

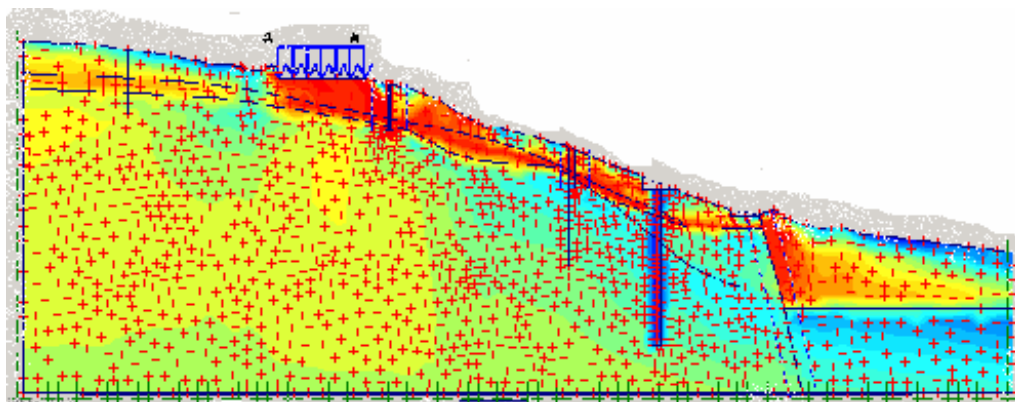


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΥΤΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ
ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΕ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

ΜΑΡΑΓΚΑΚΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Αν. Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ
Δρ.	Α. ΚΑΠΕΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΑΡΑΓΚΑΚΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΥΤΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ
ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΕ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Αν. Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ
Δρ.	Α. ΚΑΠΕΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση του προβλήματος κατολίσθησης του πρανούς και η επίλυση του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της επιφάνειας ολίσθησης. Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται με ανάδρομη ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων τα οποία είχαν τοποθετηθεί στο πρανές. Μετά την βαθμονόμηση το μοντέλο θεωρείται αντιπροσωπευτικό μοντέλο της περιοχής κατολίσθησης, και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν τα μέτρα σταθεροποίησης της, δυνάμεις και τάσεις που θα εφαρμοσθούν σε τεχνικά έργα που θα κατασκευαστούν στην περιοχή, κλπ. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Plaxis (Version 7.0), το οποίο επιλύει γεωτεχνικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Τα συμπεράσματα προέκυψαν μετά από την προσομοίωση τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων όσο αφορά το επίπεδο πύκνωσης και την θέση του υδροφόρου ορίζοντα. με τα οποία πραγματοποιείται η εκτίμηση της επιφάνειας ολίσθησης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας και την συγγραφή αυτής της εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου:

- Στον **κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη**, Επιβλέποντα καθηγητή για την άριστη συνεργασία που είχαμε, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για τη συμβολή στην συγκέντρωση στοιχείων για την εργασία αυτή.
- Στον **Δρ. Αθανάσιο Καπένη**, Διευθυντή στο τμήμα των Υπογείων Έργων στην εταιρεία ΕΡΓΟΣΕ, για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε καθώς και για τη συμβολή στην συγκέντρωση στοιχείων για την εργασία αυτή.
- Στον **Δρ Αχιλλέα Παραθύρα**, Γεωτεχνικό Σύμβουλο της εταιρείας ΕΡΓΟΣΕ για την συμβολή στην συγκέντρωση στοιχείων και φωτογραφικού υλικού.
- Στον **κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο**, Αναπληρωτή καθηγητή, για το χρόνο που διέθεσε στη διόρθωση της παρούσας εργασίας και της εξέτασή της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον **κ. Μανώλη Στειακάκη** για την πολύτιμη βοήθειά του στο γνωστικό αντικείμενο των κατολισθήσεων και του λογισμικού Plaxis. Καθώς επίσης την μεταπτυχιακό **Ειρήνη Καλογήρου**, για την άριστη συνεργασία μας και τη βοήθεια της για την καλύτερη κατανόηση του λογισμικού Plaxis.

Χανιά, Οκτώβριος 2003

Αγγελική Ε. Μαραγκάκη

αφιερώνεται

**στη μαμά και
στον μπαμπά
μου.**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
----------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ.....	6
2.1 Γενικά.....	7
2.2 Τι είναι κατολίσθηση	11
2.3 Χαρακτηριστική ονοματολογία κατολισθήσεων	11
2.4 Μορφές των κατολισθήσεων	12
2.4.1 Κατολισθήσεις εδαφικών πρανών	13
2.4.2 Κατολισθήσεις των βραχωδών σχηματισμών.....	19
2.5 Αίτια των κατολισθήσεων.....	22
2.5.1 Ίδιο βάρος και σεισμικές δυνάμεις	23
2.5.2 Δυνάμεις ροής.....	23
2.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	24
2.6.1 Εδαφικά πρανή.....	25
2.6.2 Μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους.....	28
2.6.3 Αγκύρωση σε στερεό έδαφος και τοίχοι αντιστήριξης.....	29
2.6.4 Βραχώδη πρανή	31
2.7 Διαγνωστική των κατολισθήσεων	34
2.7.1 Τοπογραφικές επιφανειακές μετρήσεις	36

2.7.2	Ερευνητικές γεωτρήσεις	36
2.7.3	Πιεζόμετρα.....	36
2.7.4	Αποκλισιόμετρα.....	37
2.8	Κατολισθήσεις στον Ελλαδικό χώρο.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΑΙΓΑΛΕΩ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....

3.1	Ιστορικό κατολίσθησης και συναφών έργων.....	45
3.2	Γεωλογικά – Τεκτονικά στοιχεία περιοχής.....	48
3.3	Αποτελέσματα Γεωτεχνικών Ερευνών	50
3.3.1	Γεωτεχνική Έρευνα εταιρείας Γεωμηχανική, Δεκ. 1991.....	50
3.3.2	Γεωτεχνική Έρευνα ΚΕΔΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ, Ιούνιος 1992	52
3.3.3	Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα Εταιρείας Μηχανική– Γεωτεχνική.....	53
3.3.4	Γεωτεχνική Έρευνα Ομίλου Τεχνικών Μελετών ΤΕΠΕ, Νοέμβριος 1998.....	54
3.3.5	Γεωτεχνική Έρευνα Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΤΕΠΕ, Δεκέμβριος 2001.....	62
3.4	Συμπεράσματα των γεωτεχνικών ερευνών	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

4.1	Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση	67
4.1.1	Πρανές ξηρής άμμου.....	68
4.1.2	Πρανές άμμου με ελεύθερη επιφάνεια ροής στην επιφάνεια του εδάφους.....	69
4.1.3	Πρανές άμμου με ροή	70
4.1.4	Πρανές συνεκτικού υλικού με ροή	70

4.2	Πρανή περιορισμένου ύψους	71
4.2.1	Επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης	72
4.2.2	Καμπύλη επιφάνεια ολίσθησης	75
4.2.3	Μη κυκλικές, επιμήκεις επιφάνειες ολίσθησης	83
4.3	Έκφραση της ευσταθείας ενός πρανού μέσω ενός συντελεστή ασφάλειας...	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	88
5.1 Γενικά.....	88
5.2 Περιγραφή της μεθόδου.....	89
5.3 Διάρθρωση της μεθόδου.....	91
5.4 Διαίρεση του πεδίου.....	92
5.4.1 Είδη στοιχείων.....	92
5.4.2 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου.....	93
5.5 Συναρτήσεις μορφής.....	94
5.6 Επίλυση σε επίπεδο στοιχείου.....	98
5.7 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες.....	101
5.8 Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών.....	103
5.9 Κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών.....	104
5.9.1 Κριτήριο Mohr – Coulomb.....	105
5.9.2 Κριτήριο Tresca.....	106
5.9.3 Κριτήριο von Mises.....	106
5.9.4 Κριτήριο Drucker – Prager.....	107
5.10 Ευστάθεια πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	107
5.10.1 Ανάλυση ευστάθειας ομογενούς πρανούς.....	108
5.10.2 Ανάλυση ευστάθειας αργιλικού πρανού που εδράζεται σε ασθενές εδαφικό στρώμα.....	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PLAXIS	111
6.1 Εισαγωγή δεδομένων	112
6.1.1 Πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων	112
6.1.2 Γενικές ρυθμίσεις	112
6.1.3 Γεωμετρία προσομοιώματος	113
6.1.4 Φορτία και συνοριακές συνθήκες	118
6.1.5 Ιδιότητες υλικών	119
6.1.6 Δημιουργία δικτυώματος στοιχείων	124
6.1.7 Αρχικές συνθήκες	125
6.1.8 Υδρολογικές συνθήκες	125
6.1.9 Προσδιορισμός αρχικής γεωμετρίας	127
6.2 Υπολογισμοί	128
6.2.1 Καθορισμός υπολογιστικής φάσης	128
6.2.2 Γενικά υπολογιστικά στοιχεία	129
6.2.3 Παράμετροι υπολογιστικού ελέγχου	130
6.2.4 Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων	137
6.3 Αποτελέσματα	137
6.3.1 Παραμορφώσεις	137
6.3.2 Τάσεις	138
6.3.3 Δομές και διεπιφάνειες	139
6.3.4 Διαγράμματα σε τομές του προτύπου	139
6.4 Καμπύλες φορτίων-μετατοπίσεων και κατανομή τάσεων	140
6.4.1 Δημιουργία καμπύλης	140
6.4.2 Επεξεργασία καμπύλης	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΕ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ144

