varepsilon\tag{5.16}$$

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα μοντέλα συμπεριφοράς όπως μοντέλα μη ισοτροπικής ελαστικής συμπεριφοράς, και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς. Ακόμη, καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή μεν, αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατό να οριστούν διαφορετικά μοντέλα υλικού σε διαφορετικά σημεία του σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

### 5.7 Κριτήρια Αστοχίας Γεωυλικών

Σε περιπτώσεις όπου λόγω της φόρτισης ενός υλικού είναι δυνατό να επέλθει αστοχία του, τότε μαζί με την καταστατική συμπεριφορά του, πρέπει να οριστεί το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας ή διαρροής του υλικού.

Ουσιαστικά τα κριτήρια αστοχίας των υλικών είναι δυνατό να επιδράσουν με δύο τρόπους:

- Είτε να θεωρήσουν ότι ένα στοιχείο αστοχεί όταν η εντατική κατάσταση που δέχεται το υλικό υπερβαίνει το όριο της αντοχής του, και επομένως να εμποδίσει το στοιχείο αυτό να δεχτεί μία ανώτερη εντατική κατάσταση.
- Είτε με τη θεώρηση ότι το υλικό αστόχησε στην παραπάνω εντατική κατάσταση, να τροποποιήσουν (να μειώσουν) τις ελαστικές ή πλαστικές σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιάσουν την αστοχία.

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να επαναλαμβάνονται μέχρις ότου, είτε αστοχήσουν όλα τα στοιχεία ενός σώματος, είτε σταθεροποιηθεί η κατάσταση και δεν υπάρχουν πλέον αλλαγές στα στοιχεία, είτε εάν η διαδικασία σταματήσει λόγω υπέρβασης του μέγιστου κύκλου επαναλήψεων της διαδικασίας επίλυσης (Αγιουτάντης, 2002).

#### 5.7.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb

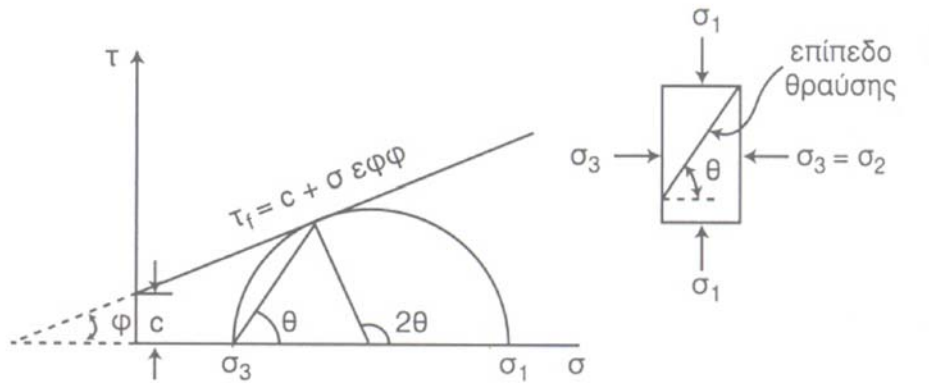
Η μέθοδος προσδιορισμού της αντοχής του εδάφους που βασίζεται στους κύκλους Mohr, είναι η ακόλουθη:

Έστω ζεύγος τιμών των τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_3$ ), τέτοιων που να προκαλέσουν τη θραύση του εδάφους. Ταυτόχρονα, πρέπει να πληρούται η συνθήκη του Coulomb.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (5.17)$$

όπου  $\tau_f$  = η διατμητική τάση θραύσης του εδάφους.

Αυτό σημαίνει ότι η ευθεία θραύσης του Coulomb και ο κύκλος θραύσης του Mohr έχουν ένα κοινό σημείο, το σημείο επαφής τους, δηλαδή η ευθεία του Coulomb είναι εφαπτόμενη του κύκλου του Mohr.



Εικόνα 5.2: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Κολέτσος, 2004).

Σε μια σειρά κύκλων θραύσης, οι οποίοι συνήθως προκύπτουν από την τριαξονική εργαστηριακή δοκιμή, σε κάθε κύκλο πρέπει να υπάρχει ένα σημείο, το οποίο αντιστοιχεί στην ορθή και τη διατμητική τάση που προκαλούν θραύση. Τα σημεία αυτά ορίζουν την κοινή εφαπτόμενη των κύκλων θραύσης του Mohr.

Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι γενικά καμπύλη γραμμή. Πάντως στους περισσότερους υπολογισμούς που αφορούν την ευστάθεια μιας εδαφικής μάζας είναι απαραίτητο να εκφράζεται η θραύση με γραμμική συνάρτηση. Έτσι η καμπύλη αστοχίας αντικαθίσταται από τη πλησιέστερη ευθεία, η οποία τότε αντιστοιχεί στην εξίσωση Coulomb. Η ευθεία αυτή παριστάνει την αντοχή του εδάφους η δε εξίσωσή της είναι:

$$\tau_f = c + \sigma_f \epsilon\phi\phi \quad (5.18)$$

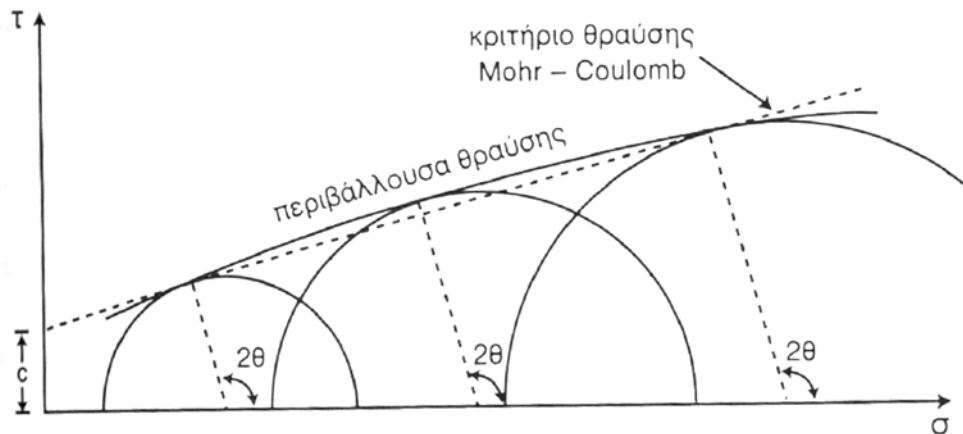
Η εξίσωση 5.18 εκφράζει το γνωστό ως κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb, όπου:

$\tau_f$  = η διατμητική τάση,

$\sigma_f$  = ορθή τάση αστοχίας,

$c$  = συνοχή,

$\phi$  = γωνία εσωτερικής τριβής.



Εικόνα 5.3: Περιβάλλουσα αστοχίας (Κολέτσος, 2004).

Η μηχανική σημασία της περιβάλλουσας του Mohr μπορεί να γίνει αντιληπτή από τις ακόλουθες περιπτώσεις, που είναι ενδεχόμενο να παρουσιαστούν:

1. Εάν ο κύκλος του Mohr, για δεδομένη φόρτιση  $(\sigma_1, \sigma_3)$  βρίσκεται κάτω από την περιβάλλουσα θραύσης, το έδαφος είναι ευσταθές για τη φόρτιση αυτή.
2. Εάν ο κύκλος του Mohr εφάπτεται της περιβάλλουσας, σε κάποια επιφάνεια εντός του εδάφους η αντοχή του βρίσκεται σε οριακή κατάσταση. Η επιφάνεια αυτή κλίνει κατά γωνία  $\theta$  ως προς τη διεύθυνση της μικρότερης κύριας τάσης
3. δεν είναι δυνατό ο κύκλος του Mohr να τέμνει την περιβάλλουσα, δεδομένου ότι κάθε προσπάθεια να επιβληθεί φόρτιση μεγαλύτερη από την αντοχή του εδάφους στην αστοχία, θα οδηγήσει σε γενική κατάρρευσή του.

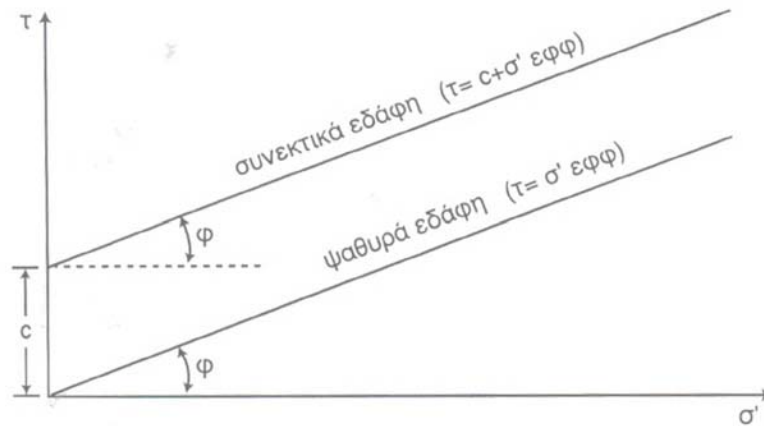
Το μέγεθος της γωνίας κλίσης,  $\theta$ , του επιπέδου αστοχίας ως προς τη διεύθυνση της τάσης  $\sigma_3$  από το σχήμα 5.3 προκύπτει:

$$2\theta = 90^\circ + \phi$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (5.19)$$

Για τα μη συνεκτικά εδάφη η εξίσωση του Coulomb γίνεται (Κολέτσος, 2004):

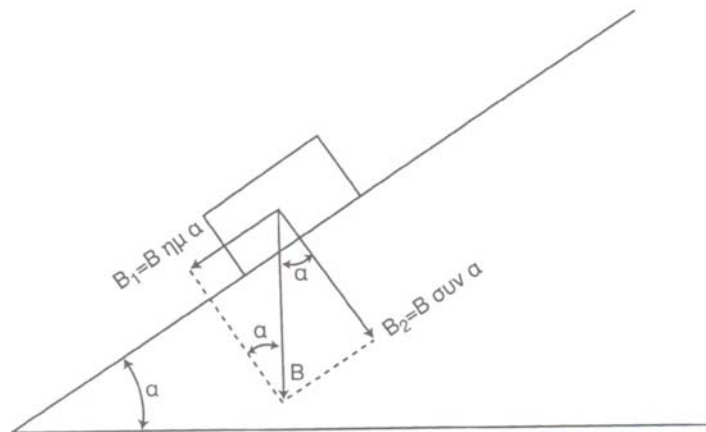
$$\tau = \sigma \tan \phi$$



Εικόνα 5.4: Συνεκτικά και ψαθυρά εδάφη (Κολέτσος, 2004).

### Γωνία φυσικού πριανού

Έστω στερεό σώμα που ισορροπεί πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο.



Εικόνα 5.5: Συνθήκη ισορροπίας ολισθαίνοντος σώματος (Κολέτσος, 2004).

Για να αποτραπεί η ολίσθηση του εδάφους πρέπει η αντίσταση τριβής  $T$  να είναι τουλάχιστον ίση με την εφαπτομενική συνιστώσα  $B_1$  του βάρους του σώματος  $B$ . Η συνθήκη ισορροπίας είναι:

$$T \geq B_1$$

$$\text{όπου: } T = f B_2 = f B \cos \alpha \quad \text{και} \quad B_1 = B \sin \alpha$$

Δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$f B \cos \alpha \geq B \sin \alpha \quad \text{ή} \quad f \geq \tan \alpha$$

και επειδή  $f = \varphi\varphi$  θα είναι  $\varphi\varphi \geq \varphi\alpha$ , από την οποία προκύπτει:

$$\varphi \geq \alpha \quad (5.20)$$

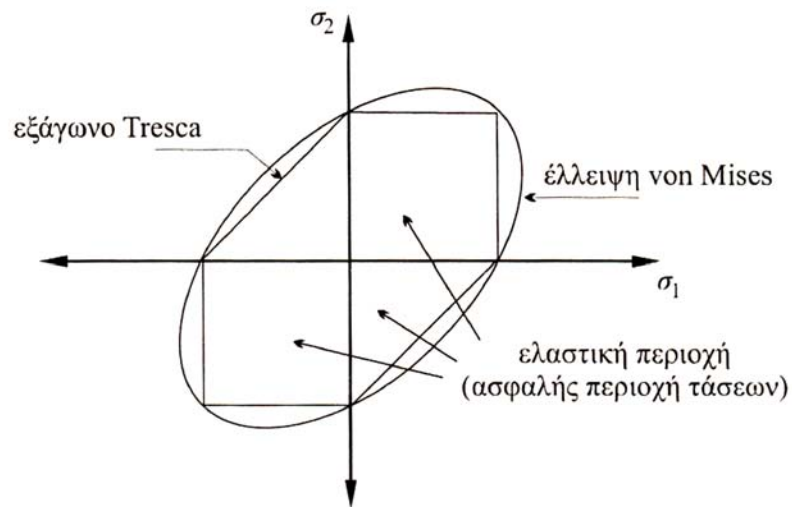
Με βάση την εξίσωση 5.20 ένας εδαφικός κόκκος πάνω σε κεκλιμένη εδαφική επιφάνεια κατολισθαίνει, όταν η γωνία κλίσης του πρανούς  $\alpha$  γίνει ίση με τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\varphi$ . Η γωνία αυτή καλείται γωνία φυσικού πρανούς (Κολέτσος 2004).

### 5.7.2 Κριτήρια αστοχίας Von-Misses και Tresca

Σύμφωνα με το κριτήριο *Von-Misses* η διαρροή ενός όλκιμου υλικού που βρίσκεται κάτω από επίδραση σύνθετης εντατικής κατάστασης, αρχίζει όταν η ισοδύναμη τάση  $\sigma_{eq}$ , ισούται με την αντοχή σε εφελκυσμό, όπως αυτή μετρείται κατά τη διαρροή του υλικού λόγω καθαρού εφελκυσμού. Το κριτήριο αυτό όπως διατυπώνεται με βάση τις κύριες τάσεις είναι:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \quad (5.21)$$

Το κριτήριο αυτό σε τρεις διαστάσεις παριστάνεται από ένα κύλινδρο ακτίνας  $\sigma_A$ . Εάν το σημείο που εκφράζει την τυχαία εντατική κατάσταση βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο, τότε το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Εάν το σημείο βρίσκεται στην επιφάνεια του κυλίνδρου τότε αρχίζει η διαρροή του υλικού. Εάν το σημείο βρίσκεται έξω από τον κύλινδρο, τότε έχει ήδη δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση στο υλικό.



Εικόνα 5.6 : Κριτήριο Tresca και von Mises (Αγιουτάντης, 2002).

Σύμφωνα με τον Tresca, η διαρροή σε όλκιμα υλικά κάτω από συνθήκες σύνθετης εντατικής κατάστασης συμβαίνει όταν η μέγιστη διατμητική τάση γίνει ίση με τη μέγιστη διατμητική τάση  $\sigma_{\Delta}$ , που αναπτύσσεται τη στιγμή της διαρροής, όταν το υλικό καταπονείται σε καθαρό εφελκυσμό. Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου είναι η εξής:

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - \sigma_{\Delta}^2][(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - \sigma_{\Delta}^2][(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - \sigma_{\Delta}^2] = 0 \quad (5.22)$$

Σε τρεις διαστάσεις το κριτήριο αυτό παριστάνεται από ένα εξαγωνικό πρίσμα ακτίνας  $\sigma_{\Delta}$ . Εάν το σημείο βρίσκεται μέσα στο πρίσμα τότε το υλικό βρίσκεται μέσα στην ελαστική περιοχή. Εάν το σημείο βρίσκεται στην επιφάνεια διαρροής, τότε αρχίζει η διαρροή του υλικού, ενώ όταν το σημείο αυτό βρίσκεται έξω από το πρίσμα, τότε έχει ήδη δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση (Αγιουτάντης 2002).

### 5.7.3 Κριτήριο Αστοχίας Drucker-Prager

Το κριτήριο αυτό αποτελεί μια γενίκευση της υπόθεσης Mohr Coulomb και δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση:

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (5.23)$$

Όπου  $f$  η συνάρτηση διαρροής,  $\alpha$  και  $k$  οι θετικές σταθερές του υλικού και  $J_1, J_2$ , οι σταθερές του αποκλίνοντα τανυστή τάσης. Στην περίπτωση όπου  $\alpha=0$ , προκύπτει το κριτήριο του *Von-misses*, δηλαδή η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από έναν ορθό κύλινδρο. Στην περίπτωση  $\alpha > 0$  τότε η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από μία ορθή πυραμίδα, της οποίας η κορυφή βρίσκεται στην αρχή των αξόνων (Αγιουτάντης 2002).

### 5.8 Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων στην Ευστάθεια Πρανών

Η μελέτη ευστάθειας των πρανών με χρήση αριθμητικών μεθόδων βρίσκει εφαρμογή κυρίως την τελευταία δεκαετία βρίσκει πεδίο εφαρμογής. Οι αρχικές εφαρμογές έκαναν χρήση γραμμικής ελαστικότητας και είχαν ως αντικείμενο τον προσδιορισμό της κινηματικής κατάστασης για περιπτώσεις που πρακτικά βρισκόντουσαν μακριά από την εκδήλωση ακόμα και τοπικών θραύσεων. Η γραμμική ελαστικότητα δεν μπορούσε να προσομοιάσει ικανοποιητικά η συμπεριφορά των υλικών. Η συνεχής όμως εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων οδήγησε στην κάλυψη του τομέα αυτού με η χρήση κατάλληλων καταστατικών νόμων των εδαφικών υλικών. Πρόσθετο πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών αποτελεί η προβλέψει του αναμενόμενου εντατικού και κινηματικού πεδίου. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός των ευπαθών περιοχών, ώστε να υπάρχει έλεγχος της ασφάλειας τόσο κατά την φάση της εκτέλεσης ενός έργου όσο και μετά την αποπεράτωσή του (Κωμόδρομος, 2001).



## **6 ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ PLAXIS**

### **6.1 Γενικά**

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του εδαφικού υλικού είναι η παρουσία ή όχι νερού στους πόρους του δεδομένου ότι οι πιέσεις των πόρων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του εδάφους. Όσον αφορά την αλληλεπίδραση ύδατος-εδαφικού σκελετού το Plaxis κάνει διαχωρισμό μεταξύ της συμπεριφοράς στραγγιζόμενου (drained), μη στραγγιζόμενου (undrained) και μη πορώδους υλικού (Plaxis, 1998).

### **6.2 Τύπος Συμπεριφοράς Υλικού**

#### **6.2.1 Στραγγιζόμενη Συμπεριφορά**

Όταν χρησιμοποιείται η επιλογή της στραγγιζόμενης συμπεριφοράς δεν αναπτύσσεται υπερπίεση των πόρων. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις ξηρών εδαφών, σε εδάφη με μεγάλη περατότητα που εμφανίζουν πλήρη αποστράγγιση, καθώς και σε περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού φόρτισης, ή όταν γίνεται μακροπρόθεσμη ανάλυση (το έδαφος προλαβαίνει να αποστραγγίσει μετά από μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο). Γενικά ο όρος ‘drained’ αναφέρεται σε εδάφη που το νερό στους πόρους τους αναπτύσσει πίεση μόνο ίση με την υδροστατική και αν επιβληθεί σε αυτά κάποιο φορτίο, το νερό αποστραγγίζεται χωρίς να παραλάβει μέρος της φόρτισης (Plaxis, 1998). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος αυτός δεν σημαίνει ότι όλο το νερό έχει αποστραγγισθεί από τους πόρους του πετρώματος. Το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο. Απλά δεν υπάρχει κάποια επιπλέον πίεση πόρων η οποία να προκαλείται από την επιβολή φορτίου (Craig, 2004).

### 6.2.2 Μη Στραγγιζόμενη Συμπεριφορά

Εάν επιλεγεί μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά, τότε αναπτύσσεται υπερπίεση των πόρων. Αυτό μπορεί να συμβαίνει σε περιπτώσεις χαμηλής περατότητας, υψηλού ρυθμού φόρτισης ή σε βραχυπρόθεσμη ανάλυση (π.χ. όταν μόλις έχει βρέξει, ή μόλις έχει ολοκληρωθεί μία κατασκευή και το νερό δεν έχει προλάβει να αποστραγγίσει). Στο Plaxis όλα τα εδαφικά στρώματα που έχουν χαρακτηριστεί ως μη στραγγιζόμενα θα συμπεριφέρονται έτσι ακόμα και αν βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι στο πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input), εισάγονται οι ενεργές τιμές των παραμέτρων για τα στρώματα που εμφανίζουν μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά και όχι οι ολικές τιμές. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδαφικού σκελετού τις οποίες εκφράζουν οι ενεργές τιμές των: α) μέτρο ελαστικότητας  $E$ , β) λόγος Poisson  $\nu$ , γ) συνοχή  $c$ , και δ) γωνία εσωτερικής τριβής  $\varphi$ . Σε συνδυασμό με την ακαμψία και την αντοχή του εδαφικού σκελετού, το Plaxis προσθέτει το μέτρο συμπίεσης του νερού και διαχωρίζει τις ενεργές τάσεις από τις υπερπίεσεις των πόρων με βάση τις εξισώσεις (Plaxis, 1998):

$$\Delta p' = K' \Delta \varepsilon_v \quad (6.1)$$

$$\Delta p_w = \frac{K_w}{n \Delta \varepsilon_v} \quad (6.2)$$

όπου:

- $\Delta p'$ : βαθμός αύξησης της ενεργής τάσης (kPa),
- $K'$ : μέτρο συμπίεσης του εδαφικού σκελετού,
- $\Delta \varepsilon_v$ : ένας βαθμός αύξησης της ογκομετρικής παραμόρφωσης,
- $\Delta p_w$ : υπερπίεσεις των πόρων (kPa),
- $n$ : πορώδες του εδάφους,
- $K_w$ : μέτρο συμπίεσης του υγρού των πόρων.

Όσον αφορά το μέτρο συμπίεσης του εδάφους, η ελαστική θεωρία αποδίδει την παρακάτω έκφραση (όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας και  $\nu$  ο λόγος Poisson):

$$K' = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (6.3)$$

Το Plaxis δεν χρησιμοποιεί πολύ ρεαλιστικό μοντέλο συμπίεσης του νερού, γιατί αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικά προβλήματα. Στην πραγματικότητα, η ολική συμπίεση του εδάφους και του νερού κάτω από ισότροπη επιβολή φορτίου είναι βασισμένη στην εξίσωση (6.3), θεωρώντας ένα λόγο του Poisson ίσο με 0,495. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σχετικά χαμηλή συμπιεστότητα του νερού που εκφράζεται από τη σχέση:

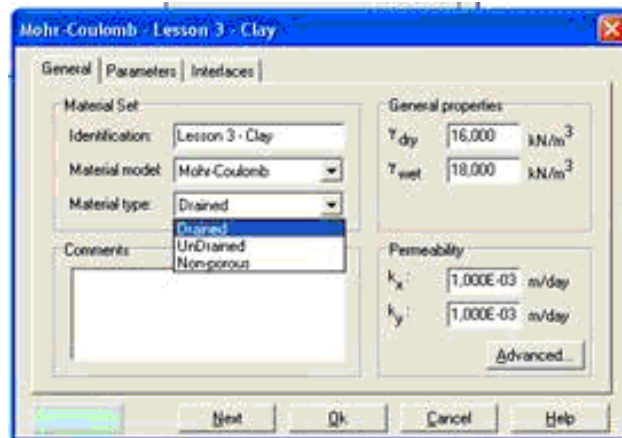
$$\frac{K_w}{n} = 100G \quad \text{όπου} \quad G = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad (6.4)$$

Τα  $E'$  και  $\nu'$  αναφέρονται στις ενεργές τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου του Poisson αντίστοιχα.

Άρα το νερό των πόρων θεωρείται ότι είναι ελαφρά συμπιέσιμο. Σε ισότροπη φόρτιση ένα μικρό ποσοστό του φορτίου θα μετατραπεί σε ενεργή τάση, τουλάχιστον για μικρές τιμές του ενεργού λόγου του Poisson. Για υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά ο λόγος του Poisson θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0,35. Η χρήση υψηλότερων τιμών για το λόγο του Poisson θα σημαίνει ότι το νερό δεν είναι αρκετά ασυμπίεστο σε σχέση με τον εδαφικό σκελετό (Plaxis, 1998).

### 6.2.3 Μη Πορώδη Υλικά

Εκτός από τις δύο παραπάνω επιλογές, δηλαδή της στραγγιζόμενης και αστράγγιστης συμπεριφοράς του εδάφους, υπάρχει και η επιλογή non-porous (αδιαπέρατο υλικό) (Εικόνα 6.1). Σε αυτή την περίπτωση δεν αναπτύσσονται ούτε υπερπιέσεις αλλά ούτε και υδροστατικές πιέσεις των πόρων. Αυτή η επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτείται η προσομοίωση βράχου ή κατασκευών από σκυρόδεμα. Συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την επιλογή του γραμμικά ελαστικού μοντέλου (Plaxis, 1998).



Εικόνα 6.1: Παράθυρο διαλόγου όπου προσδιορίζεται το υλικό ως προς την αλληλεπίδραση του με το νερό, εισάγονται τα μοναδιαία βάρη (ξηρό και υγρό) και οι περατότητες και επιλέγεται το μοντέλο συμπεριφοράς του υλικού.

### 6.3 Μοναδιαίο Βάρος και Διαπερατότητα

#### 6.3.1 Ξηρό και υγρό Μοναδιαίο βάρος

Επίσης στο Plaxis στο παράθυρο input εισάγονται το υγρό και ξηρό μοναδιαίο βάρος ( $\gamma_{wet}$  και  $\gamma_{dry}$  αντίστοιχα). Μοναδιαίο βάρος ενός υλικού είναι ο λόγος του συνολικού βάρους του υλικού (μαζί με το νερό στους πόρους του) προς το συνολικό όγκο του υλικού. Το μοναδιαίο βάρος ταυτίζεται με τον όρο φαινόμενο ειδικό βάρος, το οποίο ισούται με το λόγο του συνολικού βάρους του υλικού προς όγκο νερού ίσο με το συνολικό όγκο του υλικού (Αγιουτάντης, 2002). Το ξηρό βάρος,  $\gamma_{dry}$ , αποδίδεται σε όλα τα υλικά πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα ενώ το  $\gamma_{wet}$  σε όλα τα υλικά που βρίσκονται κάτω από αυτόν.

Για πορώδη υλικά το ξηρό μοναδιαίο βάρος είναι μικρότερο από ότι το υγρό μοναδιαίο βάρος. Για παράδειγμα στις άμμους το  $\gamma_{dry}$  είναι περίπου 16 kN/m<sup>3</sup> ενώ το αντίστοιχο  $\gamma_{wet}$  είναι περίπου 20 kN/m<sup>3</sup>. Τα αργιλώδη εδάφη δεν είναι ποτέ εντελώς ξηρά. Πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα οι άργιλοι μπορεί να είναι σε κατάσταση κορεσμού εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων. Άλλες περιοχές πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να είναι μερικώς κορεσμένες. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα ήταν πιο σωστό να εισαχθεί μία τιμή του ξηρού βάρους λίγο μεγαλύτερη της πραγματικής. Βέβαια οι πιέσεις των πόρων

πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι ίσες με μηδέν. Έτσι οι επιδράσεις από τα τριχοειδή φαινόμενα παραβλέπονται (Plaxis, 1998).

### 6.3.2 Διαπερατότητες

Οι διαπερατότητες στο Plaxis έχουν το μέγεθος της ταχύτητας (μήκος προς χρόνο). Οι τιμές των διαπερατοτήτων είναι σημαντικές όταν γίνεται ανάλυση στερεοποίησης (consolidation analysis) ή υπόγειας ροής (groundwater flow calculation). Στο πρόγραμμα γίνεται διάκριση μεταξύ της οριζόντιας  $k_x$  και της κατακόρυφης  $k_y$ , εφόσον κάποιοι τύποι εδάφους συμπεριφέρονται ανισότροπα και παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις δύο κατευθύνσεις ως προς τη διαπερατότητα. Ωστόσο προσοχή θα πρέπει να δοθεί όταν προκύπτουν ταυτόχρονα πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές τιμές σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθώς αυτό δημιουργεί προβλήματα στο μητρώο ακαμψίας (Plaxis, 1998).

## 6.4 Μέθοδοι Ανάλυσης με μη Στραγγιζόμενη Συμπεριφορά στο PLAXIS

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η ανάλυση στραγγιζόμενης συμπεριφοράς ενδείκνυται όταν:

- Η περατότητα είναι μεγάλη και ο ρυθμός φόρτισης μικρός.
- Πρέπει να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του εδάφους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα από την αλλαγή της εντατικής κατάστασης.

Αντίθετα η ανάλυση αστράγγιστης συμπεριφοράς χρησιμοποιείται όταν:

- Η περατότητα είναι μικρή και ο ρυθμός φόρτισης μεγάλος.
- Πρέπει να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του εδάφους για μικρό χρονικό διάστημα από την αλλαγή της εντατικής κατάστασης.

Υπάρχουν 3 μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο Plaxis όταν γίνεται ανάλυση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς:

1. Ανάλυση με βάση τις ενεργές τάσεις, χρησιμοποιώντας ενεργές παραμέτρους για τη συνοχή τη γωνία εσωτερικής τριβής το λόγο του Poisson και το μέτρο ελαστικότητας (Τύπος υλικού: 'undrained'). Η μέθοδος αυτή προτείνεται ως καταλληλότερη εφόσον η συμπεριφορά του εδάφους διέπεται πάντα από τις ενεργές τάσεις.
2. Ανάλυση με βάση πάλι τις ενεργές παραμέτρους για το λόγο του Poisson και το μέτρο ελαστικότητας, χρησιμοποιώντας όμως τις ολικές (undrained) παραμέτρους για τη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή και τις ενεργές παραμέτρους για το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson (τύπος υλικού: 'undrained'). Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις ενεργές τιμές κάποιων παραμέτρων.
3. Ανάλυση με βάση τις ολικές τάσεις. Εδώ η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μηδέν και χρησιμοποιούνται οι ολικές παράμετροι για  $c$ ,  $E$  και  $\nu$  (τύπος υλικού 'non-porous'- 'drained'). Η τρίτη αυτή μέθοδος δε συνιστάται γιατί δεν υπάρχουν πληροφορίες για τη διακύμανση των υπερπιέσεων των πόρων.

#### 6.4.1 Ανάλυση μη Στραγγιζόμενης Συμπεριφοράς στο Plaxis με Ενεργές Παραμέτρους

Όπως προαναφέρθηκε το Plaxis έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει τη μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά κάνοντας ανάλυση με ενεργές τάσεις. Αυτό γίνεται θέτοντας τον τύπο του υλικού ως 'undrained'.

Η παρουσία πιέσεων των πόρων, που συνήθως προέρχονται από το νερό, σε ένα εδαφικό σώμα συνεισφέρει στην τιμή της ολικής τάσης. Σύμφωνα με τον Terzaghi η ολική τάση ( $\sigma$ ) συνδέεται με την πίεση των πόρων ( $\sigma_w$ ) και την ενεργή τάση ( $\sigma'$ ) με βάση τους τύπους:

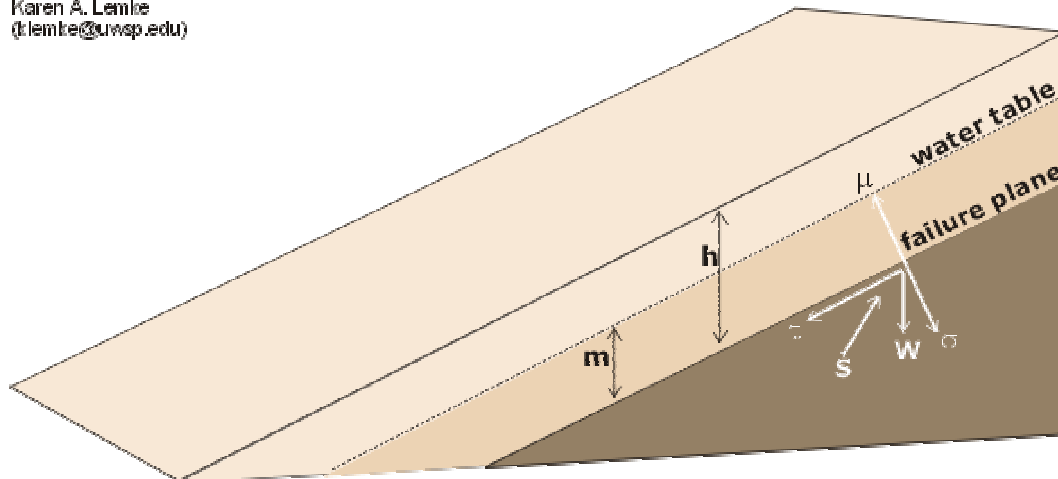
$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} + \sigma_w$$

$$\sigma_{yy} = \sigma'_{yy} + \sigma_w$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= \sigma_{zz}' + \sigma_w \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{xy}'\end{aligned}\quad (6.5)$$

Η πίεση των πόρων έχει αρνητικό πρόσημο. Η ολική τάση ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ) είναι η κύρια τάση που ασκείται σε ένα επίπεδο μιας εδαφικής μάζας και ισούται με τη δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα επίπεδο της εδαφικής μάζας, θεωρώντας ότι το έδαφος αποτελείται μόνο από μία φάση (στερεό). Η ενεργή τάση αναφέρεται στο ποσοστό της τάσης που παραλαμβάνεται μόνο από τον εδαφικό σκελετό (Plaxis, 1998). Στην Εικόνα 6.2 γίνεται αντιληπτό ότι η ενεργή τάση  $\sigma$  ισούται με τη διαφορά της ολικής τάσης μείον την πίεση των πόρων ( $\sigma - \mu$ ) όπου  $\sigma$  η ολική τάση και  $\mu$  η πίεση των πόρων. Επίσης  $w$  είναι το βάρος  $s$  η διατμητική αντοχή και  $\tau$  η διατμητική τάση.

Karen A. Lemke  
(klemke@uwsp.edu)



Εικόνα 6.2 Τάσεις σε κορεσμένο εδαφικό πρανές (University of Wisconsin, 2006).

Το Plaxis κάνει επίσης διαχωρισμό μεταξύ των πιέσεων σταθερής κατάστασης, που συνήθως είναι οι υδροστατικές (steady pore pressures ή  $p_{\text{steady}}$ ) και τις υπερπιέσεις των πόρων (excess pore pressures ή  $p_{\text{excess}}$ ).

$$\sigma_w = p_{\text{steady}} + p_{\text{excess}} \quad (6.6)$$

Οι πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης, είναι οι πιέσεις που αντιπροσωπεύουν μία σταθερή υδραυλική κατάσταση. Μία τέτοια κατάσταση υπάρχει όταν οι εξωτερικές υδατικές συνθήκες παραμένουν σταθερές για μία μακρά περίοδο. Για να επιτευχθεί μία

σταθερή υδραυλική κατάσταση δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει στατική ισορροπία στις πιέσεις των πόρων εφόσον και περιπτώσεις ροής υπογείου ύδατος μπορεί να οδηγήσουν σε σταθερή κατάσταση.

Οι υπερπιέσεις των πόρων είναι πιέσεις που προκύπτουν από την επιβολή φορτίου σε υλικά τα οποία βρίσκονται σε αστράγγιστες συνθήκες.

Οι πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης αποτελούν δεδομένα εισόδου για το PLAXIS και δίνονται πριν τους υπολογισμούς, είτε με την επιλογή “υδροφόρος ορίζοντας” (phreatic lines) είτε με την επιλογή “υπόγεια ροή” (groundwater flow calculation). Με την επιλογή ‘phreatic lines’ εισάγεται ο υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος αποτελείται από τα σημεία εκείνα στα οποία η πίεση των πόρων είναι μηδέν και κάτω από αυτά η πίεση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (υδροστατική), σύμφωνα με το μοναδιαίο βάρος του νερού με (10 kN/m<sup>3</sup>). Έτσι, πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα οι πιέσεις πόρων θα είναι μηδενικές, ενώ κάτω από αυτόν επικρατούν υδροστατικές πιέσεις.

Η επιλογή της υπόγειας ροής χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς όταν πρέπει να λύσουν γεωτεχνικά προβλήματα όπου υπάρχει υπόγεια ροή όπως σε περιπτώσεις φραγμάτων και αναχωμάτων.

Ακολουθεί η περιγραφή του χειρισμού του προγράμματος όσον αφορά την αστράγγιστη συμπεριφορά και τον υπολογισμό των υπερπιέσεων των πόρων που αναπτύσσονται (Plaxis, 1998).

Εφόσον η παράγωγος του παράγοντα της σταθερής τάσης ως προς το χρόνο είναι μηδέν θα είναι:

$$\dot{\sigma}_w = \dot{p}_{excess} \quad (6.7)$$

Από το νόμο του Hooke για ισότροπο και γραμμικά ελαστικό μοντέλο ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}'_{xx} \\ \dot{\epsilon}'_{yy} \\ \dot{\epsilon}'_{zz} \\ \dot{\epsilon}'_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\nu + 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.8)$$

Θεωρώντας ότι το νερό είναι ελαφρά συμπιέσιμο, ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης των πόρων μπορεί να γραφεί ως:



$$\dot{\sigma}_w = \frac{K_w}{n} \left( \dot{\varepsilon}_{xx}^e + \dot{\varepsilon}_{yy}^e + \dot{\varepsilon}_{zz}^e \right) \quad (6.9)$$

όπου η σταθερά  $K_w$  είναι το μέτρο συμπίεσης του νερού και  $n$  το πορώδες.

Ο νόμος του Hooke μπορεί να γραφεί και με βάση τις ολικές τάσεις και παραμέτρους μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} \\ \dot{\varepsilon}_{yy} \\ \dot{\varepsilon}_{zz} \\ \dot{\varepsilon}_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_u} \begin{Bmatrix} 1 & -\nu_u & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & 1 & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & -\nu_u & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\nu_u + 2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_{xx} \\ \dot{\sigma}_{yy} \\ \dot{\sigma}_{zz} \\ \dot{\sigma}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

όπου:

$$E_u = 2 G(1 + \nu_u) \quad \nu_u = \frac{\nu + \mu(1 + \nu)}{1 + 2\mu(1 + \nu)} \quad (6.11)$$

$$\mu = \frac{1}{3n} \frac{K_w}{K} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (6.12)$$

Επομένως με την επιλογή αστράγγιστης συμπεριφοράς στο Plaxis οι ενεργές παράμετροι των  $G$  και  $\nu$  μετατρέπονται σε ολικές παραμέτρους σύμφωνα με τις εξισώσεις (6.11) και (6.12).

Η τιμή  $\nu_u = 0,5$  αναφέρεται σε πλήρης ασυμπίεστη συμπεριφορά του νερού. Ωστόσο η αποδοχή της τιμής αυτής οδηγεί σε προβλήματα στον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας. Στην πραγματικότητα το νερό δεν είναι τελείως ασυμπίεστο αλλά μία ρεαλιστική προσέγγιση θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλο μέτρο συμπίεσης για αυτό. Για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα που θα προκύψουν από τη χαμηλή συμπιεστότητα, το  $\nu_u$ , όπως έχει προαναφερθεί, θεωρείται ίσο με 0,495. Για να διασφαλιστεί η εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων θα πρέπει το μέτρο συμπίεσης του νερού να είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό το εδαφικού σκελετού ( $K_w \gg nK$ ). Η προϋπόθεση αυτή ισχύει εάν θεωρηθεί  $\nu \leq 0,35$  (Plaxis, 1998).