7.1	Εισαγωγή δεδομένων	144
7.1.1	Γενικές ρυθμίσεις.....	144
7.1.2	Γεωμετρία προσομοιώματος-Φορτία και συνοριακές συνθήκες	145
7.1.3	Ιδιότητες υλικών	147
7.1.4	Δημιουργία δικτυώματος	148
7.1.5	Αρχικές συνθήκες	150
7.2	Υπολογισμοί	152
7.2.1	Υπολογιστικές φάσεις.....	152
7.2.2	Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων	158
7.3	Αποτελέσματα.....	158
7.3.1	Διαγράμματα σε τομές του μοντέλου	158
7.4	Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης.....	165

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ167

8.1	Ευστάθεια δυτικού πρσανούς	167
8.2	Περιορισμοί κατά την εφαρμογή της αριθμητικής επίλυσης.....	168
8.3	Προτάσεις	169

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ170

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Οριστική Μελέτη χάραξης της σιδηροδρομικής γραμμής σύνδεσης του λιμένα Ν.Ικονίου με το υπόλοιπο σιδηροδρομικό δίκτυο προβλέπει την διέλευση της γραμμής περί την Χ.Θ. 10+400 έως Χ.Θ. 10+690 από ασταθή περιοχή όπου έχουν εκδηλωθεί στο παρελθόν έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Η Οριστική χάραξη της σιδηροδρομικής γραμμής φαίνεται στο Σχέδιο αριθ. Γ-1 το οποίο δίνεται στο Παράρτημα.

Η χάραξη έχει καθοριστεί μεταξύ της δυτικής Περιφερειακής Λεωφ. Αιγάλεω (Δ.Π.Λ.ΑΙ.), που βρίσκεται στα χαμηλότερα σημεία της κλιτύος, και ενός εργοστασίου, που βρίσκεται λίγο ψηλότερα. Στην αεροφωτογραφία της περιοχής (Εικόνα 1.1), απεικονίζεται η χάραξη της γραμμής και στην Εικόνα 1.2 μεγέθυνση της περιοχής κατολίσθησης.

Η κατολίσθηση που ενεργοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1990, έγινε μετά την εκσκαφή του ορύγματος της Λεωφ. Αιγάλεω. Επανενεργοποιήθηκε και επεκτάθηκε στη συνέχεια, παρά την ύπαρξη τριών σειρών πασσάλων, κατά τη διάρκεια συμπληρωματικών εκσκαφών στην οδό.

Η ευρύτερη περιοχή της κατολίσθησης είναι μία ζώνη επώθησης του παλαιοζωικού σχιστόλιθου και νεώτερων ασβεστόλιθων πάνω στον ασβεστόλιθο του Τριαδικού - Ιουρασικού, που είναι στη θέση του. Το σχιστολιθικό υπόβαθρο είναι μακράν, για το εξεταζόμενο πρόβλημα, και δεν επηρεάζει τις γεωλογικές-γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής.

Η περιοχή επιφανειακά καλύπτεται από κορήματα. Το μέσο πάχος των επωθημένων σχιστόλιθων είναι 3-5m, αλλά αυξάνει σημαντικά στα χαμηλότερα υψόμετρα και κυρίως προς ΒΑ.

Μετά από μια σειρά γεωτεχνικών ερευνών οι μελετητές του Ομίλου Τεχνικών Μελετών (ΤΕΠΕ) συμπέραναν ότι σε περίπτωση εκσκαφής του ορύγματος της σιδηροδρομικής γραμμής, θα δημιουργηθούν στην ανάντη περιοχή συνθήκες ανάλογες με αυτές που προκάλεσαν την υπάρχουσα κατολίσθηση οπότε είναι βέβαιο ότι η κατολίσθηση θα επανενεργοποιηθεί και θα επεκταθεί με κάθε προσπάθεια εκσκαφής.

Για την αντιμετώπιση της κατολίσθησης αρχικά προτάθηκε η εφαρμογή ριζικών λύσεων με απαλλοτρίωση του εργοστασίου και σταθεροποίηση της ευρύτερης περιοχής με χωματουργικά και στραγγιστικά έργα. Προτάθηκε αφαίρεση όλων των κατολισθητικών υλικών, από το υψόμετρο της σιδηροδρομικής γραμμής και πάνω, καθώς και το μεγαλύτερο μέρος των κορημάτων και των σχιστόλιθων. Αυτό συνεπάγεται την απομάκρυνση του εργοστασίου το οποίο εδράζεται σε κορήματα.

Αυτή η πρόταση αποκλείστηκε για οικονομικούς κυρίως λόγους. Έτσι σήμερα οι μελετητές προτείνουν η σιδηροδρομική γραμμή περί την Χ.Θ. 10+400 έως Χ.Θ. 10+690 να εδράζεται πάνω σε γέφυρα, της οποίας τα φορτία οδηγούνται στα θεμέλια όπου διανέμονται και στη συνέχεια μεταφέρονται στο έδαφος θεμελίωσης, τον ασβεστόλιθο.

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. Στη συνέχεια η βαθμονόμηση του μοντέλου με ανάδρομη ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων δίνει τη δυνατότητα μιας προσέγγισης του προβλήματος με την κατασκευή ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου της περιοχής κατολίσθησης, το οποίο περιέχει οτιδήποτε επηρεάζει την κατολίσθηση, τα μέτρα σταθεροποίησης της καθώς και τα κλισιόμετρα με των οποίων τις μετακινήσεις έγινε η εκτίμηση της επιφάνειας ολίσθησης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Plaxis (Version 7.0), το οποίο επιλύει γεωτεχνικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ακολουθεί περιγραφή της διάρθρωσης της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται παρουσίαση των κατολισθήσεων σε εδαφικά πρηνή και βραχώδης σχηματισμούς. Ουσιαστικά αναλύονται οι μορφές, τα αίτια και οι μέθοδοι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων, καθώς επίσης αναφέρονται εν συντομία τα όργανα που βοηθούν στην διαγνωστική των κατολισθήσεων.

Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρονται το ιστορικό της κατολίσθησης, τα γεωλογικά και τεκτονικά στοιχεία της περιοχής. Πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση παλαιότερων ερευνητικών εργασιών στην περιοχή της κατολίσθησης, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αυτών των ερευνητικών εργασιών. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα αυτών των εργασιών, τα οποία βοηθούν στην δική μας ανάλυση.

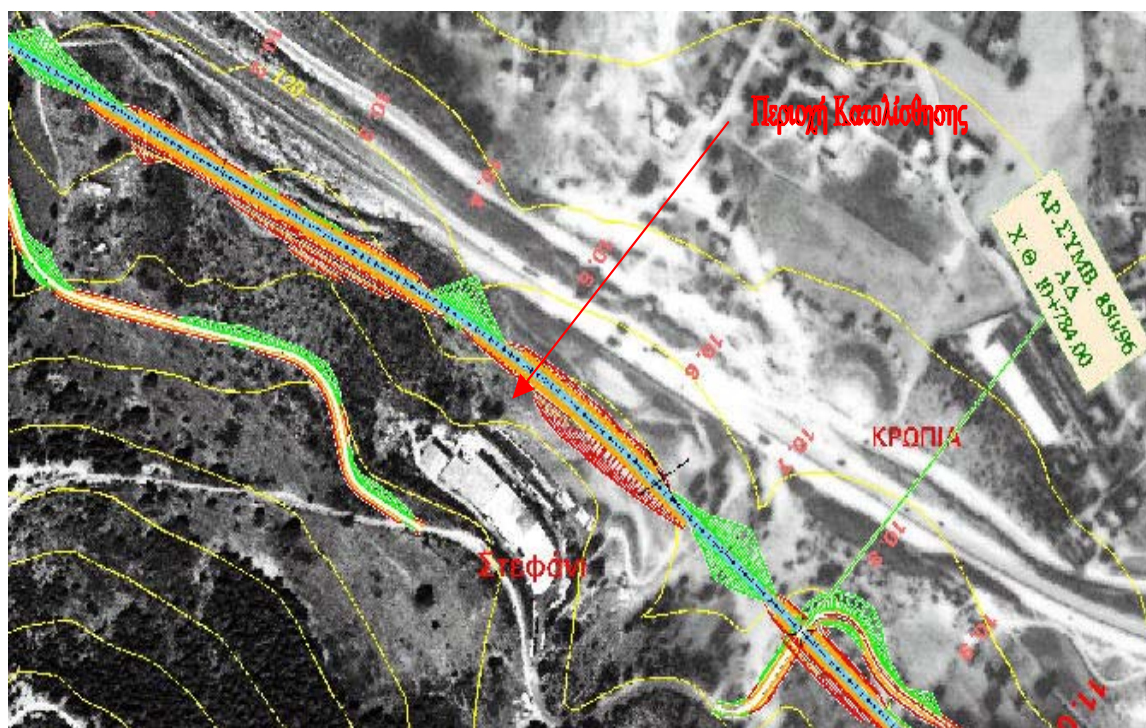
Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρηνών με την χρήση μεθόδων οριακής ισορροπίας, οι οποίες διαχωρίζονται σε πρηνή μεγάλου και περιορισμένου ύψους όσο αφορά την μορφή της επιφάνειας ολίσθησης.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στη περιγραφή της θεωρίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφει κάποια από τα σημαντικότερα κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται κάποια παραδείγματα εφαρμογών από την βιβλιογραφία, της ανάλυσης ευστάθειας εδαφικών πρηνών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο Κεφάλαιο 6, περιγράφονται αναλυτικά οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου Plaxis, μέρος των οποίων χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση.