Συνεπώς κατά την επίλυση με συνθήκες μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς, στο μητρώο ακαμψίας προστίθεται το μέτρο συμπίεσης του νερού. Η τιμή του μέτρου συμπίεσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3(\nu_u - \nu)}{(1 - 2\nu_u)(1 + \nu)} K = 300 \frac{0,495 - \nu}{1 + \nu} > 30K \quad (6.13)$$

Τουλάχιστον για  $\nu \leq 0,35$ .

Η μεταβολή της υπερπίεσης των πόρων συνδέεται με τη μεταβολή της πλευρικής παραμόρφωσης με την καταστατική εξίσωση:

$$\sigma'_w = \frac{K_w}{n} \varepsilon'_v \quad (6.14)$$

Γενικά το Plaxis έχει τη δυνατότητα ανάλυσης της μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς με ενεργές παραμέτρους και υπολογισμό των υπερπίεσεων των πόρων. Για το λόγο αυτό είναι πάντα προτιμότερο να υπάρχουν οι ενεργές παράμετροι των υλικών. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, όπως για παράδειγμα στα μαλακά εδάφη. Σε τέτοιες περιπτώσεις το μετρούμενο ολικό μέτρο ελαστικότητας  $E_u$  συνδέεται με το ενεργό  $E$  με τη σχέση:

$$E = \frac{1 + \nu}{3} E_u \quad (6.15)$$

Όμως από την ολική διατμητική αντοχή δεν είναι εύκολο να βρούμε τις ενεργές παραμέτρους. Για αυτό το λόγο το Plaxis προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος χρησιμοποιώντας τις ολικές (undrained) παραμέτρους των υλικών θεωρώντας τη γωνία εσωτερικής τριβής ίση με μηδέν ( $\varphi = \varphi_u = 0$ ). Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο στην περίπτωση του μοντέλου Mohr-Coulomb και του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους (Plaxis, 1998).

#### **6.4.2 Ανάλυση μη Στραγγιζόμενης Συμπεριφοράς με Ολικές Παραμέτρους**

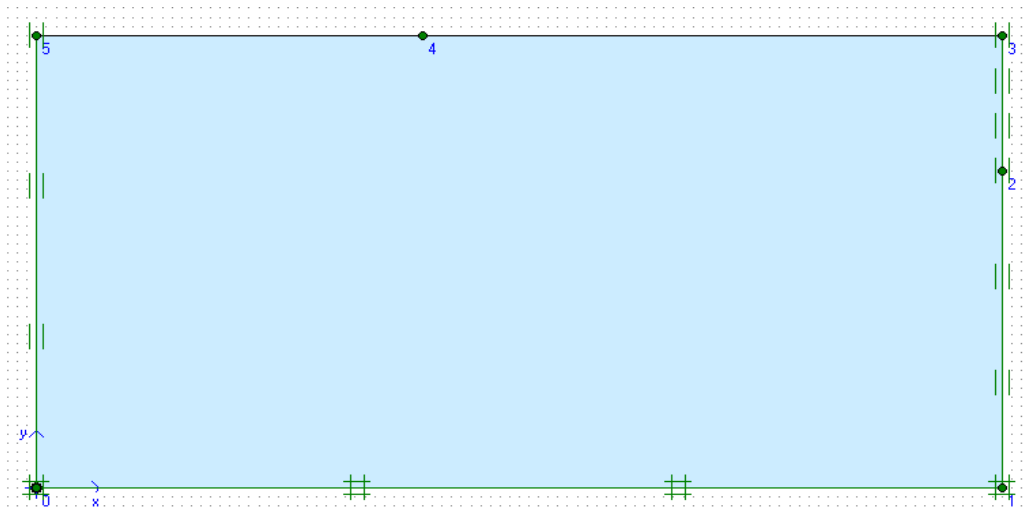
Σε περιπτώσεις που για κάποιο λόγο δεν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί η επιλογή ‘undrained’ για την ανάλυση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς στο Plaxis, αυτή μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας την επιλογή για μη πορώδες υλικό και να εισαχθούν στο πρόγραμμα οι ολικές ελαστικές παραμέτρους για  $E$  και  $\nu$  σε συνδυασμό με τις ολικές παραμέτρους διατμητικής αντοχής  $c$  και  $\phi$ , όπου  $\phi = \phi_u = 0$ . Στην περίπτωση αυτή γίνεται ανάλυση με βάση τις ολικές τάσεις, χωρίς να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των ενεργών τάσεων και των πιέσεων των πόρων. Έτσι στα αποτελέσματα της επίλυσης ό,τι αναφέρεται σαν ενεργές τάσεις θα πρέπει να ερμηνεύεται σαν ολικές τάσεις ενώ οι πιέσεις των πόρων θα είναι ίσες με μηδέν. Αυτός ο τύπος ανάλυσης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μοντέλα μαλακού εδάφους (soft soil creep). Γενικά μία ανάλυση με βάση τις ενεργές παραμέτρους είναι προτιμότερη χρησιμοποιώντας την επιλογή ‘undrained’ στο Plaxis για την προσομοίωση της μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς, σε σχέση με μία ανάλυση με ολικές τάσεις (Plaxis, 1998).

### **6.5 Παραμετρική Ανάλυση για τη Διερεύνηση Στραγγιζόμενης και μη Στραγγιζόμενης Συμπεριφοράς στο Plaxis**

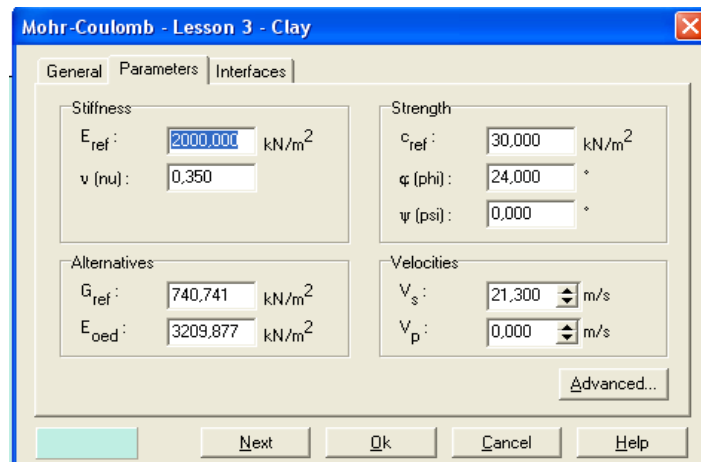
#### **6.5.1 Μοντέλο 1**

Αρχικά για να εξεταστεί η κατανομή των ολικών και ενεργών τάσεων καθώς και των πιέσεων και υπερπιέσεων των πόρων, χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο ενός παραλληλεπιπέδου, έτσι ώστε η γεωμετρία να μην επηρεάζει την κατανομή των τάσεων στο παράθυρο των αποτελεσμάτων. Το μοντέλο αυτό έχει ύψος 50 μέτρα και μήκος 100 μέτρα (Εικόνα 6.2), ενώ οι ιδιότητές του φαίνονται στην Εικόνα 6.3.

6 Στραγγιζόμενη και μη Στραγγιζόμενη συμπεριφορά στο Plaxis.



Εικόνα 6.3: Πρώτο μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης στο Plaxis.



Εικόνα 6.4: Ιδιότητες του υλικού.

Στο Πίνακα 6.1 παρατηρείται η κατανομή των ολικών και ενεργών τάσεων, των υδροστατικών πιέσεων και των υπερπιέσεων των πόρων, με τοποθέτηση του υδροφόρου ορίζοντα σε 3 διαφορετικές θέσεις και σε κάθε περίπτωση επιλέγοντας για το έδαφος, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι άργιλος, στραγγιζόμενη και μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά. Έτσι προκύπτουν συνολικά 6 διαφορετικά μοντέλα. Εδώ γίνεται σύγκριση στη διαφορετική αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος, όσον αφορά την άνοδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Αναλυτικότερα θεωρείται ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει ανέβει λόγω βροχοπτώσεων.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τρεις φάσεις επίλυσης, οι συνολικοί πολλαπλασιαστές (total multipliers), η σταδιακή κατασκευή (staged construction) και η μείωση των παραμέτρων αντοχής ( $\phi$ -c reduction).

- Στην περίπτωση των συνολικών πολλαπλασιαστών ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων. Τα μέγιστα φορτία που ορίζονται από τους συνολικούς πολλαπλασιαστές φόρτισης, εφαρμόζονται ακριβώς στο τέλος κάθε σταδίου υπολογισμών, δεδομένου ότι δεν έχει εμφανιστεί προηγουμένως μηχανισμός θραύσης ή αποφόρτισης.
- Στην περίπτωση της σταδιακής κατασκευής, ο χρήστης ορίζει την τελική κατάσταση κάθε σταδίου μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του προτύπου ή την πίεση των πόρων. Η διαδικασία αυτή δίνει μία ρεαλιστική προσέγγιση στη συμπεριφορά των εδαφών έπειτα από την διαφόρων κατασκευαστικών έργων ή εκσκαφών. Εκτός από τη μεταβολή της πίεσης των πόρων και της γεωμετρίας του προτύπου, μπορούν επίσης να μεταβληθούν και οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών που συμμετέχουν στο πρότυπο. Για τον προσδιορισμό του κάθε σταδίου κατασκευής, ο χρήστης επιστρέφει στο πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων μέσα από το πρόγραμμα υπολογισμών και ενεργοποιεί η απενεργοποιεί διάφορα στοιχεία (κατασκευαστικά ή εδαφικά) του αρχικού εδαφικού προτύπου. Επίσης δίνεται η πιθανότητα στο χρήστη να υποβιβάσει τον υδροφόρο ορίζοντα ώστε να μεταβάλει την πίεση των πόρων.
- Η ανάλυση της ευστάθειας στο Plaxis μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας τις παραμέτρους αντοχής των εδαφικών υλικών ( $\phi$ -c reduction). Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση που χρησιμοποιείται επίλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών. Ο παράγων χρόνος δε λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση αυτή. Η διαδικασία αυτή γίνεται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανούς ή μίας κατασκευής. Ο συνολικός πολλαπλασιαστής  $\Sigma Msf$  χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων αντοχής σε ένα δεδομένο στάδιο της ανάλυσης.

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (6.16)$$

όπου:

$\phi_{input}$  = η αρχική γωνία εσωτερικής τριβής του εκάστοτε εδαφικού υλικού (°),

$\phi_{reduced}$  = η μειωμένη τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής, σε κάθε στάδιο της ανάλυσης (°),

$c_{input}$  = η αρχική συνοχή των υλικών (kPa),

$c_{reduced}$  = η μειωμένη συνοχή των υλικών σε κάθε στάδιο της ανάλυσης (kPa).

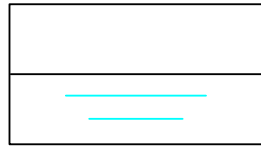
Στην αρχή κάθε επίλυσης, η τιμή του παράγοντα  $\Sigma Msf$  τίθεται ίση με 1,0 έτσι όλες οι παράμετροι των υλικών να έχουν αρχικά τις μη μειωμένες τιμές. Οι παράμετροι αντοχής μειώνονται αυτόματα μέχρι αστοχίας της κατασκευής και στο σημείο αυτό ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \Sigma Msf \text{ at failure} \quad (6.17)$$

Η προσέγγιση αυτή παρομοιάζεται με τη μέθοδο υπολογισμών του συντελεστή ασφάλειας που χρησιμοποιείται συμβατικά στις αναλύσεις κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης (Καλογήρου, 2003).

Ακολουθεί η περιγραφή των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Κάποιες από αυτές ολοκληρώθηκαν σε τρία στάδια ενώ κάποιες άλλες ολοκληρώθηκαν σε τέσσερα στάδια:

- Αρχικά, ο υδροφόρος είναι χαμηλά στα 25 m (πριν τη βροχόπτωση) και γίνεται μια πρώτη ανάλυση της κατανομής των τάσεων για τις δύο περιπτώσεις, στραγγιζόμενης και μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς. Εδώ πραγματοποιούνται τρεις φάσεις επίλυσης.



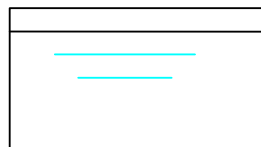
Εικόνα 6.5: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα για την πρώτη περίπτωση επίλυσης.

- Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση ο υδροφόρος είναι αρχικά χαμηλά στα 25 m και ανεβαίνει σε ένα στάδιο στα 40 m (δυνατότητα που δίνει το Plaxis). Πάλι γίνεται επίλυση και για τις 2 περιπτώσεις μόνο που εδώ η επίλυση γίνεται σε τέσσερις φάσεις (εδώ η φάση της σταδιακής κατασκευής χρησιμοποιείται δύο φορές).



Εικόνα 6.6: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα για τη δεύτερη περίπτωση επίλυσης.

- Τέλος εξετάζεται η περίπτωση όπου έχει ήδη βρέξει και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα 40m. Αυτή η επίλυση αποτελείται από τρεις φάσεις.



Εικόνα 6.7: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα για την τρίτη περίπτωση επίλυσης.

Είναι γνωστό ότι οι τάσεις δίνονται από τον τύπο:  $\sigma = \gamma * z$ , όπου  $\gamma$  το ξηρό ή υγρό μοναδιαίο βάρος ανάλογα και  $z$  η απόσταση από την επιφάνεια. Η πίεση των πόρων δίνεται από τη σχέση:  $p = \gamma_{\text{νερού}} * h$ , όπου  $h$  το ύψος στήλης του νερού. Οι ολικές τάσεις και οι πιέσεις πόρων συνδέονται με τις ενεργές τάσεις με την εξίσωση 6.5.

Από τις παραπάνω επιλύσεις και τον Πίνακα 6.1 προέκυψαν κάποια συμπεράσματα. Έτσι οι ολικές τάσεις υπολογίζονται με βάση τα ξηρά μοναδιαία βάρη των υλικών, όταν αυτά βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και τα κορεσμένα μοναδιαία βάρη όταν τα στρώματα βρίσκονται κάτω από αυτόν. Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος ανυψώνεται σε ένα στάδιο (staged construction), ενώ στην αρχή είναι χαμηλά, γίνεται ξανά

*6 Στραγγιζόμενη και μη Στραγγιζόμενη συμπεριφορά στο Plaxis.*

υπολογισμός των ολικών τάσεων με βάση τα μοναδιαία βάρη που προκύπτουν. Άρα το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται την αλλαγή της στάθμης του νερού χρησιμοποιώντας το υγρό μοναδιαίο βάρος για τις περιοχές εκείνες που πριν το ανέβασμα της στάθμης είχε χρησιμοποιηθεί το αντίστοιχο ξηρό μοναδιαίο βάρος.



**Πίνακας 6.1: Κατανομή τάσεων για το πρώτο μοντέλο σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιλύσεων για στραγγιζόμενη και αστράγγιστη συμπεριφορά στο Plaxis.**

MONTEΛΑ	Στάδια	Total stresses Ολικές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Effective stresses Ενεργές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Active pore pressures=steady+excess Πιέσεις πόρων = πιέσεις σταθερής κατάστασης +υπερπιέσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Excess pore pressures Υπερπιέσεις πόρων (kN/m <sup>2</sup> )
Με υδροφόρο στα 25 m (σταθ.) στραγγιζόμενη συμπεριφορά 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους (gravity loading)	844.33=16*25 +18*25	597.52	246.81	0
	Σταδιακή κατασκ. (st. Construction)	844.33	597.52	246.81	0
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ (phi-c reduction)	844.32	597.51	246.81	0
Με υδροφόρο στα 25 m (σταθ.) Αστράγγιστη συμπεριφορά 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	844.33	597.52	246.81	0
	Σταδιακή κατασκ	844.33	597.52	246.81	+5.37*10 <sup>-12</sup>
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	844.38	419.31	425.07=246.81+178.26	+178.26
Με ανύψωση του υδροφόρου στα 40 m drained 4 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	844.33	597.52	246.81	0
	Σταδιακή κατασκ	874.26	477.45	396.81	0
	Σταδιακή κατασκ	874.26	477.45	396.81	0
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	874.40	477.59	396.81	
Με ανύψωση του υδροφόρου στα 40 m undrained 4 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	844.33	597.52	246.81	0
	Σταδιακή κατασκ	874.26=16*10 +18*40	592.36	281.92	+115.29
	Σταδιακή κατασκ	874.26=16*10 +18*40	592.36	281.92	+115.29
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	874.34	415.93	458.42	+61.67

**Πίνακας 6.1 (συνέχεια): Κατανομή τάσεων για το πρώτο μοντέλο σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιλύσεων για στραγγιζόμενη και αστράγγιστη συμπεριφορά στο Plaxis.**

MONTEΛΑ	Στάδια	Total stresses Ολικές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Effective stresses Ενεργές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Active pore pressures=steady+excess Πιέσεις πόρων = πιέσεις σταθερής κατάστασης +υπερπιέσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Excess pore pressures Υπερπιέσεις πόρων (kN/m <sup>2</sup> )
Με υδροφόρο στα 40 m (σταθ.) drained 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	874.26	477.45	396.81	0
	Σταδιακή κατασκ	874.26	477.45	396.81	0
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	874.43	477.62	396.81	0
Με υδροφόρο στα 40 m (σταθ.) Undrained 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	874.26	477.45	396.81	0
	Σταδιακή κατασκ	874.26	477.45	396.81	0
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	874.39	352.19	522.21	+125.4
Υψος=50 m      γ <sub>dry</sub> =16 kN/m <sup>3</sup> γ <sub>wet</sub> =18 kN/m <sup>3</sup>					

Η πρώτη φάση υπολογισμών είναι το στάδιο επιβολής του ιδίου βάρους, όπου υπολογίζονται οι παραμορφώσεις του υλικού κάτω από το ίδιο του το βάρος. Στην περίπτωση που έχει οριστεί μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά για κάποιο εδαφικό υλικό θα πρέπει να τσεκαριστεί στο παράθυρο των υπολογισμών η επιλογή 'ignore undrained behavior' (αγνόησε τη μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά). Αυτό γίνεται για αποφυγή δημιουργίας υπερπιέσεων των πόρων οι οποίες δεν είναι ρεαλιστικές γιατί το στάδιο αυτό είναι μία πολύ αργή διαδικασία οπότε και δε διατηρούνται υπερπιέσεις των πόρων. Επομένως σε αυτό το στάδιο δεν υπάρχει διαφορά στον υπολογισμό των τάσεων είτε το υλικό έχει στραγγιζόμενη είτε αστράγγιστη συμπεριφορά.

Επίσης παρατηρείται πως όπως είναι φυσικό υπερπιέσεις πόρων αναπτύσσονται μόνο όταν η συμπεριφορά του υλικού έχει χαρακτηριστεί αστράγγιστη. Αν συγκριθούν οι δύο περιπτώσεις, η πρώτη όπου αρχικά ο υδροφόρος είναι χαμηλά και ανυψώνεται σε στάδιο και η δεύτερη όπου ο υδροφόρος είναι από την αρχή ψηλά, παρατηρείται ότι υπάρχει διαφοροποίηση στις υπερπιέσεις των πόρων από το πρώτο στάδιο οπότε και οι ενεργές τάσεις που υπολογίζονται στη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερες, γεγονός που οδηγεί

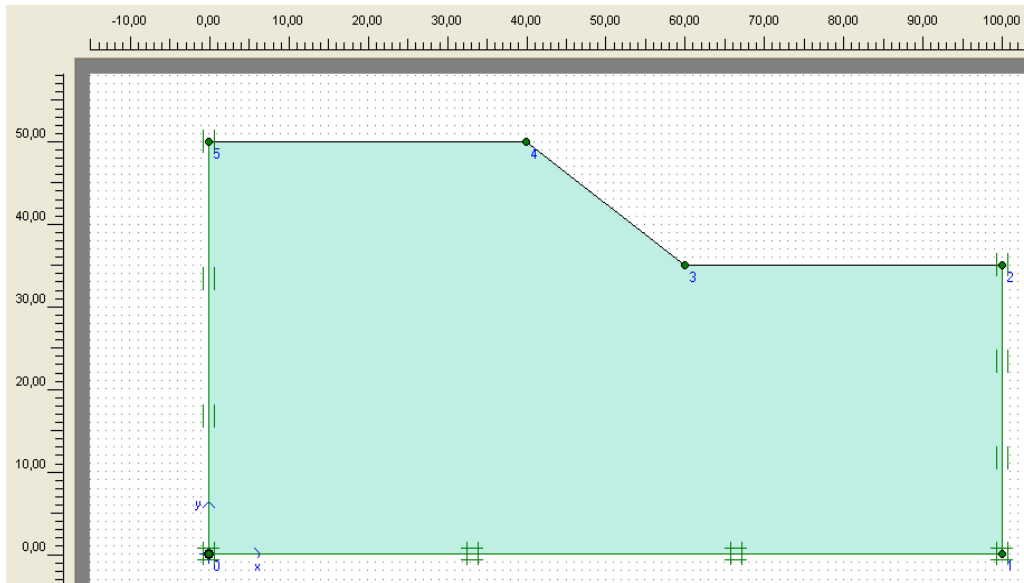
και στη μείωση της διατμητικής αντοχής και συνεπώς και σε μείωση του συντελεστή ασφάλειας όπως θα φανεί στη συνέχεια.

### 6.5.2 Μοντέλο 2

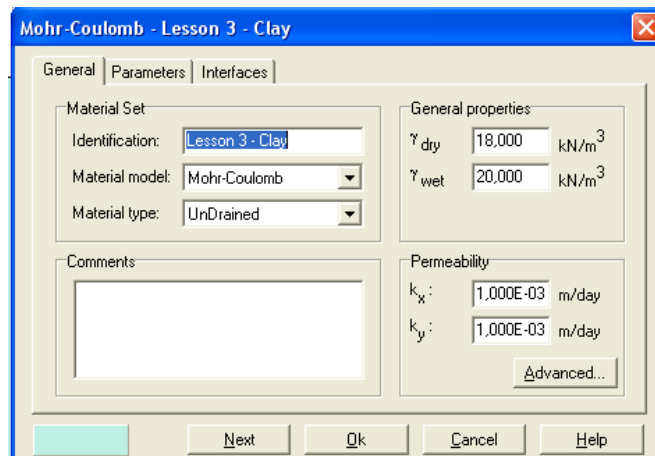
Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο είναι ένα πρανές με διαστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα 6.8 και ιδιότητες που φαίνονται στις Εικόνες 6.9 και 6.10 και 6.11. Ο λόγος που έγιναν οι ίδιες επιλύσεις στο πρανές αυτό είναι για να μπορέσει να γίνει σύγκριση μεταξύ των συντελεστών ασφάλειας για κάθε επίλυση, για τις περιπτώσεις που η συμπεριφορά του υλικού έχει οριστεί αστράγγιστη και για τις περιπτώσεις όπου έχει οριστεί στραγγιζόμενη. Ο Πίνακας 6.2 με τις κατανομές των τάσεων και τους συντελεστές ασφαλείας προέκυψε για τις ίδιες επιλύσεις με το μοντέλο 1.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την περίπτωση διαφορετικές παράμετροι για την περίπτωση που το έδαφος έχει στραγγιζόμενη συμπεριφορά (ολικές), και οι αντίστοιχες ενεργές για επίλυση θεωρώντας αστράγγιστη συμπεριφορά, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας μεταξύ των 2 αυτών επιλύσεων για κάθε περίπτωση. Οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται ελήφθησαν από βιβλιογραφία (Smith, 1990).

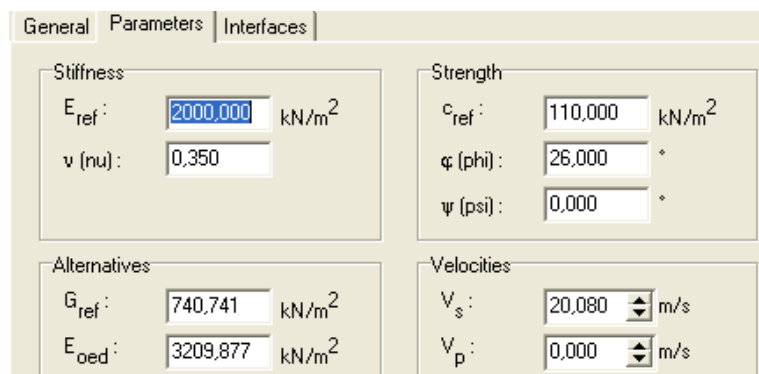
6 Στραγγιζόμενη και μη Στραγγιζόμενη συμπεριφορά στο Plaxis.



Εικόνα 6.8: Γεωμετρία του πρανού στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι επιλύσεις στο Plaxis.



Εικόνα 6.9: Παράθυρο διαλόγου όπου προσδιορίζονται οι ιδιότητες του υλικού.



Εικόνα 6.10: Ενεργές παράμετροι για επίλυση με αστράγγιστη συμπεριφορά.

Stiffness	Strength
$E_{ref}$ : 2000,000 kN/m <sup>2</sup>	$c_{ref}$ : 220,000 kN/m <sup>2</sup>
$\nu$ (nu): 0,350	$\phi$ (phi): 12,000 °
	$\psi$ (psi): 0,000 °

Alternatives	Velocities
$G_{ref}$ : 740,741 kN/m <sup>2</sup>	$V_s$ : 20,080 m/s
$E_{oed}$ : 3209,877 kN/m <sup>2</sup>	$V_p$ : 0,000 m/s

Advanced...

Εικόνα 6.11: Ολικές παράμετροι για επίλυση με στραγγιζόμενη συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2 παρατηρείται ότι σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις όταν γίνεται επίλυση για αστράγγιστη συμπεριφορά προκύπτει μικρότερος συντελεστής ασφάλειας από την αντίστοιχη επίλυση με στραγγιζόμενη συμπεριφορά. Αυτό το αποτέλεσμα είναι απόλυτα λογικό αφού στην αστράγγιστη συμπεριφορά δημιουργούνται υπερπιέσεις των πόρων, οι οποίες προκαλούν μείωση των ενεργών τάσεων, που οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

Ωστόσο εάν γίνει σύγκριση ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις όπου στη μία αρχικά ο υδροφόρος είναι χαμηλά και στη συνέχεια ανεβαίνει η στάθμη και στην άλλη ο υδροφόρος είναι ψηλά από την αρχή της επίλυσης παρατηρούμε μία ‘περίεργη’ συμπεριφορά του προγράμματος. Ενώ στην περίπτωση που η ανάλυση γίνεται θεωρώντας στραγγιζόμενη συμπεριφορά παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας είναι ίδιος και ίσος με 4.32 αυτό δε συμβαίνει και στην περίπτωση που η επίλυση γίνεται θεωρώντας αστράγγιστη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι όταν ο υδροφόρος είναι χαμηλά (25 m) και ανεβαίνει σε ένα στάδιο (49 m) προκύπτει μεγαλύτερος συντελεστής ασφάλειας ( $F.S. = 3.22$ ), από την περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι από την αρχή στα 49 μέτρα ( $F.S. = 2.94$ ). Μπορεί η διαφορά αυτή να μη φαίνεται πολύ μεγάλη, είναι όμως σημαντική όταν πρόκειται για περιπτώσεις όπου η ισορροπία ενός πρανούς για παράδειγμα είναι οριακή. Παρατηρώντας την κατανομή των τάσεων και στα δύο μοντέλα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η διαφορά αυτή οφείλεται στις υπερπιέσεις των πόρων.

Συγκεκριμένα στο στάδιο όπου γίνεται το ‘ανέβασμα’ της στάθμης του υδροφόρου δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων οι οποίες όπως φαίνεται και στους δύο πίνακες αφαιρούνται από τη νέα υδροστατική πίεση που προκύπτει ανεβάζοντας τον υδροφόρο, αντί να προστίθενται σε αυτές για να υπολογιστούν τελικά οι ολικές πιέσεις των πόρων, όπως υπολογίζονται από τον τύπο  $\sigma_w = p_{\text{steady}} + p_{\text{excess}}$ .

**Πίνακας 6.2: Κατανομή τάσεων και συντελεστές ασφάλειας για το δεύτερο μοντέλο σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιλύσεων για στραγγιζόμενη και αστράγγιστη συμπεριφορά στο Plaxis.**

	Στάδια	Ολικές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Ενεργές τάσεις (kN/m <sup>2</sup> )	Πιέσεις πόρων (πιέσεις σταθερής κατάστασης + υπερπιέσεις πόρων) (kN/m <sup>2</sup> )	Υπερ-πιέσεις πόρων (kN/m <sup>2</sup> )	S.F.
Στραγγιζόμενη συμπεριφορά με υδροφόρο στα 40 m 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους (gravity loading)	953,93	549,13	406,56	0	4,97
	Σταδιακή κατασκ. (st. Construction)	953,56	548,76	406,56	0	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ (phi-c reduction)	953,21	643,6	406,56	0	
Αστράγγιστη συμπεριφορά με υδροφόρο στα 40 m 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	953,69	548,89	406,56	0	3,47
	Σταδιακή κατασκευή	953,69	548,89	406,56	1,63	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	973,39	498,04	686,48	560,76	
Στραγγιζόμενη συμπεριφορά με ανέβασμα του υδροφόρου στα 49 m 4 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	952,6	557,8	396,56	0	4,32
	Σταδιακή κατασκευή	962,14	477,33	486,56	0	
	Σταδιακή κατασκευή	962,14	477,33	486,56	0	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	969,66	549,98	486,56	0	
Αστράγγιστη συμπεριφορά με ανέβασμα του υδροφόρου στα 49 m 4 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	952,41	557,61	396,56	0	3,22
	Σταδιακή κατασκευή	968,67	554,67	416,12	(pos.)73,39	
	Σταδιακή κατασκευή	968,67	554,67	416,12	(pos.)73,39	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	1330	511,97	981,08	(pos)979,98	
Στραγγιζόμενη συμπεριφορά με υδροφόρο στα 49 m 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	962,46	477,65	486,56	0	4,32
	Σταδιακή κατασκευή	963,14	478,34	486,56	0	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	970,74	549,98	486,56	0	
Αστράγγιστη συμπεριφορά με υδροφόρο στα 49 m 3 φάσεις	Στάδιο επιβολής του βάρους	962,68	477,88	486,56	0	2,94
	Σταδιακή κατασκ.	962,72	477,88	486,56	(pos)8,62	
	Στάδιο μείωσης των παραμέτρων c και φ	1520	458,28	1210	(pos)1150	

Συνοψίζοντας, παρατίθεται ο Πίνακας 6.3 όπου παρουσιάζονται συνολικά οι μέθοδοι ανάλυσης για τον προσδιορισμό της επίδρασης του ύδατος στο έδαφος στο Plaxis. Στον πίνακα αυτό δίνονται οι παράμετροι που απαιτούνται για τους υπολογισμούς, τα πεδία εφαρμογής κάθε μεθόδου καθώς και τα μεγέθη τα οποία παραλαμβάνονται στα αποτελέσματα. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να κριθεί η αξιοπιστία κάθε μεθόδου για την αντιμετώπιση διαφορετικών γεωτεχνικών προβλημάτων στο Plaxis.

**Πίνακας 6.3 Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης για τον προσδιορισμό της επίδρασης του ύδατος στο Plaxis.**

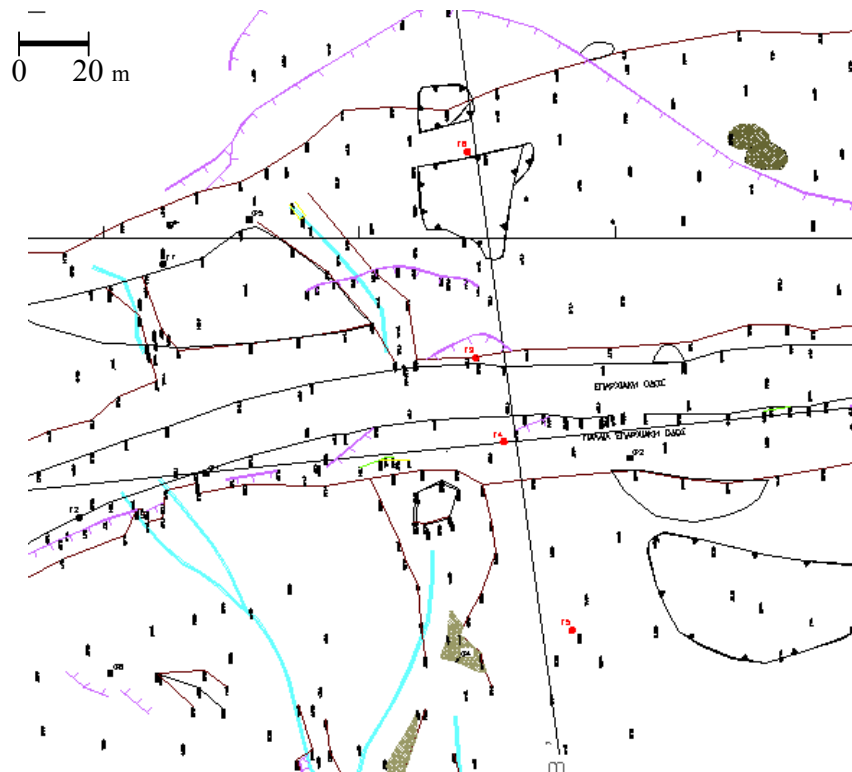
Επιλύσεις	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται	Πεδία εφαρμογής	Μεγέθη που παραλαμβάνονται κατά τα αποτελέσματα
Στραγγιζόμενη συμπεριφορά	$E, \nu, \phi, c$ (ολικά)	Η περατότητα είναι μεγάλη Ο ρυθμός φόρτισης μικρός. Εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα από την αλλαγή της εντατικής κατάστασης.	Ολικές τάσεις Ενεργές τάσεις Πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης
Μη Στραγγιζόμενη συμπεριφορά με ενεργές παραμέτρους	$E', \nu', \phi', c'$	Η περατότητα είναι μικρή Ο ρυθμός φόρτισης μεγάλος. Εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους για μικρό χρονικό διάστημα.	Ολικές τάσεις Ενεργές τάσεις Πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης Υπερπιέσεις των πόρων
Μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά με ολικές παραμέτρους	$E', \nu'$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>\phi, c</math> (ολικά)</div>	Στις ίδιες περιπτώσεις όπως και στην μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά με ενεργές παραμέτρους, Μόνο που εδώ δεν έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τις ενεργές παραμέτρους κάποιων εδαφικών υλικών	Ολικές τάσεις Ενεργές τάσεις Πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης Υπερπιέσεις των πόρων
Μη πορώδες υλικό	$E, \nu$ , (ολικά) $c_{ολικό} \text{ και } \phi=0$	Εφαρμογές για προσομοίωση βράχου ή κατασκευών από σκυρόδεμα. Σε συνδυασμό με την επιλογή του γραμμικά ελαστικού μοντέλου για την ανάλυση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς στο Plaxis με ολικές παραμέτρους με $\phi=0$	Ολικές τάσεις



## 7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

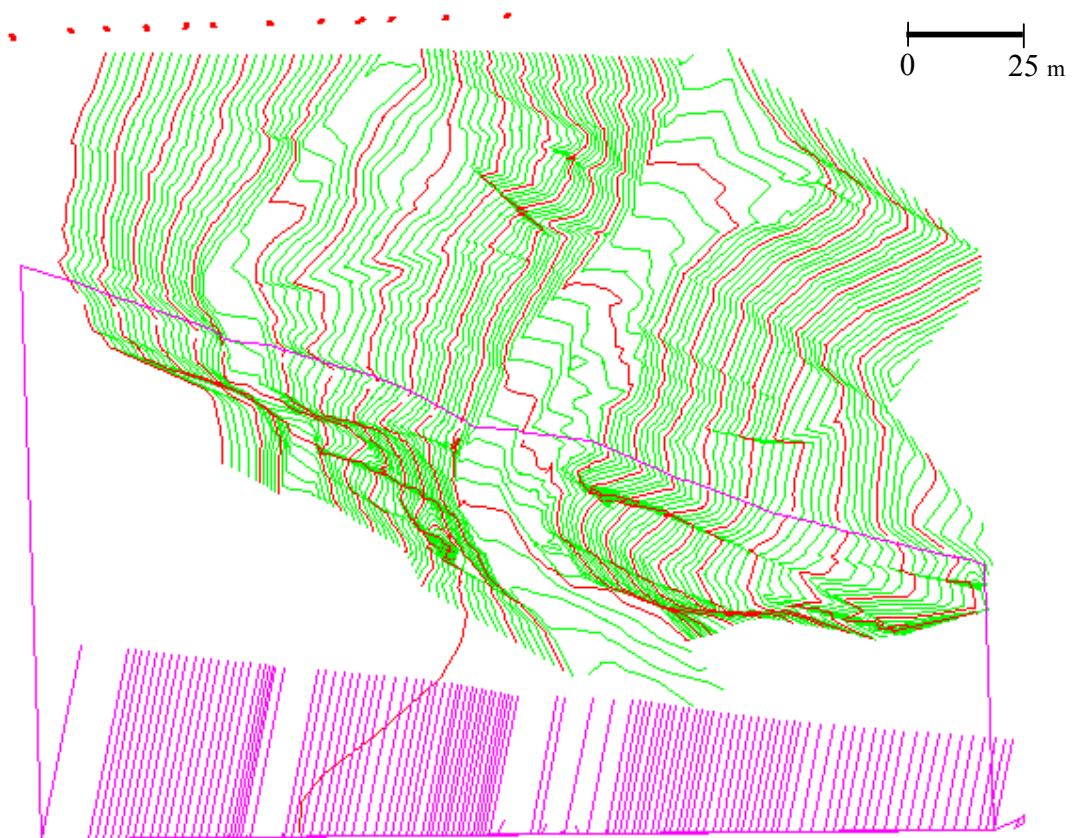
### 7.1 Γενικά

Πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση της τομής  $B B'$  η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 7.1 όπου διακρίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων πάνω στη τομή, η οποία έχει κατεύθυνση Β.Δ.-Ν.Α. Οι θέσεις των γεωτρήσεων εκατέρωθεν της τομής εμφανίζονται με κόκκινες κουκίδες, ενώ τα όρια της κατολίσθησης διακρίνονται με τη μοβ γραμμή.



Εικόνα 7.1: Τομή  $B B'$  και θέσεις των γεωτρήσεων.

Για την μοντελοποίηση του υπό εξέταση πρανού, αρχικά δημιουργήθηκε τομή του πρανού στο σχεδιαστικό πακέτο “AutoCAD” σε κλίμακα 1:1 (Εικόνα 7.2).