Η διαδικασία προσομοίωσης και επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7. Περιγράφεται το μοντέλο, τα βήματα επίλυσης και η διαδικασία ανάδρομης ανάλυσης.

Στο Κεφάλαιο 8 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ
	ΟΡΥΓΜΑΤΑ - ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ
	ΣΗΡΑΓΓΑ
	CUT & COVER
	ΠΑΣΣΑΛΟΤΟΙΧΟΣ
	ΣΙΔ. ΕΦΥΡΑ
	ΑΝΙΣΩΠΕΔΗ ΔΙΑΒΑΣΗ
	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ
	ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
	ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ

Εικόνα 1.2 Μεγένθυνηση του Χάρτη της περιοχής κατολίσθησης (ΕΡΓΟΣΕ, 2003).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης που απειλεί τεχνικά έργα ή ιδιοκτησίες αναγκάζει αυτούς που καλούνται να αντιμετωπίσουν την κατάσταση να εργαστούν σε συνθήκες εξαιρετικής έντασης και πίεσης. Συνήθως δεν υπάρχει ο χρόνος αλλά ούτε και οι προϋποθέσεις για άμεση εκτέλεση των αναγκαίων εκείνων ερευνητικών εργασιών που θα προσφέρουν πληροφορίες για την διερεύνηση και αντιμετώπιση της καταστάσεως κατά ένα τεκμηριωμένο τρόπο. Είναι πραγματικά αρκετές φορές ασυμβίβαστη με την πραγματικότητα η απαίτηση άμεσης εκτέλεσης ερευνητικών εργασιών και εγκατάστασης οργάνων μετρήσεως, που η πραγματοποίησή τους απαιτεί συνήθως χρονοβόρες διαδικασίες, όταν η άμεση αντιμετώπιση της εξέλιξης της κατολίσθησης είναι επιτακτική.

Στην αντιμετώπιση των κατολισθήσεων σημασία έχει η κλίμακα του φαινομένου. Οι κατολισθήσεις που επεκτείνονται σε περιοχές πολλών εκατοντάδων μέτρων και που θέτουν σε κίνηση πολλά εκατομμύρια κυβικών μέτρων εδάφους ή βράχων, αποτελούν φαινόμενα που διαφέρουν από τις κατολισθήσεις μικρής έκτασης που δεν ξεπερνούν σε μήκος τα εκατό μέτρα και αντιμετωπίζονται με τρόπο διαφορετικό. Για τις μεγάλες κατολισθήσεις είναι δυνατό να διατεθούν μεγάλα ποσά για την έρευνα και την αναζήτηση των αιτιών των κατολισθήσεων.

Οι κατολισθήσεις, μικρές ή μεγάλες, αποτελούν φαινόμενα που δύσκολα μελετώνται και αντιμετωπίζονται. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μία γενική και σωστή μεθοδολογία για την επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούν. Ο μηχανικός βρίσκεται σχεδόν αβοήθητος μπροστά σ' ένα φυσικό φαινόμενο. Είναι η μόνη περίπτωση που ένα θέμα συμπεριφοράς του εδάφους δεν μπορεί να μελετηθεί με τρόπο σίγουρο. Άρα το φαινόμενο των κατολισθήσεων είναι πολύ σοβαρό αφού μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες υλικές καταστροφές και μερικές φορές την απώλεια εκατοντάδων ανθρώπων.

Για το λόγο αυτό υπάρχει μία πλουσιότερη βιβλιογραφία. Κάθε περίπτωση όμως πρέπει να αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα από τις άλλες (Τσότσος, 1991).

Θα εξεταστούν εδώ οι μορφές των κατολισθήσεων τόσο των εδαφικών υλικών, όσο και των βραχωδών σχηματισμών. Θα μελετηθούν επίσης οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν τις κατολισθήσεις, και οι μέθοδοι που επιτρέπουν σ' όρισμένες περιπτώσεις την πρόβλεψη τους.

2.1 Γενικά

Το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας, μεταβαλλόμενο και συχνά έντονο είναι αποτέλεσμα μακροχρόνιων γεωλογικών διεργασιών, ή και ανθρωπογενών επεμβάσεων και παραμένει γενικά σταθερό, εφόσον η διατμητική αντοχή των γεωυλικών είναι μεγαλύτερη από τις διατμητικές τάσεις, που προκαλεί το βάρος τους ή άλλες φορτίσεις. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, στις οποίες από διάφορες αιτίες η ευστάθεια τοπικά ανατρέπεται και τότε τα πρηνή φυσικά ή τεχνητά κατολισθαίνουν, συχνά με σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Οι αιτίες αυτές διακρίνονται σε δυο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει περιπτώσεις, στις οποίες παρατηρείται αύξηση των τάσεων, όπως η αύξηση του βάρους του εδάφους από την αύξηση της περιεκτικότητας του σε νερό, η προσθήκη φορτίων στην επιφάνεια από την κατασκευή κτιρίων ή άλλους λόγους, η δυσμενής τοπική αλλαγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών από διάβρωση ή εκσκαφή, ή ακόμη η εφαρμογή δυναμικών φορτίων. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει περιπτώσεις, στις οποίες παρατηρείται μείωση της αντοχής, όπως η ύγρανση, η οποία προκαλεί μείωση της συνοχής των συνεκτικών εδαφών, η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, η εξασθένιση διαγεννητικών δεσμών, από τη διαβρωτική δράση κλιματικών παραγόντων, η εξαλλοίωση γαιωδών ή βραχωδών σχηματισμών, η μείωση της αντοχής ευαίσθητων συνεκτικών εδαφών. Μία σημαντική σχετική παρατήρηση είναι ότι η παρουσία και η δυσμενής πολύπλευρη δράση του νερού αυξάνεται μετά από ισχυρές και μεγάλης χρονικής διάρκειας βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα σε πρηνή που παρέμεναν μέχρι τότε με δυσκολία ευσταθή, να ανατρέπεται η ισορροπία τους και να ενεργοποιούνται κατολισθητικά φαινόμενα (Τσότσος, 1991).

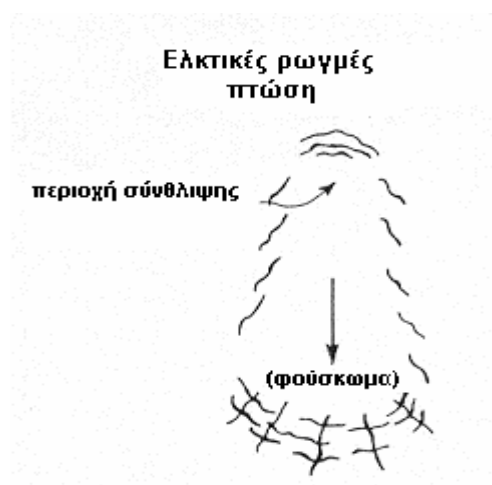
Επειδή οι μορφές και τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ποικιλία και ο μηχανισμός ανάπτυξης τους είναι σύνθετος και κατά περίπτωση διαφορετικός, έχει προταθεί η διάκριση τους με διάφορα κριτήρια σε κατηγορίες. Πράγματι για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση, η αναγνώριση και η κατάταξη της είναι χρήσιμη στην κατανόηση του μηχανισμού της κατολίσθησης, και στη συνέχεια στην εκτίμηση της πιθανής εξέλιξης της και στη μελέτη των έργων σταθεροποίησης.

Μία πρώτη κρίσιμη κατάταξη αναφέρεται στο πόσο είναι ενεργός η κατολίσθηση. Έτσι διακρίνονται οι διαβαθμίσεις ενεργός - λανθάνουσα - σταθεροποιημένη κατολίσθηση (Zaruba & Mencl, 1969).

Οι ενεργές κατολισθήσεις διακρίνονται σχετικά εύκολα από ορισμένες χαρακτηριστικές ενδείξεις, όπως η κάθετη στη διεύθυνση της κατολίσθησης κύρια πτώση στη στέψη της (Σχήμα 2.1), η οποία δεν καλύπτεται από βλάστηση και είναι πολύ απότομη, οι αποκλίσεις από την κατακόρυφη δένδρων και στύλων, οι μεταθέσεις και η διακοπή της συνέχειας οδών ή φρακτών, ή τέλος η παρατήρηση ρωγμών στο έδαφος και στις κατασκευές. Ο εντοπισμός λανθανουσών κατολισθήσεων είναι δυσκολότερος και απαιτεί προσεκτική παρατήρηση καθώς η κύρια πτώση, είτε διαβρώνεται με το χρόνο και καλύπτεται από βλάστηση, είτε καταστρέφεται, με τα σύγχρονα ισχυρά μηχανικά μέσα, ενώ οι ρωγμές γεμίζουν από φερτά υλικά και οι βλάβες στις κατασκευές αποκαθίστανται. Είναι εύλογο, ότι στις περιπτώσεις αυτές είναι ενδεχόμενη η επαναδραστηριοποίηση της κατολίσθησης, εφόσον ανατραπεί η ευαίσθητη ισορροπία της απ' τυχόν δυσμενή φυσική εξέλιξη ή άστοχη ανθρωπογενή επέμβαση (π.χ. εκσκαφή στον πόδα του πρανούς) (Τσότσος, 1991).