**Εικόνα 7.2 : Τομή  $BB'$  στο Autocad όπου διακρίνονται και οι ισοψείς. .**

Για τη δημιουργία της τομής αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις  $\Gamma_6$ ,  $\Gamma_3$ ,  $\Gamma_4$  και  $\Gamma_5$ , οι οποίες παρέχουν πληροφορίες για τη διάταξη των γεωλογικών στρωμάτων. Στις γεωτρήσεις  $\Gamma_3$ ,  $\Gamma_4$  και  $\Gamma_5$  έχουν τοποθετηθεί αποκλισιόμετρα, ενώ στη γεώτρηση  $\Gamma_6$  έχει τοποθετηθεί πιεζόμετρο. Στην Εικόνα 7.3 διακρίνονται οι πληροφορίες που παρέχει η γεώτρηση  $\Gamma_6$ .

### 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

[illegible]

**Εικόνα 7.3:** Προφίλ γεωτρήσεως Γ<sub>6</sub>

Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφονται συνοπτικά οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα των επιμέρους γεωτρήσεων, προκειμένου να χαρακτηριστούν τα υλικά ως προς τις ιδιότητές τους.

## 7.2 Δοκιμές που Πραγματοποιήθηκαν στα Δείγματα των Γεωτρήσεων

### 7.2.1 Αποκλιτισιομετρικές Μετρήσεις

Το αποκλισιόμετρο ή αλλιώς κλισιόμετρο είναι ένα ηλεκτρονικό εκκρεμές, το οποίο έχει τη δυνατότητα να μετρά σε διάφορα βάθη, εντός της στήλης αναφοράς, την απόκλιση από την κατακόρυφο, ελέγχοντάς την σε σχέση με την αρχική της θέση (πρώτη μέτρηση). Οι προοδευτικές αποκλίσεις από την κατακόρυφο ανάγονται σε εδαφικές μετακινήσεις στο περιβάλλον έδαφος. Οι μετρήσεις λαμβάνονται κάθε φορά στα ίδια

### *7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.*

βάθη και με τον ίδιο προσανατολισμό του οργάνου για να είναι μετρήσιμα τα αποτελέσματα. Οι μετρήσεις παίρνονται ανά ζεύγη σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Η συχνότητα των μετρήσεων εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου. Οι μετρήσεις έγιναν με εξοπλισμό της εταιρείας ‘slope indicator’ και χρησιμοποιήθηκε τορπίλη διαξονικού αισθητήρα, που συνδέεται μέσω κατάλληλου καλωδίου με τη ψηφιακή συσκευή καταγραφής. Με τη συσκευή αυτή μετράται η απόκλιση εδαφικού τμήματος από την κατακόρυφο για κάθε γεώτρηση, ανά διάστημα (βάθος) μισού ( $\frac{1}{2}$ ) μέτρου και η τυχόν απόκλιση προς τις τέσσερις (4) διευθύνσεις του ορίζοντα σε άξονες Β - Ν και Α - Δ. Οι μετρήσεις της απόκλισης είναι της τάξης από υποπολλαπλάσια του χιλιοστού (mm) και μεγαλύτερες, ενώ το εύρος σφάλματος, που οριοθετεί ο κατασκευαστής του οργάνου, είναι  $\pm 10^{-3}$  rad ή  $\pm 10^{-3}$  mm περίπου.

Τα βάθη στα οποία παρατηρείται το επίπεδο ολίσθησης για την κύρια κατολίσθηση είναι για την αντίστοιχη γεώτρηση τα παρακάτω:

**Γ1:** 7,00 m, **Γ3:** 5,00 m, **Γ4:** 10,00 m και **Γ5:** 9,50 m.

Για την δευτερεύουσα κατολίσθηση τα αντίστοιχα βάθη είναι:

**Γ3:** 2,00 m, **Γ4:** 5,50 m, **Γ5:** 2,50 m.

#### *7.2.2 Μετρήσεις Διαπερατότητας*

Οι πιεζομετρικοί φιλτροσωλήνες που έχουν τοποθετηθεί στη γεώτρηση Γ<sub>6</sub> είναι πωματισμένοι στο κάτω άκρο τους, διάτρητοι σε όλο το μήκος τους και κλειστοί στο άνω άκρο με πώμα και κλειδαριά για τη μέτρηση της πίεσης πόρων σε διάφορα βάθη και διάφορες χρονικές περιόδους.

Επίσης, για τη μέτρηση της διαπερατότητας έχουν πραγματοποιηθεί οι επί τόπου δοκιμές διαπερατότητας Maag και Lefranc κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων, ανάλογα με τη φύση των διατρηόμενων σχηματισμών.

Η δοκιμή Maag εκτελείται σε σχετικά μικρής διαπερατότητας σχηματισμούς και είναι δοκιμή υδροπερατότητας μεταβλητού φορτίου (μέτρηση ταχύτητας πτώσης στάθμης προστεθέντος νερού μέσα στη γεώτρηση).

### *7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.*

Η δοκιμή Lefranc εκτελείται σε σχετικά διαπερατούς σχηματισμούς και είναι δοκιμή υδροπερατότητας σταθερού φορτίου (μέτρηση παροχής προστιθέμενου νερού για τη διατήρηση της στάθμης σε συγκεκριμένη θέση πάνω από τον υδροφόρο) (Κανάρης, 2006).

#### *7.2.3 Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης*

Η δοκιμή τυπικής διείσδυσης SPT, χρησιμοποιείται στα περισσότερα εδάφη, θεωρείται όμως ιδιαίτερα κατάλληλη για τις άμμους και ειδικότερα τις λεπτές άμμους χωρίς παρουσία λίθων και χαλίκων. Βασικό στοιχείο του εξοπλισμού είναι ένας πρότυπος δειγματολήπτης με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 2 και 1.3/8 της ίντσας αντίστοιχα, ο οποίος τοποθετείται αρχικά στον πυθμένα της γεώτρησης και εισχωρεί στο έδαφος δεχόμενος στην κεφαλή του τα χτυπήματα πρότυπου βάρους 140 lbs, οποίο πέφτει ελεύθερα από ύψος 30''. Χαρακτηριστική ένδειξη-αποτέλεσμα της δοκιμής, είναι ο αριθμός των κτύπων  $N$  ή  $N_{SPT}$ , ο οποίος απαιτείται για την προχώρηση του δειγματολήπτη κατά 30 cm. Συχνά στα φύλλα των γεωτρήσεων δεν αναγράφεται ο αριθμός  $N$  αλλά ο αριθμός των κτύπων για κάθε 15 cm εισχώρησης, συμπεριλαμβανομένης ενίοτε και της αρχικής. Ο αριθμός  $N$  έχει σχέση με τη σχετική πυκνότητα των κοκκωδών εδαφών και η μέτρησή του επιτρέπει την έμμεση εκτίμηση της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$ . Παράλληλα για τα συνεκτικά εδάφη έχουν προταθεί σχέσεις μεταξύ του  $N$  και της αστράγγιστης συνοχής  $c_u$ . Παρότι η δοκιμή είναι απλή, πολύ συνηθισμένη και υπάρχει μακρόχρονη εμπειρία συχνά γίνονται σφάλματα (διαφοροποίηση του ύψους της πτώσης του βάρους, παρεμπόδιση της πτώσης κ.α.). Η σχέση μεταξύ  $N$  και  $\phi$  για κοκκώδη εδάφη είναι περισσότερο αξιόπιστη από ότι η σχέση  $N$  και  $c_u$  για τα συνεκτικά. Το βάθος εκτέλεσης της δοκιμής και η τυχόν παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζουν το αποτέλεσμα και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

## *7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.*

### *7.2.4 Προσδιορισμός Κοκκομετρίας, Φυσικής Υγρασίας και Ορίων Atterberg*

Η κοκκομέτρηση πραγματοποιήθηκε με κόσκινα, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο D 422-63 (1992) της A.S.T.M σε αντιπροσωπευτικά εδαφικά δείγματα. Η κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα γίνεται στο ποσοστό του υλικού που συγκρατείται από το κόσκινο No.200 (0,074 mm). Η μέση αναλογία στα υλικά στα οποία έγινε κοκκομέτρηση είναι: 20% χάλικες, 50% άμμος και 30% λεπτόκοκκα υλικά (άργιλος και ιλύς).

Ο προσδιορισμός της φυσικής υγρασίας έγινε σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο D 2216-90 (1992) της A.S.T.M.

Τα όρια Atterberg, είναι:

- Το όριο Υδαρότητας (LL). Η περιεκτικότητα σε νερό που ορίζει την υδαρή από την πλαστική κατάσταση του εδάφους καλείται όριο υδαρότητας. Η δοκιμή γίνεται σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο D 4318-84 (1992) της A.S.T.M σε υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No.40 (0,42 mm).
- Το όριο Πλαστικότητας (PL). Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας το έδαφος θα σταματήσει να επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά και θα αρχίσει να παραμορφώνεται δύσκολα (ημιστερεή κατάσταση) και τελικά 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. Η δοκιμή γίνεται σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο D 4318-84 (1992) της A.S.T.M σε υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No.40 (0,42 mm).

Ο δείκτης πλαστικότητας (PI) ορίζεται ίσος με τη διαφορά των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας.

### *7.2.5 Πυρηνοληψία και Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος*

Επίσης από τις γεωτρήσεις προκύπτουν πληροφορίες για την πυρηνοληψία και το RQD (rock quality designation). Τα είδη της πυρηνοληψίας είναι η ολική πυρηνοληψία (TCR) και η στερεή πυρηνοληψία (SCR).

### *7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.*

Η ολική πυρηνοληψία (TCR) ισούται με το άθροισμα του μήκους των πυρήνων (μεγαλύτερων και μικρότερων των 10 cm) όπως επίσης και των θραυσμάτων του πετρώματος, προς το μήκος της δειγματοληψίας.

Η στερεή πυρηνοληψία (SCR) ορίζεται ως το άθροισμα του μήκους των απολήψιμων πυρήνων δια του ολικού μήκους της δειγματοληψίας.

Ο δείκτης RQD προσδιορίζεται από το αθροιστικό μήκος των πυρήνων μιας γεώτρησης (διαμέτρου NX, δηλ. 54,7 mm ή και μεγαλύτερης) που έχουν μήκος μεγαλύτερο από 100 mm, προς το συνολικό μήκος διάτρησης, δηλαδή ισούται με:

$$RQD = \frac{\text{άθροισμα του μήκους όλων των πυρήνων που είναι } > 100mm}{\text{μήκος που διατρήθηκε}} \quad (7.1)$$

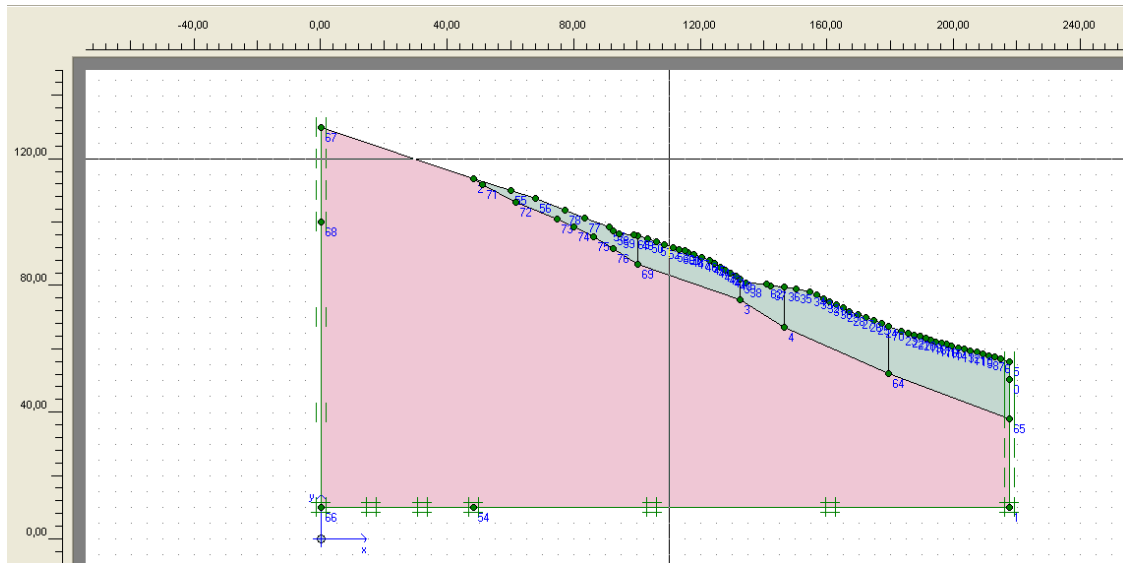
Εκφράζεται ποσοστιαία (%) και αποτελεί δείκτη ποιότητας της βραχομάζας και κριτήριο ταξινόμησής της.

## **7.3 Μοντελοποίηση του Προβλήματος**

### *7.3.1 Παρουσίαση του Πρανούς προς Επίλυση*

Για τη δημιουργία της τομής του πρανούς στο πρόγραμμα Plaxis έγινε ομογενοποίηση των γεωλογικών στρωμάτων, με βάση τις ιδιότητες που αυτά εμφανίζουν και τη γεωμετρία. Κατά την ομογενοποίηση εδαφικοί σχηματισμοί με παρόμοιες ιδιότητες, ομαδοποιούνται ώστε να αποτελούν ένα ενιαίο στρώμα, κυρίως για λόγους χωρικής συνέχειας και απλότητας του μοντέλου. Η γεωμετρία της τομής του πρανούς φαίνεται στην Εικόνα 7.4.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.4 Τελική τομή του πρανούς στο Plaxis

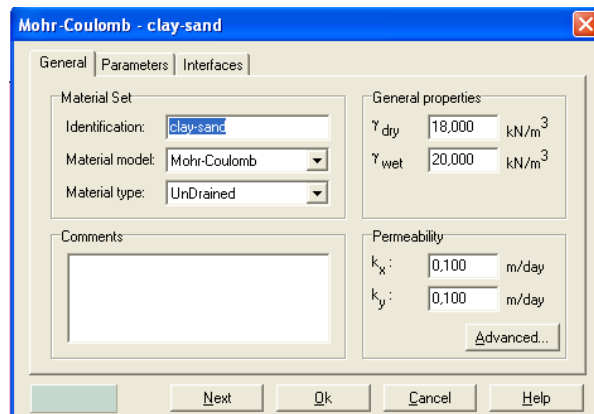
Όπως γίνεται αντιληπτό στην τομή της Εικόνας 7.4 διακρίνονται δύο εδαφικοί σχηματισμοί.

1. Το υπερκείμενο στρώμα είναι αυτό που αποτελείται από 20% χάλικες, 50% άμμο και 30% λεπτόκοκκα και χαρακτηρίζεται σύμφωνα με την κατάταξη U.S.C.S., η οποία λειτουργεί με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση, ως SC δηλαδή αργιλώδης άμμος ενώ έχει έντονη ανομοιογένεια. Οι ιδιότητές του φαίνονται στις Εικόνες 7.5 και 7.6

Εικόνα 7.5: Μέτρο ελαστικότητας E, λόγος Poisson ν, συνοχή c, και γωνία εσωτερικής τριβής φ, για τον υπερκείμενο εδαφικό σχηματισμό.

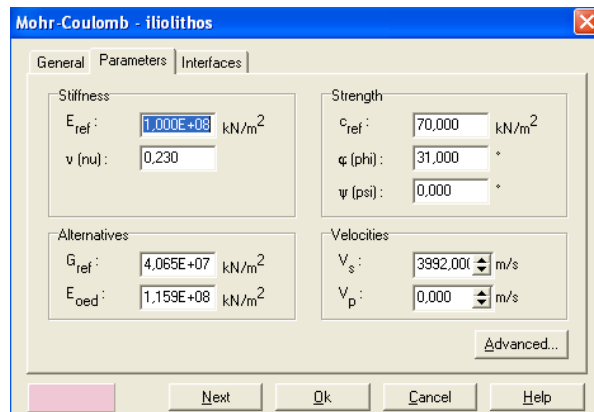


## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

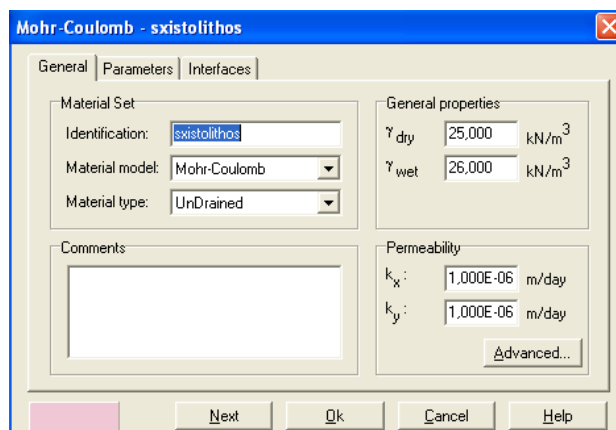


Εικόνα 7.6: Μοντέλο και τύπος υλικού, ειδικά βάρη και διαπερατότητες.

2. Το δεύτερο στρώμα είναι φυλλίτης κατακερματισμένος και εξαλλοιωμένος κατά θέσεις και οι ιδιότητές του φαίνονται στις Εικόνες 7.7 και 7.8



Εικόνα 7.7: Μέτρο ελαστικότητας  $E$ , λόγος Poisson  $\nu$ , συνοχή  $c$ , και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ , για το υποκείμενο στρώμα.



Εικόνα 7.8: Μοντέλο και τύπος υλικού, ειδικά βάρη και διαπερατότητες για τον υποκείμενο εδαφικό σχηματισμό.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

**Πίνακας 7.1: Ιδιότητες των δύο γεωλογικών σχηματισμών.**

Εδαφικός σχηματισμός	Τύπος υλικού	Συνοχή (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής, $\phi$	Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)	Λόγος Poisson, $\nu$	Ξηρό ειδικό βάρος (kN/m <sup>3</sup> )	Υγρό ειδικό βάρος (kN/m <sup>3</sup> )	Διαπερατότητες (m/day)
Αργιλώδης άμμος	Mohr-Coulomb	10	31	$8 \times 10^4$	0,25	18	20	0,1
Αργιλικός σχιστόλιθος	Mohr-Coulomb	70	31	$1 \times 10^8$	0,23	25	26	$1 \times 10^{-6}$

Και τα δύο στρώματα έχουν οριστεί να εμφανίζουν μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά εφόσον είναι ημιπερατά ως αδιαπέρατα και γίνεται βραχυπρόθεσμη ανάλυση της ευστάθειας αμέσως μετά τη βροχόπτωση, οπότε το εδαφικό υλικό δεν έχει αποστραγγίσει.

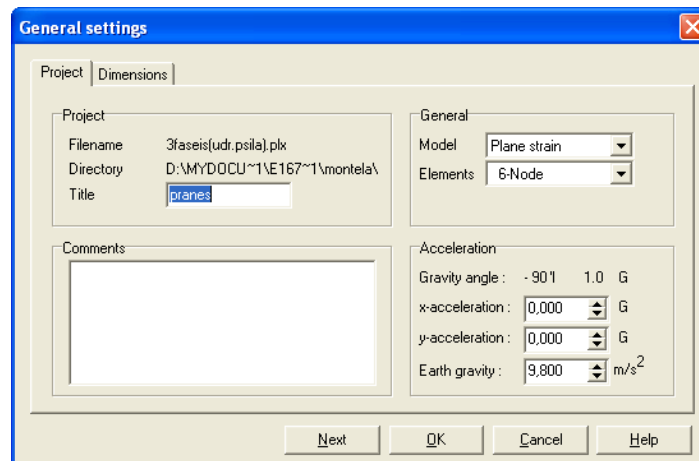
Πρέπει να σημειωθεί ότι στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων, εισάγονται οι ενεργές ιδιότητες των στρωμάτων. (Στειακάκης, 2006).

*Παρατήρηση:* οι ενεργές ιδιότητες αποδόθηκαν στους γεωλογικούς σχηματισμούς λαμβάνοντας υπ' όψη τις πληροφορίες που παρέχουν οι γεωτρήσεις και εμπειρικές τιμές από τη βιβλιογραφία, για παρόμοιους σχηματισμούς. Συγκεκριμένα η γωνία εσωτερικής τριβής που προκύπτει από τη δοκιμή ειδικής διείσδυσης θεωρήθηκε ασυνήθιστα υψηλή για το υπερκείμενο στρώμα και αποδόθηκε μία τιμή με βάση τη βιβλιογραφία η οποία θεωρείται πιο ρεαλιστική.

### 7.3.2 Βήματα που ακολουθούνται για τη Μοντελοποίηση του Πρανούς

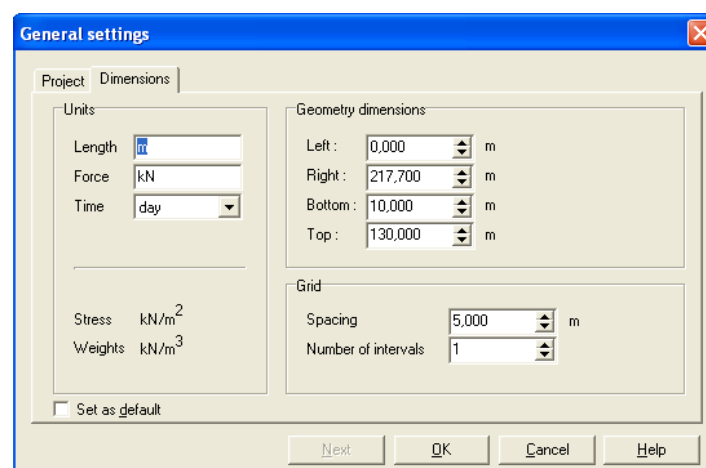
Αρχικά στο Plaxis εμφανίζεται το παράθυρο των γενικών ρυθμίσεων (General settings), (Εικόνα 7.9).

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.9: Παράθυρο γενικών ρυθμίσεων.

Όπως γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 7.9 έχουν επιλεγθεί τα εξακομβικά τριγωνικά στοιχεία τα οποία απαιτούν λιγότερο χρόνο για επίλυση από τα 15-κομβικά. Τα εξακομβικά στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρύτερα στη ανάλυση με δύο διαστάσεις. Επίσης η επίλυση γίνεται με παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης που δέχεται ότι η τρίτη διάσταση  $z$ , δεν είναι μικρή ως προς τις άλλες δύο, και τα φορτία που δέχεται το σώμα είναι πάνω στο επίπεδο  $(x,y)$ , άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση, καθώς επίσης και ότι τα διανύσματα μετατόπισης στο επίπεδο  $x,y$  είναι ανεξάρτητα από την τρίτη διάσταση (Αγιουτάντης, 2002). Ακόμη στο παράθυρο αυτό γίνεται δημιουργία του καννάβου (Εικόνα 7.10).



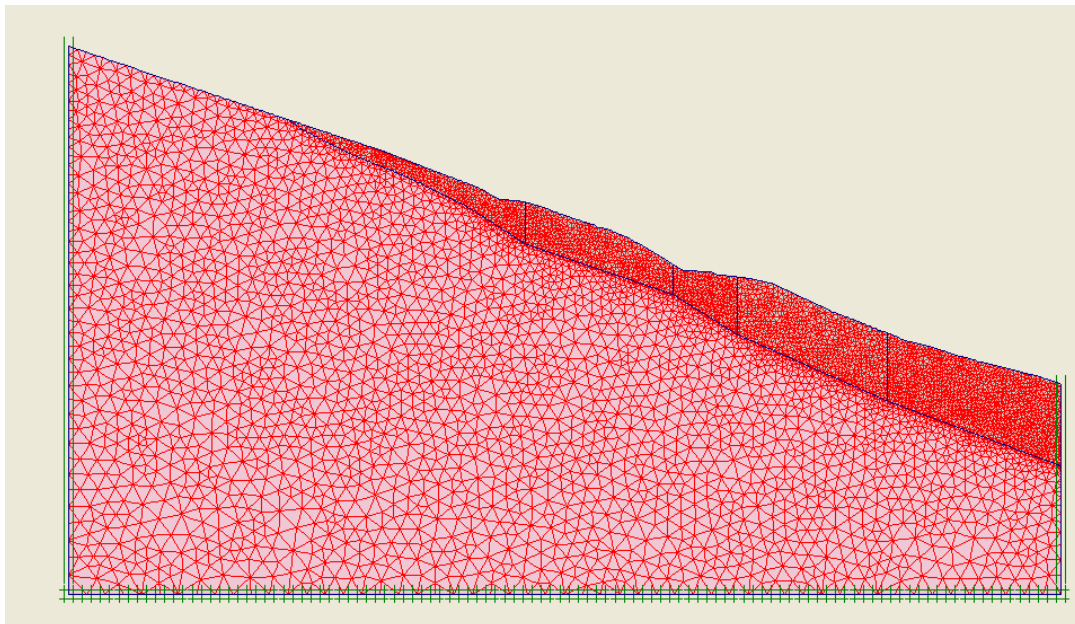
Εικόνα 7.10: Διαστάσεις του πρηνούς και δημιουργία του καννάβου.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

Ακολουθεί το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων όπου εισάγονται οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 7.3.1. Το μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς που χρησιμοποιείται είναι το Mohr-Coulomb, το οποίο δίνει μία πρώτη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών. Λόγω του ότι οι εδαφομηχανικοί είναι εξοικειωμένοι με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή του μοντέλου αυτού, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε αυτού του είδους τα εδαφικά μοντέλα. Επίσης στο παράθυρο αυτό λαμβάνει χώρα η διακριτοποίηση, όπου το γεωμετρικό πρότυπο διαιρείται σε στοιχεία. Έτσι, δημιουργείται το δικτύωμα το οποίο είναι μία σύνθεση πεπερασμένων στοιχείων. Στο Plaxis η δημιουργία δικτύωματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται στη τριγωνοποίηση της επιφάνειας του προτύπου. Η δημιουργία του δικτύωματος των στοιχείων γίνεται με βάση ένα παράγοντα που αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των στοιχείων  $I_e$ . Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις του γεωμετρικού προτύπου ( $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ,  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$ ) και τη ρύθμιση της ολικής πυκνότητας του δικτύωματος στοιχείων  $n_e$ , ο οποίος είναι ένας ακέραιος συντελεστής.

$$I_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min}) - (y_{\max} - y_{\min})}{n_e}} \quad (7.2)$$

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί πέντε επίπεδα ολικής πυκνότητας δικτύωματος στοιχείων: πολύ αραιό, αραιό, μέσης πυκνότητας, πυκνό, πολύ πυκνό (Καλογήρου, 2003). Κατά τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η επιλογή ‘πολύ πυκνό’ (very fine) ενώ έγινε πύκνωση της διακριτοποίησης στο υπερκείμενο στρώμα, κατά μήκος της γραμμής που απεικονίζει το ανάγλυφο, λόγω της απαίτησης για μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιοχή αυτή (Εικόνα 7.11).



Εικόνα 7.11: Διακριτοποίηση όπου απεικονίζονται και οι θέσεις των γεωτρήσεων στη τομή.

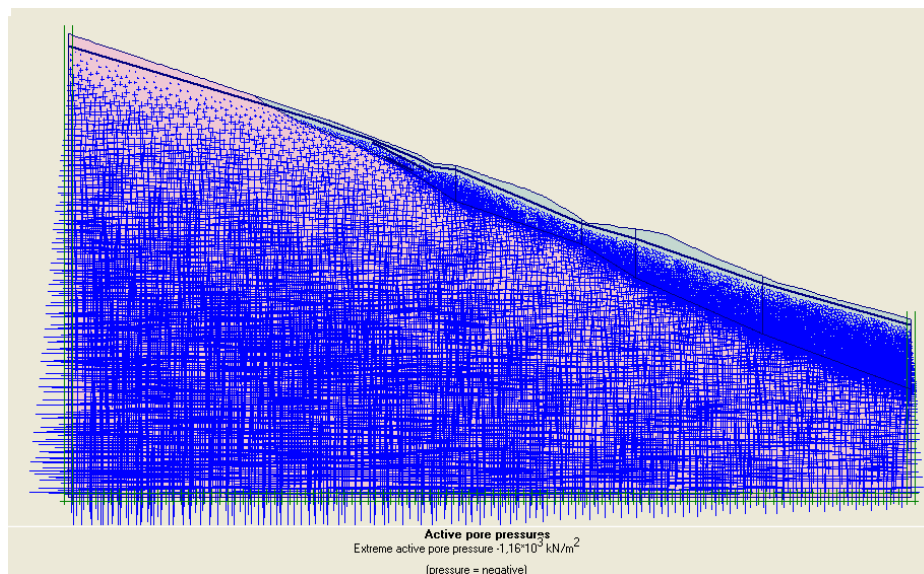
Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι συνοριακές συνθήκες. Στα κατακόρυφα όρια του προτύπου εφαρμόζεται μηδενική οριζόντια μετατόπιση ( $u_x = 0$ ), που σημαίνει ότι για τα σημεία των γραμμών αυτών επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον άξονα  $y$ . Στο κάτω όριο του προτύπου (οριζόντια γραμμή), εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση και ως προς τους δύο άξονες ( $u_x = u_y = 0$ ), που σημαίνει ότι η γραμμή αυτή είναι πακτωμένη.

Μετά τη δημιουργία του γεωμετρικού προτύπου και του κατάλληλου δικτύωματος των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να οριστούν οι αρχικές τασικές συνθήκες και η αρχική κατάσταση (Initial Conditions). Αυτό γίνεται στο τμήμα ορισμού των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων. Υπάρχουν δύο τύποι αρχικών συνθηκών: α) η δημιουργία των αρχικών πιέσεων του νερού των πόρων και β) ο προσδιορισμός της αρχικής γεωμετρίας του προτύπου και της δημιουργίας του πεδίου των ενεργών τάσεων. Η δημιουργία των αρχικών πιέσεων γίνεται με το σχεδιασμό του υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος μπορεί να οριστεί από δύο ή περισσότερα σημεία. Μετά την εισαγωγή του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα, δημιουργούνται οι πιέσεις του νερού των πόρων. Αυτόματα εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο απεικονίζονται οι πιέσεις αυτές καθώς και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

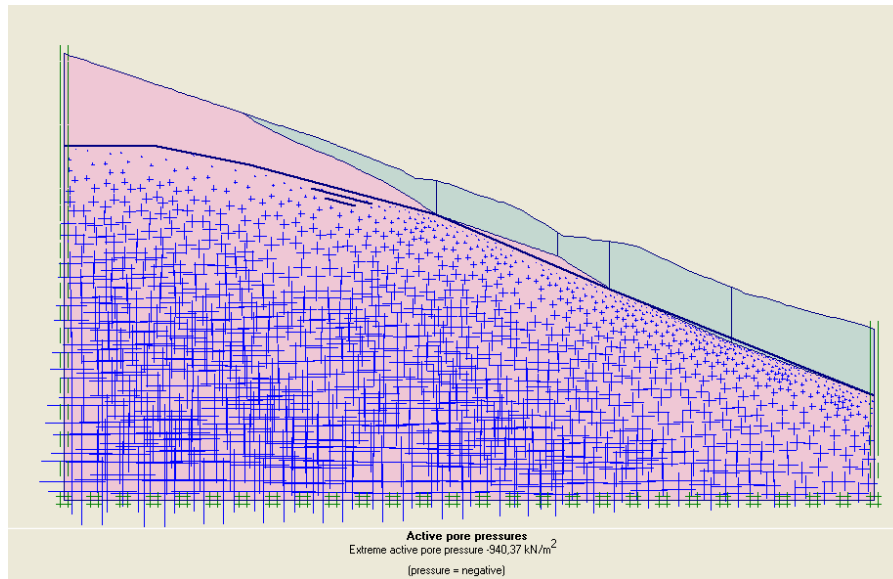
Στη παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα προς επίλυση τα οποία διαφέρουν ως προς την αρχική θέση του υδροφόρου ορίζοντα: α) Στο πρώτο μοντέλο η στάθμη του ύδατος βρίσκεται ‘ψηλά’, στο παράθυρο εισαγωγής των αρχικών συνθηκών. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται μία κατάσταση κατά την οποία υπάρχει έντονη βροχόπτωση και το εδαφικό υλικό δεν έχει ‘προλάβει’ ακόμα να αποστραγγίσει. Με αυτό το σκεπτικό η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα τοποθετείται 0,5-1 m κάτω από το ανάγλυφο. β) στο δεύτερο μοντέλο η στάθμη του υδροφόρου τοποθετείται χαμηλά κοντά στη διεπιφάνεια των στρωμάτων, στο παράθυρο εισαγωγής των αρχικών συνθηκών καθώς εδώ θεωρείται ότι δεν έχει βρέξει ακόμα οπότε δεν έχει επέλθει άνοδος του υδροφόρου ορίζοντα. Στη συνέχεια προσομοιώνεται η άνοδος της στάθμης του ύδατος λόγω βροχόπτωσης, με ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα σταδιακά (staged construction).

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι δεν γίνεται εδώ η διαδικασία  $K_0$ , επειδή η επιφάνεια δεν είναι επίπεδη και οι αρχικές τάσεις υπολογίζονται με τη χρήση της επιλογής του ίδιου του βάρους του προτύπου, που γίνεται στη διαδικασία υπολογισμών.

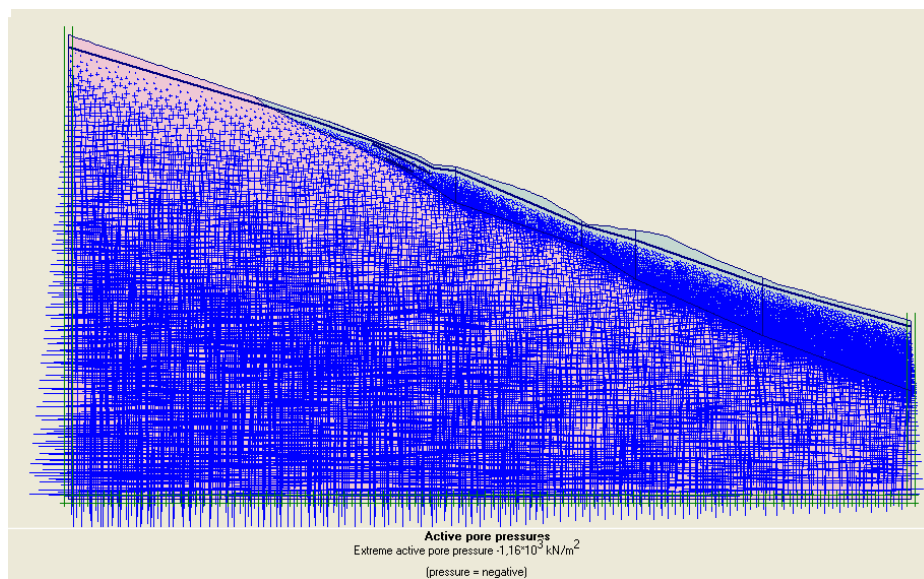


**Εικόνα 7.12: Πρώτο μοντέλο όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι ‘ανεβασμένη’.  
Απεικονίζονται οι πιέσεις του νερού των πόρων.**

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.13: Δεύτερο μοντέλο, πριν τη βροχόπτωση. Απεικονίζονται οι πιέσεις του νερού των πόρων.



Εικόνα 7.14: Στάθμη του ύδατος μετά την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα στο 2<sup>ο</sup> μοντέλο.

Μετά τη δημιουργία του προτύπου των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί η φάση των υπολογισμών (Calculations). Ο τύπος υπολογισμών που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτός της ανάλυσης πλαστικής συμπεριφοράς προτύπου. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με σκοπό την πραγματοποίηση μιας ελαστοπλαστικής ανάλυσης όπου δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν επιδράσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Ο πίνακας ακαμψίας σε αυτού του τύπου την επίλυση βασίζεται στην αρχική μη παραμορφωμένη γεωμετρία του

## *7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.*

προτύπου. Γενικά, η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές, ενώ δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση του χρόνου, εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους. Εφόσον εμπλέκεται η πλαστικότητα των εδαφών, οι εξισώσεις γίνονται μη γραμμικές, οπότε το πρόβλημα πρέπει να επιλυθεί σε μια σειρά βημάτων (Καλογήρου, 2003).

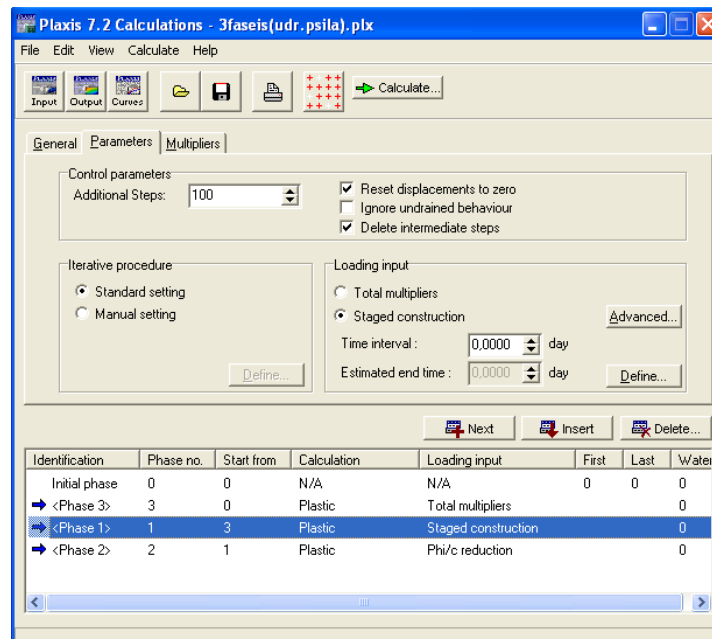
### *7.3.3 Υπολογισμοί*

#### *7.3.3.1 Πρώτο Μοντέλο*

Στο μοντέλο αυτό ο υδροφόρος είναι ‘ψηλά’ εφόσον θεωρείται ότι έχει ανέλθει λόγω βροχοπτώσεων. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις φάσεις υπολογισμών: I) Η πρώτη φάση είναι η επιβολή του ιδίου του βάρους του υλικού. Έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή ‘αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου’ κατά την οποία οι υπολογισμοί τερματίζονται όταν επιτυγχάνεται ένα καθορισμένο επίπεδο φόρτισης ή κάποια φόρτιση που οδηγεί σε αστοχία χωρίς να είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων. Επίσης ενεργοποιείται η επιλογή ‘αγνόησε τη μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά’. II) Η δεύτερη φάση είναι αυτή της σταδιακής κατασκευής, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από την επιβολή του ιδίου του βάρους του υλικού κατά την πρώτη φάση. Ενεργοποιείται η επιλογή ‘μηδενισμός παραμορφώσεων’, επειδή οι παραμορφώσεις που προέκυψαν στο προηγούμενο στάδιο δεν ενδιαφέρουν και πρέπει να αγνοηθούν γιατί δεν έχουν καμία φυσική σημασία. Επίσης επιλέγεται η ρύθμιση ‘διαγραφή ενδιάμεσων σταδίων’ σε συνδυασμό με τον ‘αλγόριθμο προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου’, η οποία συντελεί στη εξοικονόμηση χώρου στο σκληρό δίσκο. III) Η τρίτη φάση είναι η μείωση των παραμέτρων  $c$  και  $\phi$ , κατά την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας. Στην επιλογή αυτή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης. Σε αυτή την επιλογή η επίλυση πάντα χρησιμοποιεί το σύνολο των βημάτων που ορίζονται (Εικόνα 7.15).



## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

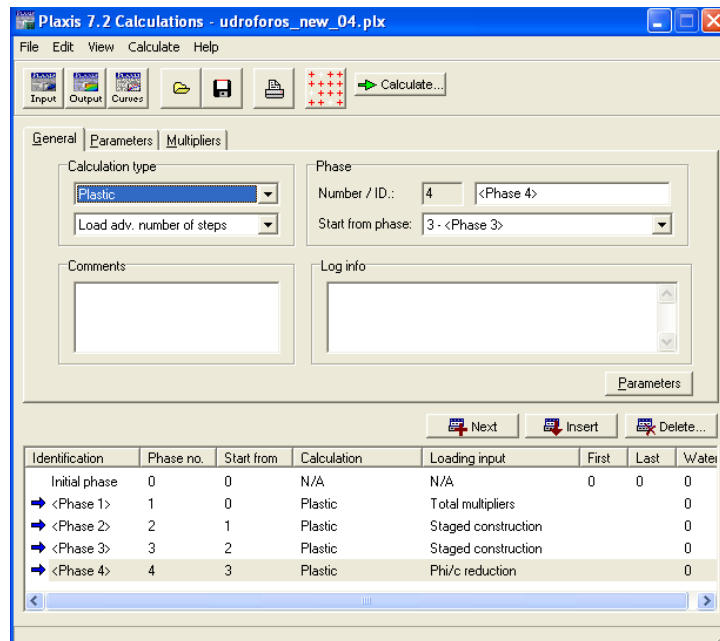


Εικόνα 7.15: Παράθυρο υπολογισμών. Πρώτο μοντέλο.

### 7.3.3.2 Δεύτερο Μοντέλο

Στο δεύτερο μοντέλο η επίλυση γίνεται θεωρώντας ότι αρχικά ο υδροφόρος ορίζοντας είναι χαμηλά και προσομοιάζεται η βροχόπτωση με ανύψωση του υδροφόρου σε μία σταδιακή κατασκευή. Η επίλυση πραγματοποιείται σε τέσσερις φάσεις υπολογισμών οι οποίες είναι: η επιβολή του ιδίου του βάρους, η σταδιακή κατασκευή η οποία χρησιμοποιείται δύο φορές (μία για την εξισορρόπηση των παραμορφώσεων και μία για την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα και τον επαναπροσδιορισμό των πιέσεων του νερού των πόρων) και τέλος ακολουθεί η μείωση των παραμέτρων  $c$  και  $\phi$  (Εικόνα 7.16).

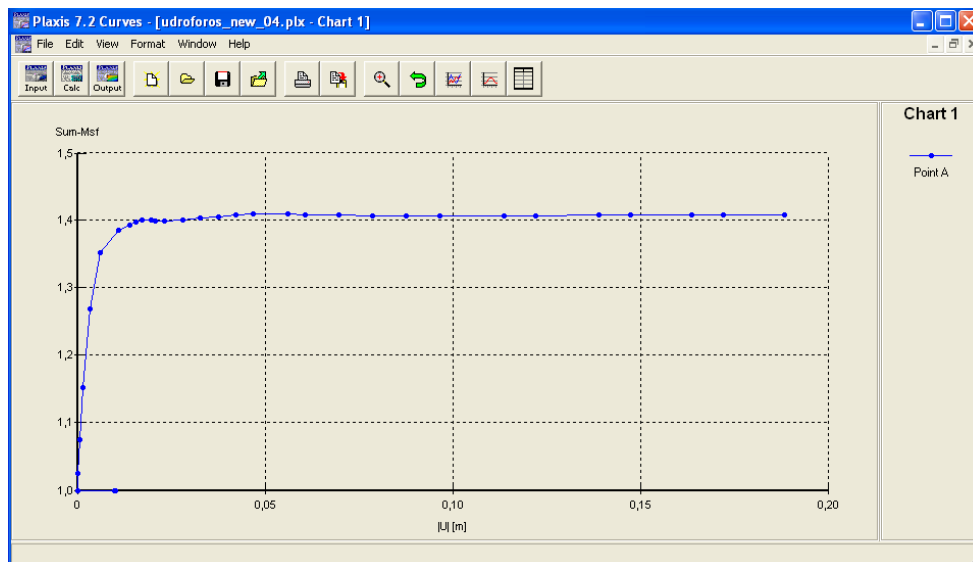
## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.16: Παράθυρο υπολογισμών για το δεύτερο μοντέλο.

### 7.3.4 Αποτελέσματα

Όταν ο υδροφόρος είναι χαμηλά ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει είναι ίσος με 1.41, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 7.17.



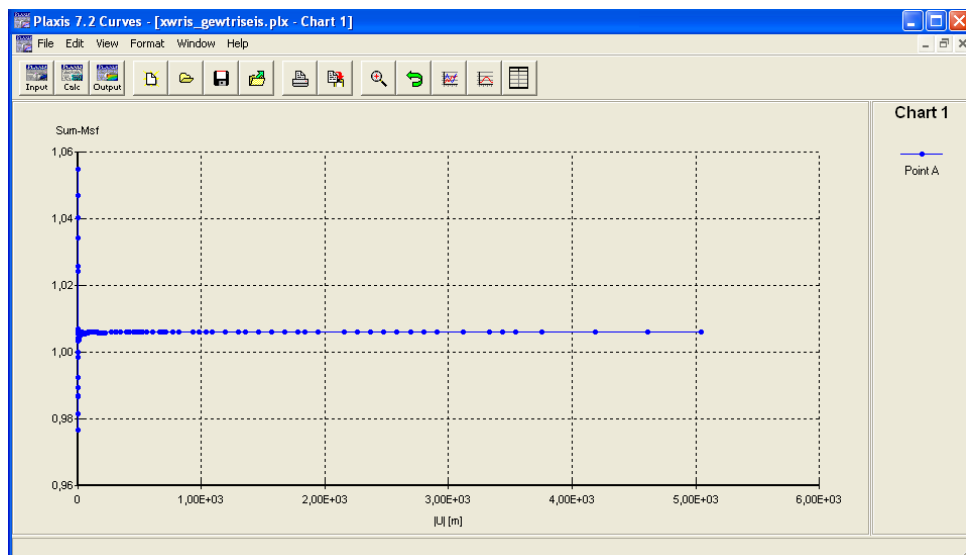
Εικόνα 7.17: Διάγραμμα του συντελεστή ασφάλειας.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι το υπό μελέτη πρανές, ναι μεν θεωρείται ασφαλές για τις συγκεκριμένες συνθήκες, δεν είναι δυνατόν όμως να προβλεφθεί η συμπεριφορά του με βεβαιότητα αν επιδράσουν παράγοντες οι οποίοι δύνανται να οδηγήσουν σε αστοχία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πρώτο μοντέλο επίλυσης.

### 7.3.4.1 Πρώτο Μοντέλο Επίλυσης

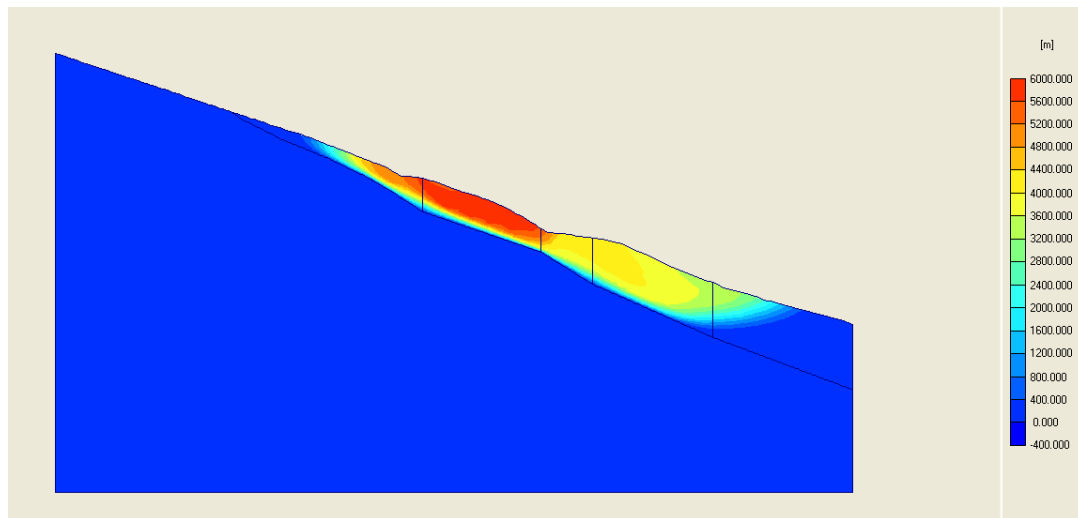
Αρχικά στο παράθυρο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας την επιλογή για δημιουργία διαγράμματος 'curves' παρουσιάζεται το διάγραμμα που παρέχει πληροφορίες για τον συντελεστή ασφάλειας του 1<sup>ου</sup> μοντέλου.



Εικόνα 7.18: Συντελεστής ασφάλειας για το πρώτο μοντέλο.

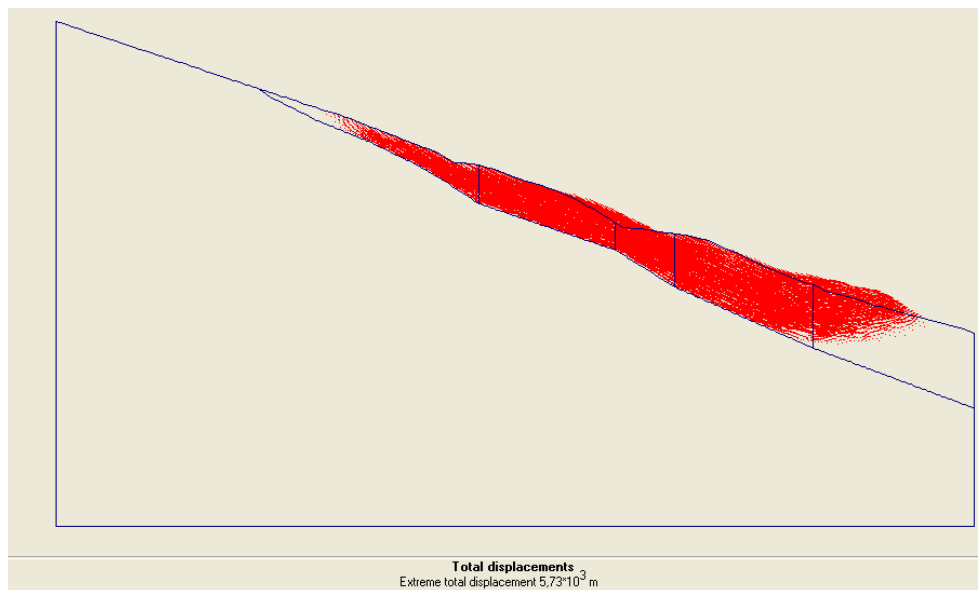
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.18 ο συντελεστής ασφάλειας για το μοντέλο αυτό είναι ίσος με 1.005, δηλαδή σχεδόν ίσος με τη μονάδα γεγονός που ερμηνεύεται ως οριακή ισορροπία.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



**Εικόνα 7.19: Ολικές μετατοπίσεις του μοντέλου στη τελική φάση.**

Στην Εικόνα 7.19 εμφανίζονται οι συνολικές μετατοπίσεις, ενώ στην 7.20 φαίνεται η πιθανότερη επιφάνεια αστοχίας, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τη διαδικασία της μείωσης των παραμέτρων  $c$  και  $\phi$ .



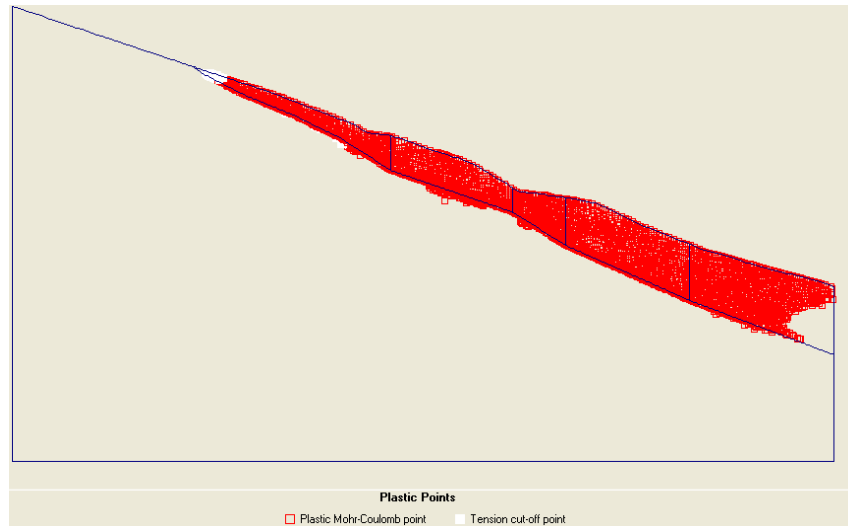
**Εικόνα 7.20: Πιθανή επιφάνεια αστοχίας.**

Σε αυτές τις εικόνες γίνεται φανερό ότι τα όρια της κατολίσθησης όπως αυτά διαγράφονται στο γεωλογικό χάρτη, συμπίπτουν περίπου με τα όρια της κατολίσθησης όπως εμφανίζονται στο παράθυρο αποτελεσμάτων. Η αστοχία φαίνεται να εμφανίζεται

### 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

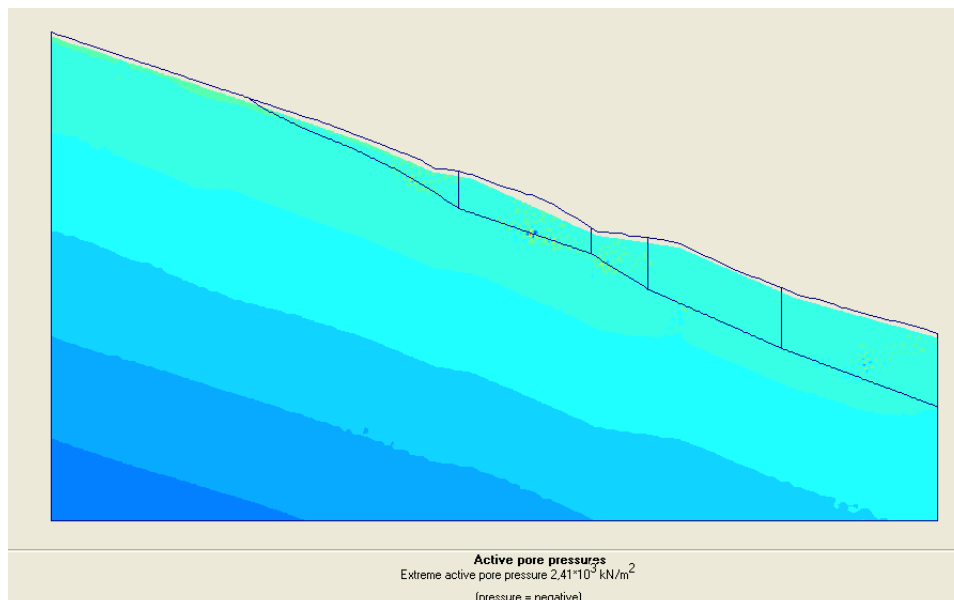
στη διεπιφάνεια των εδαφικών σχηματισμών και ίσως λίγο πιο πάνω (1 m), γεγονός που δεν απέχει σημαντικά από τις ενδείξεις των αποκλισιομέτρων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ‘πλαστικά σημεία’ δηλαδή σημεία για τα οποία ο κύκλος Mohr αγγίζει το φάκελο αστοχίας του Coulomb.



**Εικόνα 7.21: Πλαστικά σημεία.**

Στην Εικόνα 7.22 εμφανίζονται οι συνολικές πιέσεις πόρων, δηλαδή οι πιέσεις πόρων σταθερής κατάστασης και οι υπερπιέσεις των πόρων.

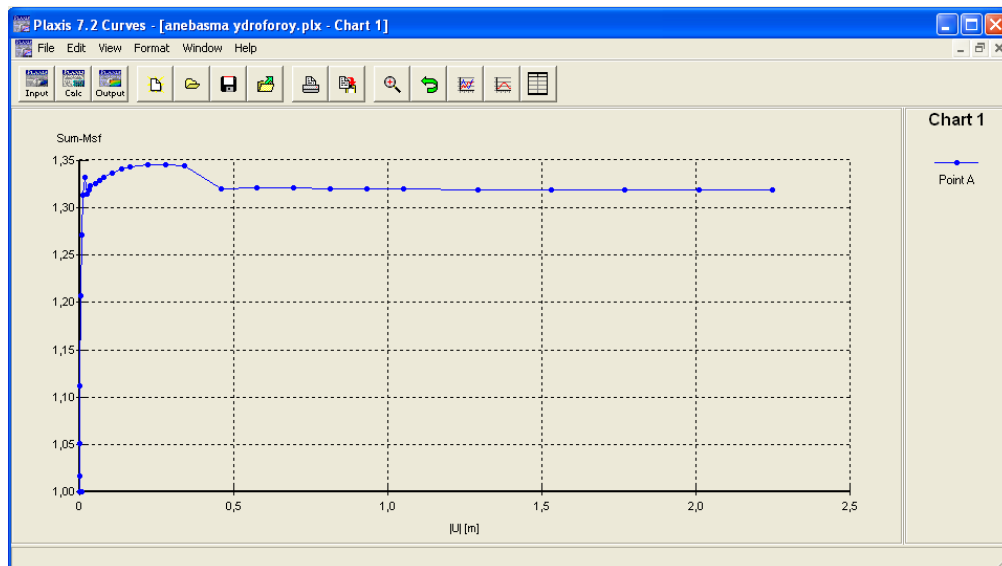


**Εικόνα 7.22: Ολικές πιέσεις των πόρων.**

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

### 7.3.4.2 Δεύτερο Μοντέλο Επίλυσης

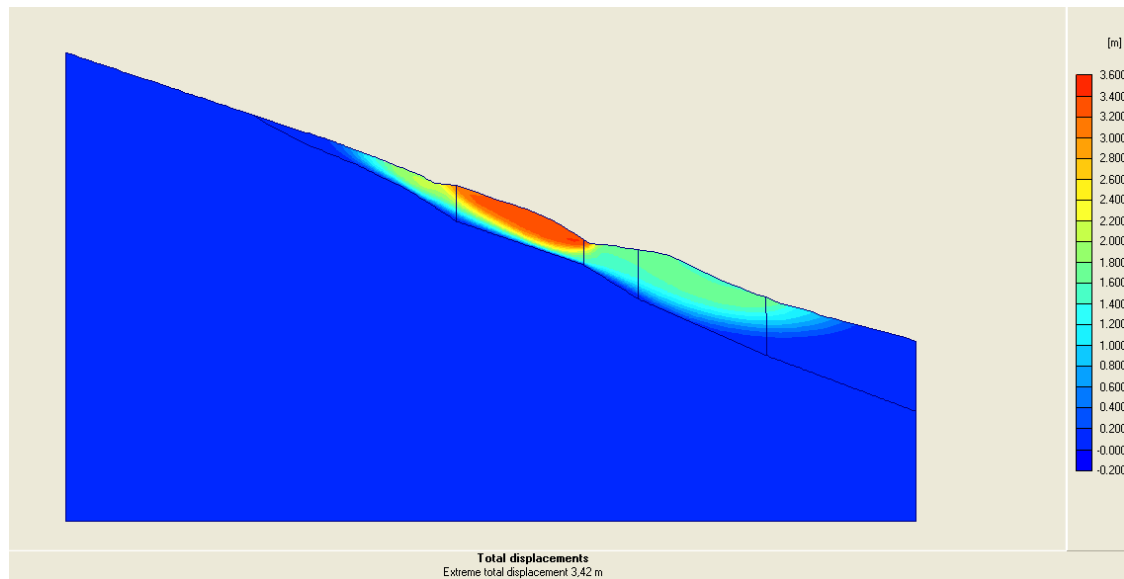
Το διάγραμμα για το συντελεστή ασφάλειας του δεύτερου μοντέλου απεικονίζεται στην Εικόνα 7.23 και είναι ίσος με 1.33.