Δύο άλλες χρήσιμες κατατάξεις δίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2, με κριτήρια το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης και την ταχύτητα της εξέλιξης της αντίστοιχα (Τσότσος, 1991).

Οι κατολισθήσεις μελετώνται από γεωλόγους και μηχανικούς γενικά με διαφορετικό τρόπο προσέγγισης. Οι γεωλόγοι θεωρούν τις κατολισθήσεις ως φυσική διεργασία και ως μέρος του γεωλογικού κύκλου και περιορίζονται στη μελέτη του μηχανισμού των



Σχήμα 2.1 Κάτοψη τυπικής διάταξης επιφανειακών ρωγμών σε πρανές συνεκτικού εδάφους (Zaruba & Mencl, 1969).

Πίνακας 2.1: Κατολισθήσεις με κριτήριο το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (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

με βάση τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά τους, συνήθως χωρίς να καταλήγουν σε λεπτομερείς ποσοτικές εκτιμήσεις. Οι μηχανικοί, από την άλλη πλευρά, μελετούν την ευστάθεια έχοντας συχνά μόνο περιορισμένη και ασαφή γνώση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών στοιχείων, με κύριο στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας, του οποίου υπερτονίζουν τη σημασία και αξιοπιστία (Broms, 1975).

Πίνακας 2.2: Κατολισθήσεις με κριτήριο την ταχύτητα της εξέλιξης της (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

Στην πράξη το θέμα συνήθως εμφανίζεται με μια από τις τρεις παρακάτω συγκεκριμένες μορφές (Τσότσος, 1991):

(α) Ζητείται εξαρχής ο σχεδιασμός ενός έργου, π.χ. ενός επιχώματος, ή μίας εκσκαφής, συνήθως κάτω από ορισμένους τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς.

(β) Σε θέση όπου πρόκειται να κατασκευασθεί ένα έργο, συνήθως κτιριακό, και τα αρχικά δεδομένα (π.χ. σημαντική κλίση) δημιούργησαν ένα πρώτο προβληματισμό, ζητείται η εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας και στη συνέχεια, εάν υπάρχει πρόβλημα, η τεχνική αντιμετώπιση του.

(γ) Σε ενεργό κατολίσθηση ζητείται να προβλεφθεί η εξέλιξη της και να προταθούν, εάν κριθεί, ότι χρειάζονται και εάν είναι δυνατόν, κατάλληλα μέτρα σταθεροποίησης της.

Στην πρώτη από τις τρεις περιπτώσεις, τον κύριο ή τον αποκλειστικό λόγο έχει ο μηχανικός, ενώ στις άλλες δύο απαιτείται καλή συνεργασία μηχανικού και τεχνικού γεωλόγου.

2.2 Τι είναι κατολίσθηση

Οι οποιεσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτίων, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρηνή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα, φέρονται με τον γενικό όρο κατολισθήσεις (Κουμαντάκης, 1984). Η κατολίσθηση προκαλείται από τις κινήσεις πρηνών, στα οποία αστοχία συμβαίνει κατά μια συγκεκριμένη επιφάνεια ή κατά συνδυασμό επιφανειών.

2.3 Χαρακτηριστική ονοματολογία κατολισθήσεων

Στη συνέχεια δίδεται χαρακτηριστική ονοματολογία κατολισθήσεων σύμφωνα με τον Κουμαντάκη (1984):

- **Κόγχη ή ρίζα** κατολίσθησης είναι η εκτομή της κλιτύος από την οποία διαχωρίστηκε η μάζα που κατολίσθησε από το σταθερό τμήμα.
- **Επιφάνεια ολισθήσεως** είναι η επιφάνεια εκείνη πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα η μετακίνηση των μαζών που κατολίσθησαν.
- **Σώμα** της κατολίσθησης αποτελεί η μάζα των υλικών που μετακινήθηκαν.
- Ο **κόνος ή σωρός** της κατολίσθησης σχηματίζεται από τη συσσώρευση των υλικών, τα οποία αφού μετακινήθηκαν κατά μία διαδρομή, σταμάτησαν και συγκεντρώθηκαν στη θέση στην οποία η κινητική τους ενέργεια μηδενίστηκε, δηλαδή στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης.
- **Πόδας** της κατολίσθησης είναι το ακραίο, χαμηλότερο συνήθως, τμήμα του κώνου.

2.4 Μορφές των κατολισθήσεων

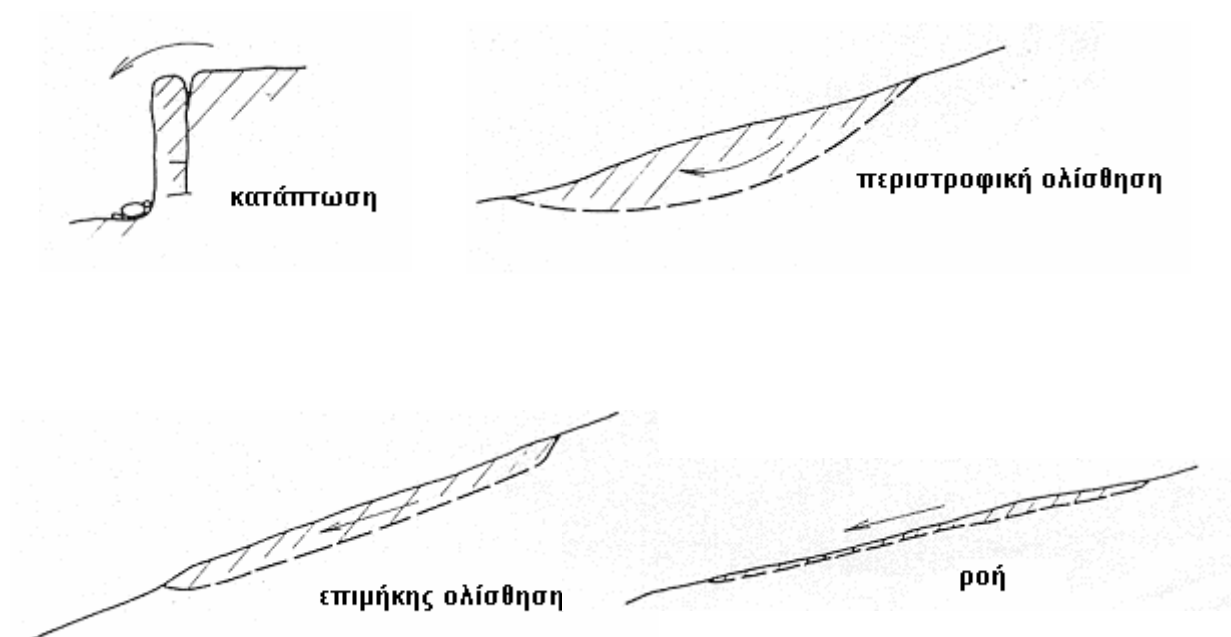
Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μορφών και μηχανισμών κατολισθήσεως, και δεν είναι δυνατό να δοθεί μία απλή παρουσίαση του συνόλου του φαινομένου. Μπορεί όμως να γίνει η διάκριση που βασίζεται στον τρόπο μετακίνησης της εδαφοβραχομάζας.

Σύμφωνα με την κίνηση της εδαφοβραχομάζας, διακρίνονται τέσσερις βασικοί τύποι κατολισθήσεων (Bromhead, 1986):

1. **Οι καταπτώσεις.** Οι καταπτώσεις ογκοτεμαχίων πετρώματος ή εδαφομαζών εκδηλώνονται σε πρηνή μεγάλη κλίσης και η μάζα αποχωρίζεται αμέσως από την μητρική μάζα.
2. **Οι περιστροφικές ολισθήσεις.** Αντιπροσωπευτική περίπτωση των περιστροφικών μετακινήσεων αποτελούν οι κατολισθήσεις κατά μήκος μιας κυκλικής επιφάνειας ή μίας επιφάνειας που έχει παραπλήσια μορφή. Συχνά η κατολίσθηση αποτελείται από ένα σύνολο διαδοχικών κυκλικών επιφανειών.
3. **Οι επιμήκεις ολισθήσεις.** Οι επιμήκεις μετατοπίσεις παρατηρούνται κατά μήκος ασθενών ή ολισθηρών διεπιφανειών, όταν η διεύθυνση τους είναι περίπου παράλληλη προς την ελεύθερη επιφάνεια.
4. **Οι ροές.** Κατά την ροή η μετακίνηση του υποκείμενου υλικού δεν εντοπίζεται σε συγκεκριμένη επιφάνεια αλλά διαχέεται σε όλοι την μετακινούμενη μάζα.

Στο Σχήμα 2.2 δίνονται αντιπροσωπευτικά διαγράμματα για κάθε τύπο κατολίσθησης.

Ακολουθεί ταξινόμηση των παραπάνω μορφών ανάλογα το είδος των πρηνών, εδαφικά και βραχώδη.



Σχήμα 2.2 Κύριες μορφές ολισθήσεων (Bromhead, 1986).

2.4.1 Κατολισθήσεις εδαφικών πρανών

Τα εδαφικά πρανά, κορήματα ($d > 2\text{mm}$) ή γεωϋλικά ($d < 2\text{mm}$) εμφανίζουν τις παρακάτω μορφές (Bromhead, 1986):

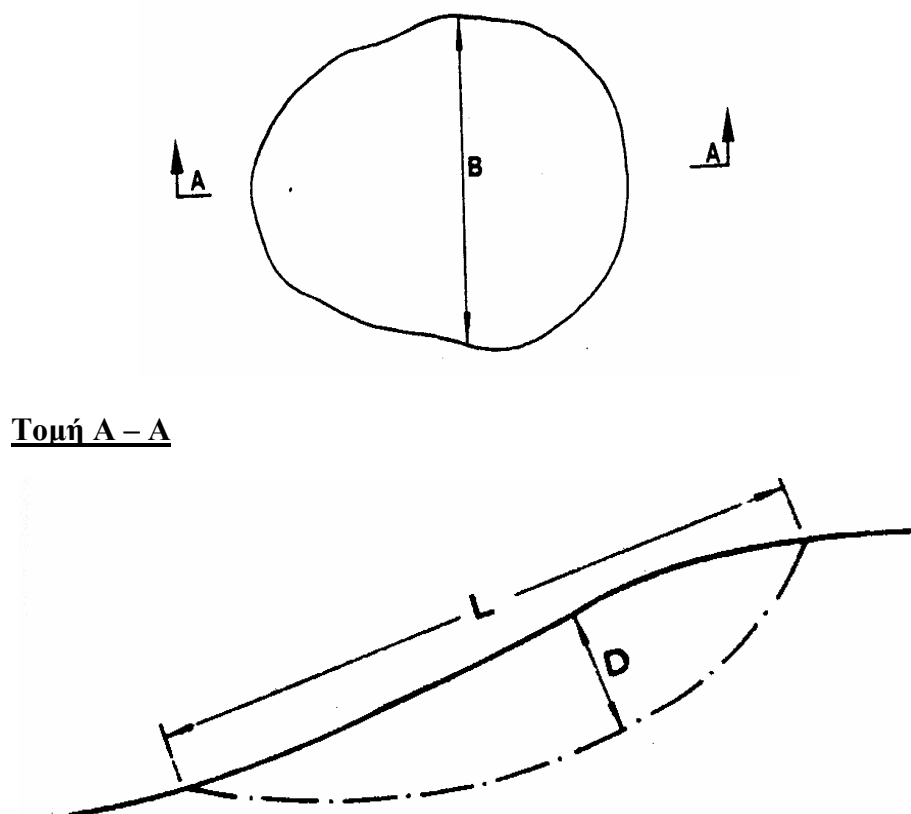
- Καταπτώσεις κορημάτων ή γεωδών υλικών
- Περιστροφικές μετακινήσεις κορημάτων ή γεωδών υλικών
- Επιμήκεις μετατοπίσεις κορημάτων ή γεωδών υλικών
- Ροές κορημάτων ή γεωδών υλικών.

α. Όσον αφορά τις καταπτώσεις στα εδαφικά πρανά πιο συνηθισμένη είναι η περίπτωση μία στρώση υψηλής διαβρωσιμότητας να υπόκειται και να στηρίζει ανθεκτικότερα εδάφη, όπως π.χ. η περίπτωση σε μία μη συνεκτική χαλαρή στρώση να στηρίζεται ένα υπερκείμενο υπερστερεοποιημένο και ανθεκτικό αργιλώδες αμμοχάλικο. Συχνά επίσης συναντώνται πρανά υπερστερεοποιημένων αργίλων με υψηλές κλίσεις, στο φρύδι των οποίων έχουν αναπτυχθεί βαθειές κατακόρυφες

ρωγμές, που μετά από βροχοπτώσεις γεμίζουν με νερά και τότε δέχονται επιπρόσθετα ισχυρές υδροστατικές πιέσεις (Τσότσος, 1991).

β. Περιστροφικής μορφής επιφάνειες ολίσθησης παρατηρούνται κυρίως σε ομοιόμορφα αργιλικά ή πιο γενικά σε συνεκτικά υλικά. Σε πρανή από ομοιογενείς κανονικά στερεοποιημένες ή ελαφρά υπερστερεοποιημένες αργίλους, η επιφάνεια ολίσθησης είναι καμπύλη και μοιάζει με τόξο κύκλου. Συχνά οι επιφάνειες είναι βαθιές και η κυκλική κατολίσθηση χαρακτηρίζεται από το λόγο D/L , του μέγιστου D βάθους προς το μήκος L της κατολίσθησης (Σχήμα 2.3). Για τις τιμές του λόγου αυτού ισχύουν οι ανισότητες,

$$0,16 \leq D/L \leq 0,33$$



L = Μέγιστο μήκος

D = Μέγιστο πάχος

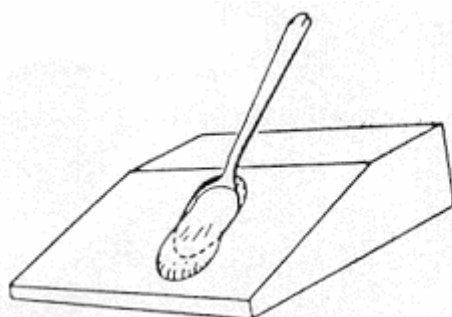
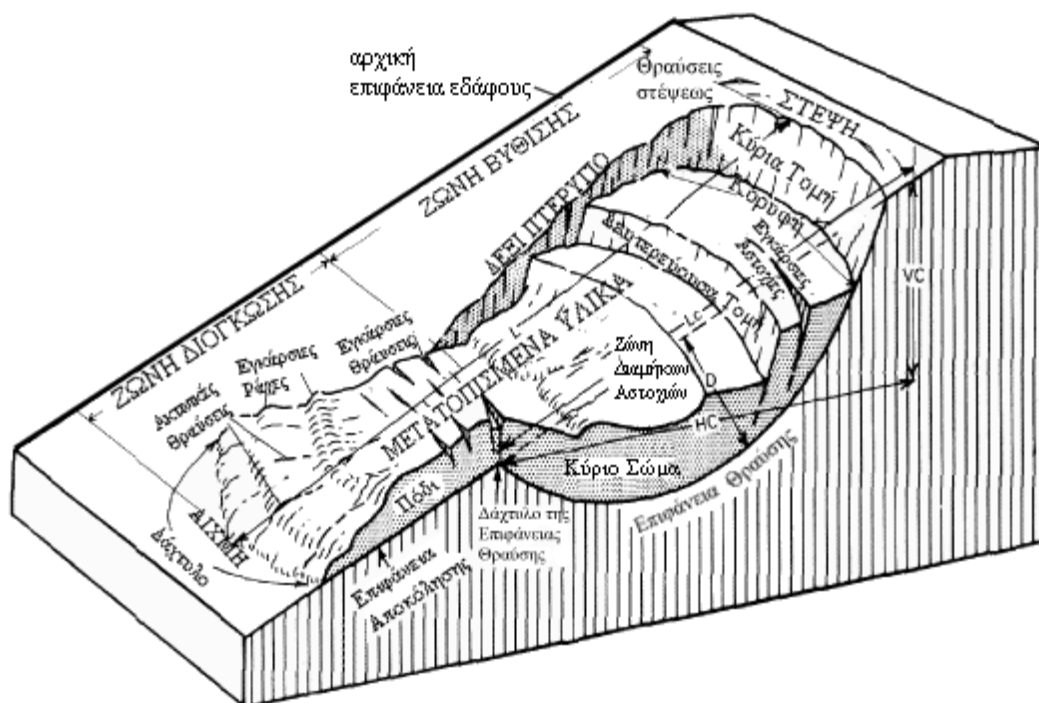
B = Μέγιστο πλάτος

Σχήμα 2.3 Κυκλική κατολίσθηση (Skempton & Hutchinson, 1969).

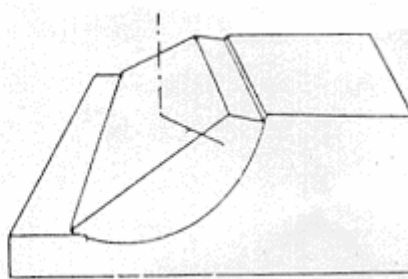
Ακόμη ισχύει ότι όσο η κλίση είναι πιο μεγάλη, τόσο το βάθος D γίνεται μεγαλύτερο (Skempton & Hatchinson, 1969).

Κυκλικές κατολισθήσεις παρατηρούνται σε εδάφη αρκετά ομοιογενή. Οι πολλαπλές κυκλικές κατολισθήσεις αντιστοιχούν σε εδάφη που παρουσιάζουν μία σχετική ανομοιογένεια.. Στο Σχήμα 2.4α δίνεται μια λεπτομερής εικόνα περιστροφικής κατολίσθησης, ενώ στα δυο άλλα διαγράμματα του σχήματος 2.4. δίνονται με απλές γραμμές οι δυο τυπικές μορφές περιστροφικής κατολίσθησης, όσον αφορά το σχετικό μέγεθος της κάθετης στο επίπεδο της κίνησης διάστασης.

α)



β)

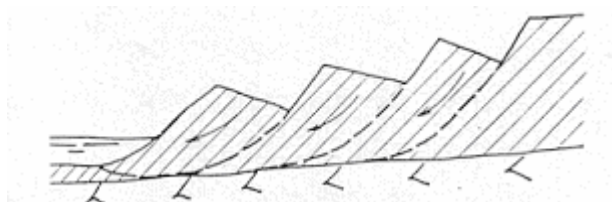


γ)

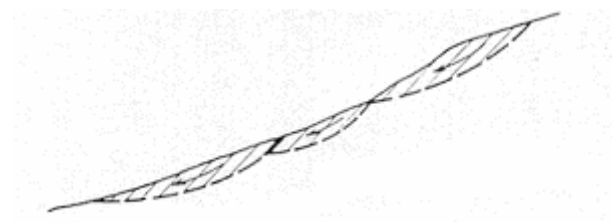
Σχήμα 2.4 α) Λεπτομερής εικόνα σύνθετης, περιστροφικής μορφής κατολίσθησης.