Εικόνα 7.23: Συντελεστής ασφάλειας για το δεύτερο μοντέλο.

Στο μοντέλο αυτό παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι σημαντικά υψηλότερος σε σχέση με το πρώτο μοντέλο. Το γεγονός αυτό είχε παρατηρηθεί και στο κεφάλαιο 6 όπου έγινε προσπάθεια να ερμηνευτεί το φαινόμενο. Σύμφωνα λοιπόν με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από επιλύσεις σε απλούστερα μοντέλα, θεωρείται ότι στην περίπτωση που η συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων έχει οριστεί μη στραγγιζόμενη, το δεύτερο μοντέλο δε δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Έτσι τα δύο μοντέλα παρέχουν δύο διαφορετικά συμπεράσματα για την ευστάθεια του υπό μελέτης πρανούς και γεννάται το ερώτημα ποια από τις δύο επιλύσεις είναι ασφαλής όταν αντιμετωπίζεται το συγκεκριμένο γεωτεχνικό πρόβλημα. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό παρατίθενται στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όπου έγινε προσπάθεια να αναζητηθούν τα αίτια του φαινομένου. Σύμφωνα λοιπόν με τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω των επιλύσεων του προηγούμενου κεφαλαίου, τα αποτελέσματα που παρέχει το πρώτο μοντέλο θεωρούνται πιο ασφαλή.

### 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



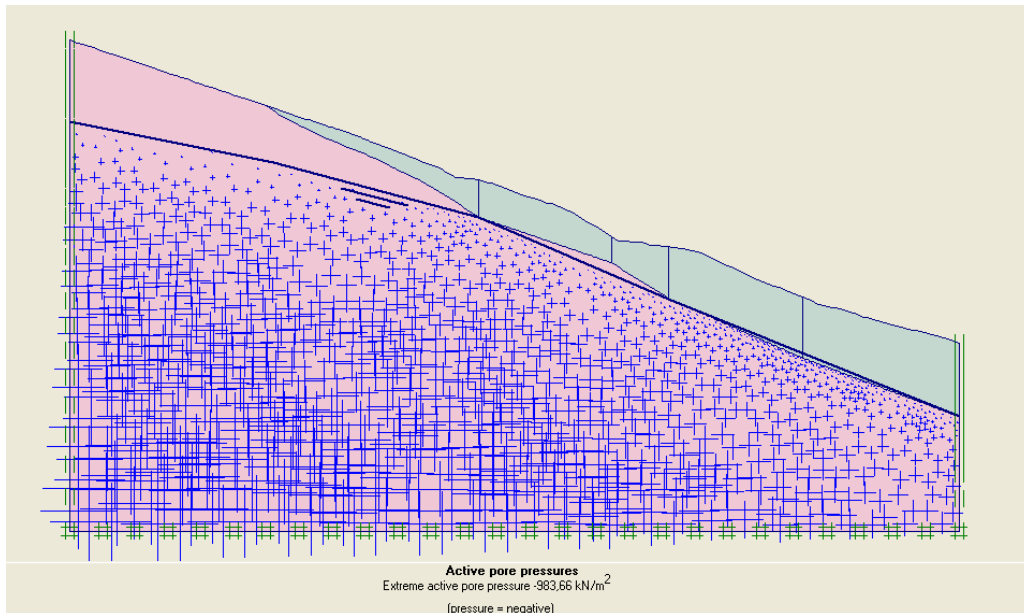
Εικόνα 7.24: Ολικές μετατοπίσεις για το δεύτερο μοντέλο.

Επίσης στην Εικόνα 7.24 παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις που εμφανίζει αυτό το μοντέλο είναι λιγότερο έντονες σε σχέση με το πρώτο μοντέλο.

#### 7.3.4.3 Διερεύνηση της κατάστασης του Πρανούς μετά την Αστοχία

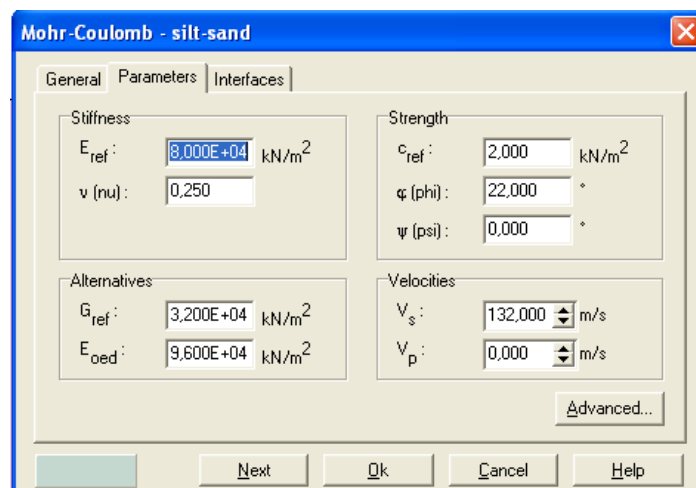
Στη συνέχεια πραγματοποιείται επίλυση στο Plaxis, για να μελετηθούν οι περαιτέρω παραμορφώσεις που εμφανίζει το πρανές. Επίσης ερευνάται αν εμφανίζει τάση μετακίνησης μετά την αστοχία. Θεωρείται ότι έχει παρέλθει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα οπότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει 'κατέβει' (Εικόνα 7.25).

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.25: Στάθμη του ύδατος μετά από σημαντικό χρονικό διάστημα.

Επίσης αποδίδονται νέες ιδιότητες στο εδαφικό υλικό, το οποίο φαίνεται από τα μοντέλα 1 και 2 ότι παρουσιάζει μετακίνηση. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι παραμένονσα συνοχή  $c$  και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ . Η συνοχή είναι πρακτικά μηδέν επειδή το πρόγραμμα όμως δε δέχεται αυτή την τιμή δίνεται στη συνοχή η τιμή 2 kPa. Η τιμή που αποδίδεται στη γωνία εσωτερικής τριβής είναι κατά 9 μοίρες μικρότερη από τη μέγιστη ενεργή τιμή και ίση με 22 μοίρες (Εικόνα 7.26).

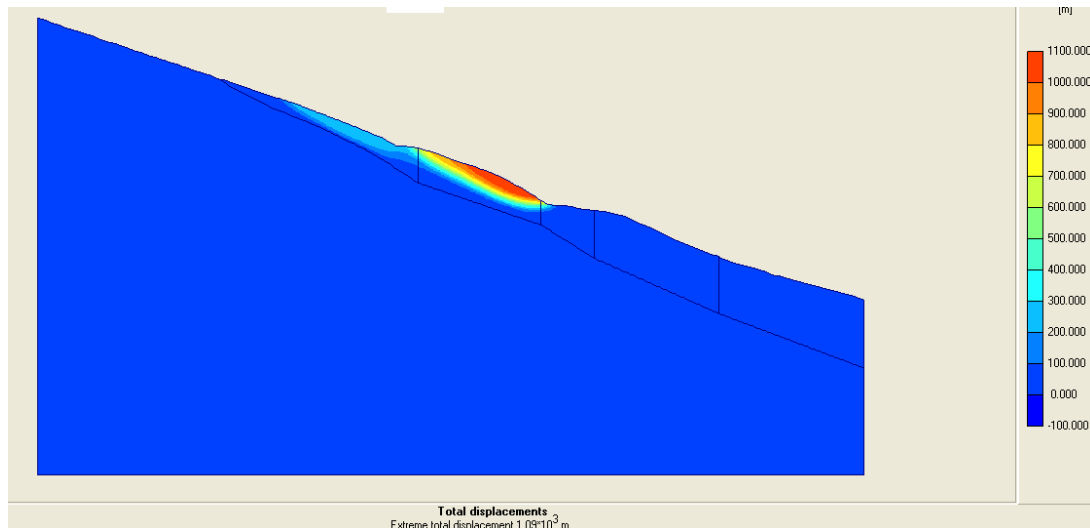


Εικόνα 7.26: Παραμένουσες ιδιότητες  $c$  και  $\phi$  του υπερκείμενου σχηματισμού.



### 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.

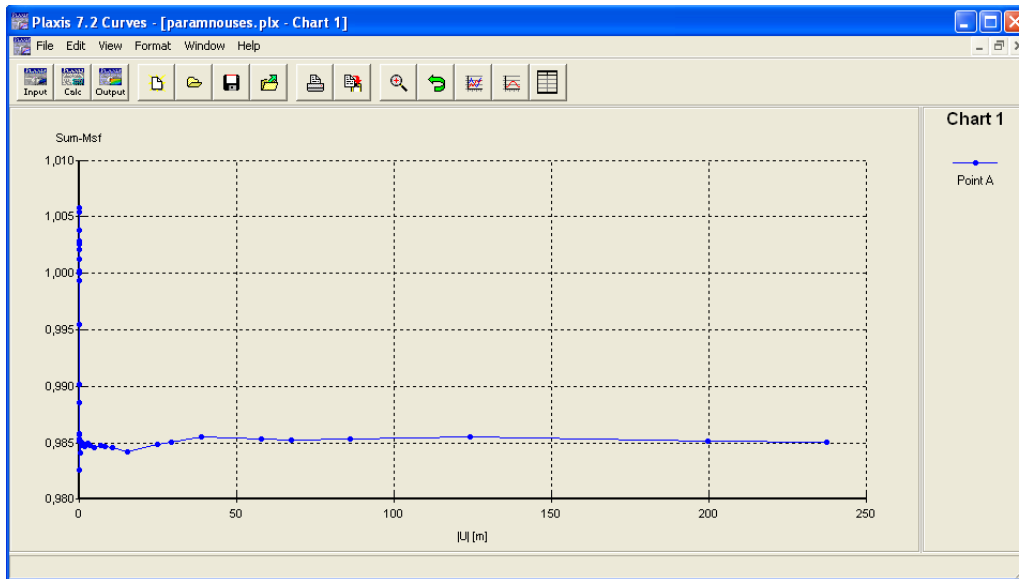
Η επίλυση πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις υπολογισμών, όπως και στην περίπτωση του 1<sup>ου</sup> μοντέλου, δηλαδή, επιβολή ιδίου του βάρους, σταδιακή κατασκευή και μείωση των παραμέτρων  $\phi$ - $c$ . Οι μετατοπίσεις που προέκυψαν στο παράθυρο των αποτελεσμάτων φαίνονται στην Εικόνα 7.27.



**Εικόνα 7.27: Μετατοπίσεις μετά την αστοχία.**

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.27 μετά την αστοχία η περιοχή η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερη τάση για μετακίνηση στην περιοχή πάνω από τη γεώτρηση  $\Gamma_3$  και τη νέα επαρχιακή οδό. Το γεγονός αυτό συμπίπτει με τα όρια δύο μικρότερων από την κύρια κατολίσθηση, μετακινήσεων τα οποία διαγράφονται στο γεωλογικό χάρτη. Αυτή η συγκυρία μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι κατολισθήσεις αυτές είναι δευτερεύουσες και υποκινήθηκαν από την κύρια κατολίσθηση.

## 7 Μοντελοποίηση και Επίλυση του Προβλήματος.



Εικόνα 7.28: Συντελεστής ασφάλειας.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα της Εικόνας 7.28 ο συντελεστής ασφάλειας είναι μικρότερος της μονάδας και το πρανές δεν κρίνεται πλέον ασφαλές.

Με βάση τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στο παρόν και προηγούμενο κεφάλαιο προέκυψαν κάποια συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά θα παρατεθούν και θα αναλυθούν στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 8.1 Ευστάθεια του Πρανούς

Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση με το λογισμικό πακέτο Plaxis για τον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας που οδήγησε σε κατολίσθηση. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συντελεστή ασφάλειας θεωρείται ότι το πρανές βρίσκεται σε οριακή ισορροπία. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για την εύρεση του έγιναν παραδοχές ως προς τις ιδιότητες της διατμητικής αντοχής των εδαφών μπορεί να θεωρηθεί ότι το συγκεκριμένο πρανές δεν είναι ασφαλές. Η μάζα που ολισθαίνει είναι αυτή του υπερκειμένου σώματος και η επιφάνεια αστοχίας προκύπτει περίπου 0.5 m υψηλότερα από τη διεπιφάνεια των δύο σχηματισμών. Το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται η νέα Εθνική οδός βρίσκεται μέσα στη ζώνη αστοχίας.

Ως κύριος μηχανισμός που οδήγησε στην αστοχία θεωρείται η ανάπτυξη πιέσεων των πόρων στο έδαφος μετά από έντονη βροχόπτωση σε συνδυασμό με τις χαμηλές μηχανικές ιδιότητες του υπερκειμένου σχηματισμού ο οποίος εδράζεται σε έναν βράχο. Η θεώρηση αυτή είναι μία από τις δυνατές θεωρήσεις και βασίζεται κυρίως στην προφορική πληροφορία ότι η αστοχία του πρανούς έγινε μετά από έντονη βροχόπτωση. Στο συμπέρασμα αυτό οδηγεί το γεγονός ότι ο συντελεστής ασφάλειας μειώνεται σημαντικά κατά την άνοδο του υδροφόρου ορίζοντα. Η ανάπτυξη υπερπιέσεων των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργών τάσεων και κατά συνέπεια τη μείωση της διατμητικής αντοχής.

Σύμφωνα με τις γεωτρήσεις δεν βρέθηκε κάποιο ρήγμα ή κάποια άλλη ασυνέχεια που να δημιουργεί μία πιθανή επιφάνεια αστοχίας και έναν επιπλέον παράγοντα που δύναται να οδηγήσει σε αστοχία του πρανούς.

Τέλος μετά την ενεργοποίηση της κατολίσθησης και έπειτα από χρονικό διάστημα που επιτρέπει την επαναφορά της στάθμης στα συνηθισμένα επίπεδα, ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει υποδεικνύει ότι το πρανές δε μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές. Η

νέα πιθανή επιφάνεια αστοχίας προκύπτει μεταξύ των γεωτρήσεων  $\Gamma_6$  και  $\Gamma_3$  και σε βάθος 1 m περίπου. Βρίσκεται ακριβώς στα όρια της νέας Εθνικής οδού.

## **8.2 Συμπεριφορά του Προγράμματος κατά την Επίλυση**

Έγινε διερεύνηση όσον αφορά τη συμπεριφορά του προγράμματος όταν οι υδρολογικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιλογή μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά προσομοιάζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του εδάφους. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις βραχυπρόθεσμης ανάλυσης, ή όταν περατότητα είναι μικρή ή ο ρυθμός φόρτισης είναι μεγάλος, σε αντίθεση με τη στραγγιζόμενη συμπεριφορά. Ανάλογα με τις συνθήκες θα πρέπει να γίνεται η επιλογή της κατάλληλης συμπεριφοράς. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δύο επιλογές είναι ότι όταν επιλέγεται αστράγγιστη συμπεριφορά αναπτύσσεται υπερπίεση των πόρων ενώ στη στραγγιζόμενη συμπεριφορά η πίεση δεν υπερβαίνει την υδροστατική.

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι το γεγονός ότι όταν επιλέγεται η αστράγγιστη συμπεριφορά θα πρέπει στο πρόγραμμα να εισάγονται οι ενεργές παράμετροι των υλικών που συμμετέχουν. Στη συνέχεια το πρόγραμμα εισάγει το μέτρο συμπίεσης του νερού και γίνονται οι υπολογισμοί των τάσεων και πιέσεων των πόρων.

## **8.3 Προτάσεις**

Θα ήταν επιθυμητό να υπήρχαν περισσότερες πληροφορίες για γεωλογία και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Πρόκειται για ένα υπερκείμενο εδαφικό στρώμα που περιέχει στη μάζα του ένα ποσοστό αργιλικού υλικού και εδράζεται πάνω σε ένα βραχώδη σχηματισμό. Η κατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης το έδαφος να μη προλαβαίνει να αποστραγγίσει. Άρα η παρουσία του νερού αποτελεί κίνδυνο για την ευστάθεια του πρανούς και σημαντικό παράγοντα που οδηγεί στην ενεργοποίηση της κατολίσθησης. Οι υπερπίεσεις του νερού των πόρων προκαλούν επιπλέον μείωση στις ήδη ‘σχετικά χαμηλές’ ιδιότητες του υπερκειμένου στρώματος. Άρα θα πρέπει να ληφθούν μέτρα απομάκρυνσης του νερού.

*Συμπεράσματα-Προτάσεις.*

Επίσης επειδή μετά την πρώτη ενεργοποίηση της κατολίσθησης προκύπτει ότι το πρανές δεν είναι ασφαλές, ίσως θα έπρεπε να κατασκευαστούν μέτρα για τη στήριξη του πρανούς, όπως τοίχος αντιστήριξης με αγκύρια.

## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

Αγιουντάντης, Ζ., 2002. Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.

Βαλαλάς, Δ., 1981. Εδαφομηχανική, Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.

Εξαδάκτυλος, Γ., 2001. Ανάλυση Ευστάθειας Υπαίθριων και Υπογείων Έργων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Καλογήρου, Ε., 2003. Παραμετρική Ανάλυση Εδαφικών Πρανών με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κανάρης, Δ., 2006. Ανάλυση Παραγόντων που συνέβαλαν στη Κατολίσθηση της περιοχής του Αγ. Φωκά της Κω, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κολέτσος, Κ., 2004. Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις University studio press, Θεσσαλονίκη.

Κωμόδρομος, Α., 2001. Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

Μαραγκάκη, Α., 2003. Μελέτη Ευστάθειας του Δυτικού Πρανούς του Όρους Αιγάλαιο με Ανάδρομη Ανάλυση Δεδομένων Κλισιομέτρων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Στειακάκης, Εμμ., 2004. Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Τσότσος, Σ., 1991. Εδαφομηχανική-Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη.

Στειακάκης, Εμμ., 2006. Προφορική Επικοινωνία

### **Διεθνής**

Beer, G., Booker, J.R., and Carter, J.P., 1992. Computer Methods and Advances in Geomechanics Proceedings of the Seventh International Conference Rotterdam.

Bromhead, E.N., 1986. The Stability of Slopes, Διάθεση Survey University press, Glasgow

Charles, J., 1979. Rock Mechanics and Engineering, Διάθεση Cambridge University press, Cambridge New York

Craig, R.F., 2004. Craig's Soil Mechanics, Διάθεση New Fetter Lane London.

Lagios & Papanikolaou & Apostolopoulos, 1998. Geophysical Studies Relating to the Tectonic Structure of Kos island. 8<sup>th</sup> International Congress of the Geological Society of Greece.

Lambe, T.W., and Whitman, R.V., 1979. Soil Mechanics, Διάθεση Wiley, New York.

Ortigao, J.A.R. and Sayao, A.S.F.J., 2004. Handbook of Slope Stabilization, Διάθεση Springer, New York Berlin.

Plaxis Manual, 1998.

Smith, G.N., 1990. Element of Soil Mechanics, Διάθεση Blackwell Science.

### **Πηγές Διαδικτύου**

Σελίδα του πανεπιστημίου του Wisconsin - Τομέας γεωεπιστημών

<http://geology.beloit.edu>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