β, γ) Τυπικές μορφές περιστροφικών κατολισθήσεων (Τσότσος, 1991).

Τέλος η μορφή των πολλαπλών περιστροφικών ολισθήσεων ή η συγγενής μορφή των αβαθών διαδοχικών ολισθήσεων (Σχήμα 2.5) παρατηρούνται πιο συχνά σε ενεργές κατολισθήσεις, σε πρηνή υπερστερεοποιημένων σχιστωδών αργίλων, σε διάφορους χρόνους, με επάλληλες εκδηλώσεις κατά σειρά από τα κατάντη προς ανάντη. Τούτο συμβαίνει καθώς μετά την αρχική ολίσθηση, η δημιουργία του περίπου κατακόρυφου μετώπου της ανώτερης κυρίας ρωγμής και ενδεχομένως η πλήρωση των τυχόν ρωγμών που βρίσκονται υψηλότερα από το μέτωπο με νερό, αδυνατίζουν την αντιστήριξη των ανάντη μαζών και τα φαινόμενα μετατίθενται προς τα ανάντη, έως ότου τα γεωμετρικά δεδομένα ή τα μηχανικά χαρακτηριστικά γίνουν πιο ευνοϊκά (Skempton & Hutchinson, 1969).



πολλαπλές περιστροφικές ολισθήσεις



διαδοχικές ολισθήσεις

Σχήμα 2.5 Μορφές πολλαπλών περιστροφικών ολισθήσεων (Skempton & Hutchinson, 1969).

Όταν τα γεωυλικά του πρηνούς δεν είναι ομοιόμορφα, τότε η επιφάνεια ολίσθησης απομακρύνεται από το κυκλικό σχήμα και όπως είναι φυσικό, αναπτύσσεται κατά μήκος επιφανειών χαμηλής αντοχής, οι οποίες ενυπάρχουν στα ανισότροπα και ασυνεχή γεωυλικά, όταν οι διευθύνσεις τους ευνοούν την κίνηση.

γ. Μια συνηθισμένη στον ελλαδικό χώρο (Ηπειρος, Πιερία, Χαλκιδική κ.α) περίπτωση, είναι πρηνή υπερστερεοποιημένων σκληρών σχισμωδών αργίλων, οι οποίες εμπεριέχουν λεπτές διαπερατές και υδροφόρες ενστρώσεις, στις οποίες εποχιακά αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις του νερού. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό

με το έντονο ανάγλυφο, έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση κατολισθητικών φαινομένων.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ περιστροφικών και επιμηκών ολισθήσεων είναι ότι στις μεν πρώτες η περιστροφική κίνηση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των κινουσών δυνάμεων και τη βελτίωση της ευστάθειας, ενώ στις δεύτερες μετά την κίνηση το καθεστώς των δυνάμεων δεν διαφοροποιείται γεωμετρικά (Τσότσος, 1991).

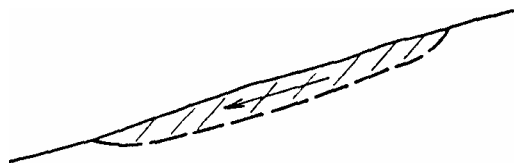
Στα διαγράμματα του σχήματος 2.6 απεικονίζονται δύο ειδικές μορφές επιμηκών ολισθήσεων:

- Στο Σχήμα 2.6α φαίνεται μια ενιαία επιμήκης ολίσθηση, συνήθως αβαθής. Ο λόγος (D/L) σπάνια είναι μεγαλύτερος από το 0,10. Συνήθως παρατηρείται στην επιφάνεια έδρασης εξαλλοιωμένου αργιλικού μανδύα ή φερτών υλικών, που επικάθονται σε υπόβαθρο και η διεπιφάνεια είναι περίπου παράλληλη προς την ελεύθερη επιφάνεια. (Skempton, 1954).
- Στο Σχήμα 2.6β φαίνεται μια πολλαπλή επιμήκης ολίσθηση. Πολλές ενεργές κατολισθήσεις φυσικών πρανών στον ελλαδικό χώρο μορφολογικά και φαινομενολογικά ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Κατολισθήσεις αυτής της ειδικής μορφής παρατηρούνται, όταν συντρέχουν οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν για τις επιμήκεις ολισθήσεις, μαζί με τα ειδικά αίτια που αναφέρθηκαν στην κατηγορία των πολλαπλών περιστροφικών ολισθήσεων.

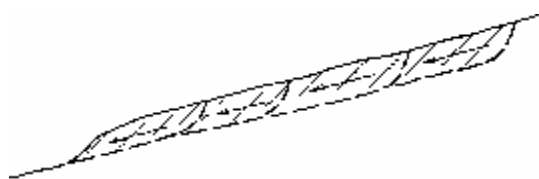
Επαναδραστηριοποίηση και προς τα άνω επέκταση της ολίσθησης γίνεται συνήθως σε τμήματα μήκους μικρότερου από το μήκος της πρώτης ολίσθησης, συχνά μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις ή στην αρχή της άνοιξης, την εποχή που λιώνουν τα χιόνια του χειμώνα.

δ. Οι ροές παρατηρούνται σε εδάφη μικρής αντοχής μέχρι λασπώδη, τα οποία κινούνται με μικρή ταχύτητα χάνοντας την εσωτερική τους δομή. Το μήκος της ροής είναι πάνω από δεκαπλάσιο από το πλάτος B. Η κλίση των πρανών είναι συνήθως μικρότερη από 15°. Κοινό χαρακτηριστικό των διαφόρων τύπων ροών είναι, ότι η κινούμενη εδαφική μάζα παρουσιάζει την εικόνα υλικού θραυσμένου, η κίνηση μοιάζει περισσότερο ως ροή ενός πυκνού ιξώδους ρευστού και όχι ως ολίσθηση

στερεού και είναι χαρακτηριστική η απουσία ρωγμών στην επιφάνεια. Στα διαγράμματα του σχήματος 2.7 δίνονται με απλές γραμμές τρεις επιμέρους περιπτώσεις (Skempton & Hutchinson, 1969).



α) ενιαία επιμήκης ολίσθηση

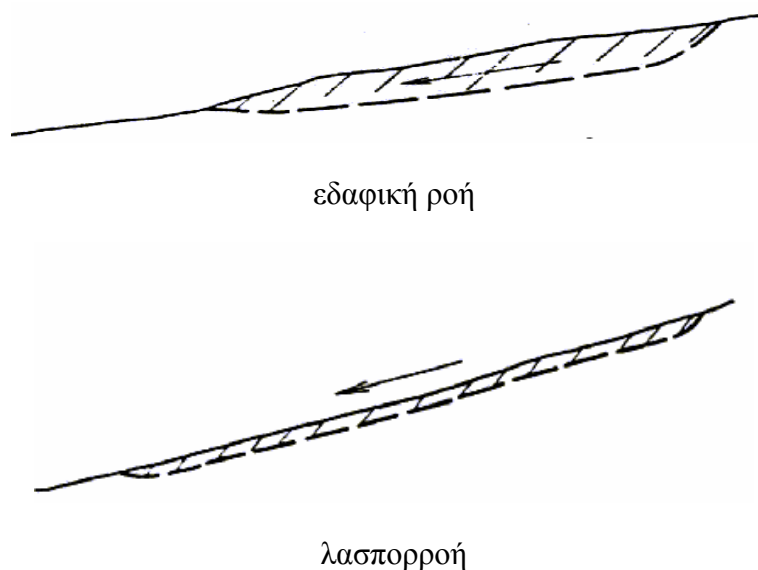


β) πολλαπλή επιμήκης ολίσθηση

Σχήμα 2.6 Μορφές επιμηκών ολισθήσεων (Skempton, 1954).

Εδαφικές ροές, έχουν ονομασθεί οι σχετικά πιο αργές ροές πολυκερματισμένων μαλακών λεπτόκοκκων γεωυλικών, όπως μερικές φορές παρατηρούνται στην περιοχή του ποδιού της κατολίσθησης. Κατά ένα τρόπο οι εδαφικές ροές αποτελούν μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ επιμήκους ολίσθησης και λασπορροών (Skempton & Hutchinson, 1969).

Χαρακτηριστικό των λασπορροών είναι ότι το υδαρές γεωυλικό δίνει ακόμη περισσότερο την εικόνα του ρευστού. Συνήθως παρουσιάζονται σε αργλικούς σχηματισμούς οι οποίοι όμως εμπεριέχουν σε πυκνή διάταξη αμμώδεις ή ιλυοαμμώδεις ενστρώσεις, συνεχείς ή φακοειδείς, στις οποίες αναπτύσσεται υψηλή πίεση του νερού των πόρων και η οποία προκαλεί τη ρευστοποίηση ή τη διάβρωση τους ή ακόμη και τα δύο φαινόμενα μαζί.



Σχήμα 2.7 Τυπικές μορφές ροών (Skempton & Hutchinson, 1969).

2.4.2 Κατολισθήσεις των βραχωδών σχηματισμών

Οι κατολισθήσεις αυτές ενδιαφέρουν ιδιαίτερα τους Έλληνες μηχανικούς γιατί παρατηρούνται πολύ συχνά στην χώρα μας.

Δεν είναι δυνατό να ταξινομηθούν με τρόπο απλό οι μορφές τους οι οποίες εξαρτώνται απόλυτα από το βαθμό και τη διαμόρφωση της ρηγμάτωσης του βράχου.

Οι κατολισθήσεις αυτές μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες (Βαλαλάς, 1984):

- Τις κατολισθήσεις πρανών που παρουσιάζουν μία ομοιόμορφη και περιορισμένη ρηγμάτωση. Στην περίπτωση αυτή ο βράχος συμπεριφέρεται σαν ένα έδαφος.
- Τις κατολισθήσεις που παρατηρούνται κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών θραύσης. Παράδειγμα τέτοιων κατολισθήσεων παρατηρείται στο φλύσχη όταν τα επίπεδα της ρηγμάτωσης, είναι περίπου παράλληλα 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 της επιφάνειας πάκτωσης τους.

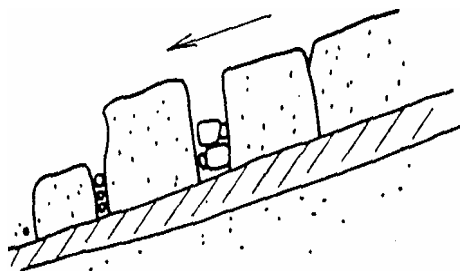
Η ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών σε σχέση με τη κίνηση των βράχων είναι (Bromhead, 1986):

- Καταπτώσεις βράχων
- Περιστροφικές μετακινήσεις βράχων
- Επιμήκεις μετατοπίσεις βράχων
- Ροές μικρών ογκοτεμαχίων πετρώματος

α) Στα βραχώδη πρηνή παρατηρούνται καταπτώσεις σε πολλούς τύπους πετρωμάτων, κυρίως όταν υπάρχουν ρήγματα, ρωγμές, αρμοί και άλλης μορφής ασυνέχειες και επιφάνειες χαμηλής αντοχής. Οι αιτίες που προκαλούν καταπτώσεις είναι διάφορες, όπως η είσοδος νερού στις ρωγμές και η ανάπτυξη πιέσεων, η υποσκαφή, ή ακόμη η μείωση της αντοχής από θερμοκρασιακές μεταβολές, από παγετό ή από άλλα αίτια διάβρωσης. Το θέμα αποτελεί αντικείμενο κυρίως της Βραχομηχανικής (Τσότσος, 1991).

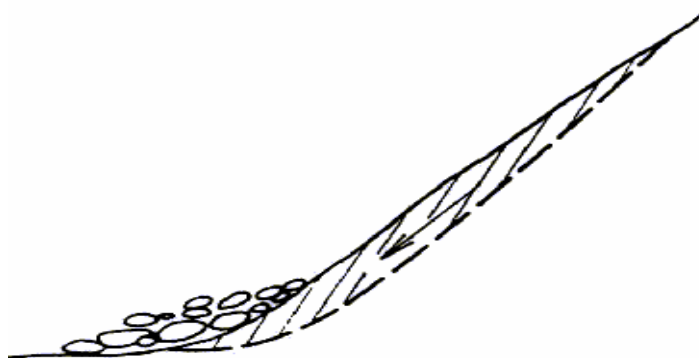
β) Περιστροφικές μετακινήσεις βράχων παρατηρούνται σε βραχομάζες χαμηλών ιδιοτήτων συνοχής (π.χ. που έχουν υποστεί μεγάλο βαθμό αποσάθρωσης) ή σε βραχομάζες που διασχίζονται από πολλές οικογένειες ασυνεχειών μεγάλης πυκνότητας. Ο τύπος αυτός αστοχίας εκδηλώνεται όταν τα μεγέθη των ογκοτεμαχίων που απομονώνονται μεταξύ των ασυνεχειών είναι πολύ μικρότερα από το ύψος του πρηνούς (Hoek & Bray, 1981).

γ) Το πρηνές αποτελείται από τεμάχια που χωρίζονται μεταξύ τους με αρμούς και ολισθαίνουν ανεξάρτητα κατά μήκος της αντίστοιχης επιφάνειας. Ολισθήσεις αυτού του τύπου ενεργοποιούνται συνήθως μετά από αργή διάβρωση ή υποσκαφή στο πόδι του πρηνούς. Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται μια επιμήκης ολίσθηση τεμαχίων (Τσότσος, 1991).



Σχήμα 2.8 Επιμήκης ολίσθηση τεμαχών (Skempton, 1954).

δ) Οι ροές των βραχωδών πρανών είναι ροές χονδρόκοκκων φερτών υλικών, συνήθως χωρίς επιφανειακό φυτικό κάλυμμα, και συχνά η έναρξη τους συνδυάζεται με καταρρακτώδεις βροχές και πλημμύρες σε παλιές κοίτες χειμάρρων. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται μια ροή χονδρόκοκκων φερτών υλικών (Τσότσος, 1991).



Σχήμα 2.9 Ροή φερτών υλικών (Skempton & Hutchinson, 1969).

Μία άλλη ταξινόμηση των βραχωδών κατολισθήσεων μπορεί να γίνει με βάση την κλίμακά τους (Βαλαλάς, 1984):

- ❖ Καταστροφικές κατολισθήσεις: πάνω από $10^6 \mu^3$
- ❖ Μεγάλες κατολισθήσεις: από $10^4 \mu^3$ μέχρι $10^6 \mu^3$
- ❖ Κατολισθήσεις συνήθεις: από $10^4 \mu^3$ μέχρι $10^3 \mu^3$
- ❖ Καταπτώσεις ογκολίθων και λίθων: μέχρι $0,1 \mu^3$

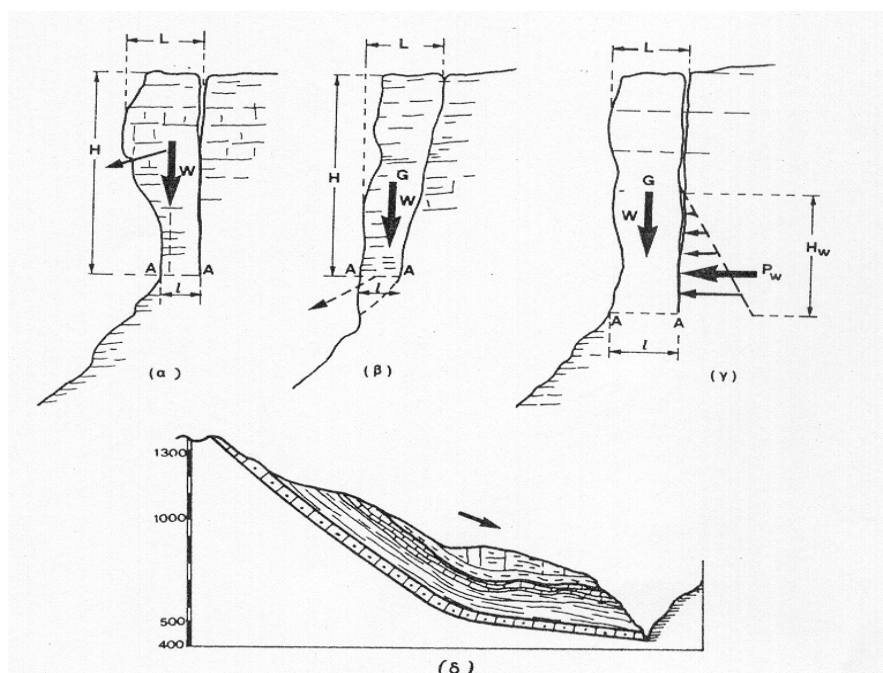
Στο Σχήμα 2.10 δίνονται διάφορες χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατολίσθησης των βραχωδών σχηματισμών. Στο Σχήμα 2.10α φαίνεται η θραύση από ανατροπή, στο

Σχήμα 2.10β η θραύση από ολίσθηση στη βάση, στο Σχήμα 2.10γ η θραύση από υδροστατική πίεση και τέλος στο Σχήμα 2.10δ η θραύση πάνω σε ανώμαλη βάση.

Η μελέτη της ευστάθειας των βραχωδών πρανών γίνεται με βάση τα δεδομένα που αφορούν την γεωμετρία των σχηματισμών. Το πιο απλό είναι να χρησιμοποιηθούν γραφικές μέθοδοι (Βαλαλάς, 1984).

2.5 Αίτια των κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις οφείλονται στην επίδραση του ίδιου βάρους του εδάφους, στην ενέργεια των δυνάμεων ροής, στις σεισμικές δυνάμεις ή σε άλλες εξωτερικές δυναμικές επιπονήσεις, στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, στη μεταβολή της γεωμετρίας του πρανούς και σε άλλες δευτερεύουσες αιτίες όπως είναι π.χ. οι κλιματικές αλλαγές. Συχνά η κατολίσηση οφείλεται σ' ένα συνδυασμό των πιο πάνω επί μέρους αιτιών.



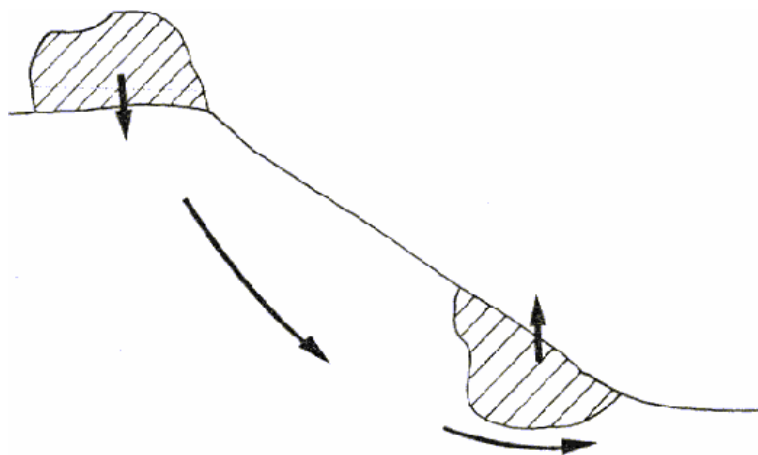
Σχήμα 2.10 Περιπτώσεις κατολίσησης των βραχωδών σχηματισμών (Βαλαλάς, 1984).

Είναι απαραίτητο να ανεβρεθούν οι αιτίες που προκαλούν τις κατολισθήσεις για να αναζητηθεί ο πιο κατάλληλος τρόπος ανάσχεσής τους. Η αναζήτηση των αιτιών μπορεί να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, χωρίς να οδηγήσει υποχρεωτικά στην εξήγηση

του φαινομένου. Το πρόβλημα της αναζήτησης των αιτιών πρέπει να αντιμετωπίζεται με σύστημα και ψυχραιμία και σε συνεργασία, αν αυτό απαιτηθεί, με ειδικευμένους γεωλόγους. Θα εξεταστούν σύντομα οι κυριότερες αιτίες που προκαλούν τις κατολισθήσεις.

2.5.1 Ίδιο βάρος και σεισμικές δυνάμεις

Από τη θεωρία των κατολισθήσεων φάνηκε ότι οι ροπές αστάθειας που οδηγούν στην κατολίσθηση εξαρτώνται πριν απ' όλα από τις δυνάμεις βαρύτητας. Όταν προστεθούν φορτία στην κορυφή του πρανούς ο κίνδυνος κατολίσθησης αυξάνεται. Επίσης αυξάνεται όταν αφαιρεθούν φορτία στη βάση, γιατί οι δυνάμεις βαρύτητας κοντά στο πόδι του πρανούς αυξάνουν τις ροπές ευστάθειας (Σχήμα 2.11). Αντίθετα η ευστάθεια βελτιώνεται όταν αφαιρεθούν φορτία στην κορυφή ή προστεθούν στη βάση. Οι σεισμικές δυνάμεις αυξάνουν τον κίνδυνο των κατολισθήσεων. Είναι σχεδόν αδύνατο να γίνουν προβλέψεις στις περιπτώσεις αυτές. Αλλά κατά κανόνα δεν συνιστάται η θεμελίωση έργων σε επικίνδυνα πρανή, όταν υπάρχει κίνδυνος σεισμού. Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός του 1959 απαγορεύει τις κατασκευές σε τέτοιες ζώνες (Βαλαλάς, 1984).



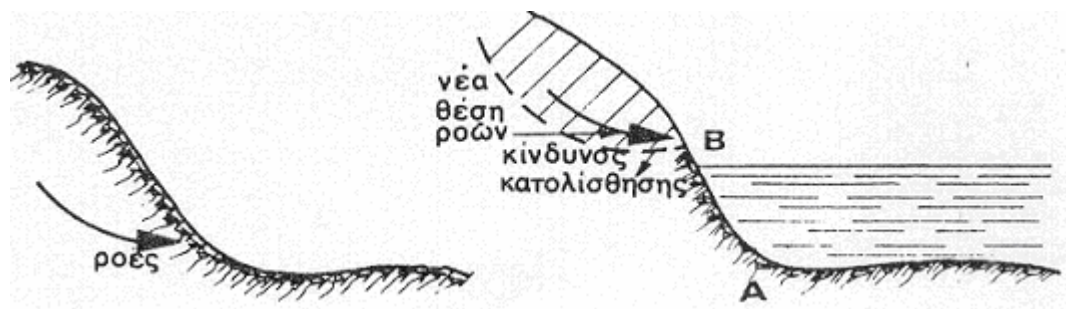
Σχήμα 2.11 Πρόσθεση και αφαίρεση φορτιών στη κορυφή και στη βάση του πρανούς (Βαλαλάς, 1984).

2.5.2 Δυνάμεις ροής

Οι δυνάμεις ροής ενεργούν με τρόπο ανάλογο με τις δυνάμεις βαρύτητας. Ένα πρανές βρίσκεται συνήθως σε ισορροπία υπό την επίδραση των μόνιμων υπόγειων ροών, κατολισθήσεις παρατηρούνται όταν αλλάζει η διαίτα των υπόγειων ροών.

Αυτό μπορεί να συμβεί όταν σφραγιστούν οι πηγές στη βάση του πρανούς ή όταν δημιουργηθούν αυξημένες ροές μετά από μία ισχυρή μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση. Παράδειγμα τέτοιων κατολισθήσεων αποτελούν οι κατολισθήσεις γύρω από το φράγμα των Κρεμαστών (Σχήμα 2.12). Η ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα εμπόδισε τις ροές στο κάτω μέρος των πρανών, και οδήγησε σε νέες γραμμές ροής που καταλήγουν στο Β, πάνω από την στάθμη της λίμνης με αποτέλεσμα τη δημιουργία σχεδόν οριζόντιων δυνάμεων ροής που προκάλεσαν τις κατολισθήσεις (Βαλαλάς, 1984).

Η μεταβολή της διάταξης ροής είναι μία πιο τις πιο συνηθισμένες αιτίες των κατολισθήσεων και πρέπει να διερευνούνται πριν από τις άλλες.



Σχήμα 2.12 Κατολισθήσεις γύρω από το φράγμα των Κρεμαστών (Βαλαλάς, 1984).

2.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

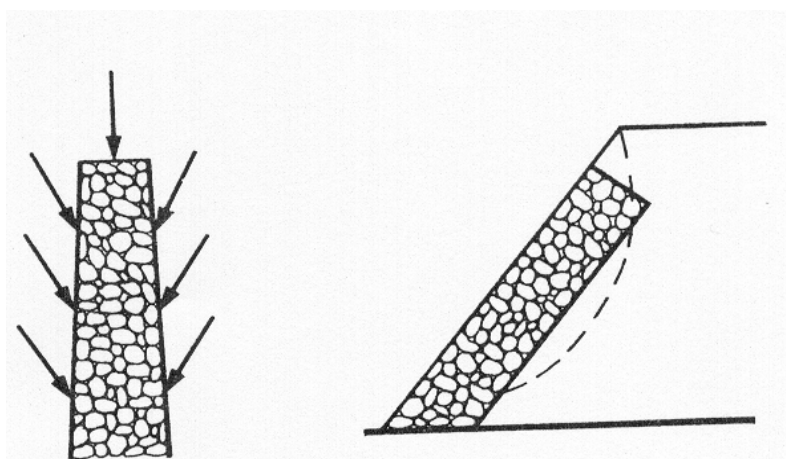
Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κατολισθήσεων είναι απαραίτητο να γίνεται όσο το δυνατό καλύτερα η διερεύνηση των αιτιών που τις προκαλούν. Αλλιώς υπάρχει κίνδυνος τα προτεινόμενα μέτρα να επιδεινώσουν την κατάσταση.

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.

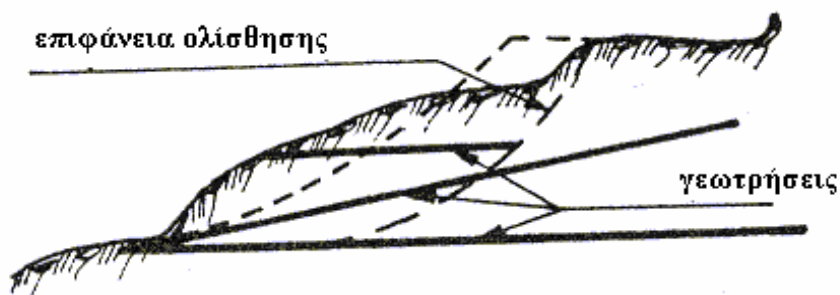
2.6.1 Εδαφικά πρανή

α) Αν η κατολίσθηση οφείλεται στην ενέργεια του νερού πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για να απομακρυνθεί το νερό που βρίσκεται μέσα στη ζώνη ή για να εμποδιστεί η εισροή νέων ποσοτήτων νερού.

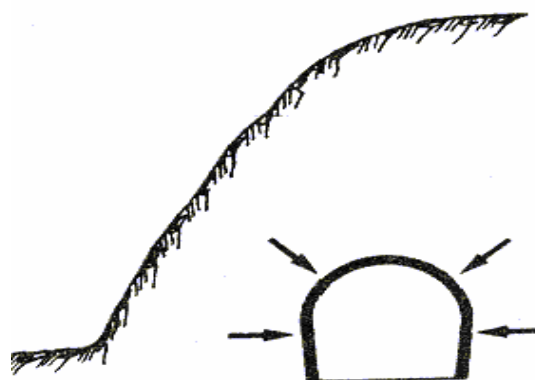
- 1) Ο απλούστερος τρόπος αποξήρανσης του εδάφους είναι η όρυξη χαντακιών κατά την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, που να απέχουν μεταξύ τους περίπου 6 μέτρα, και να έχουν βάθος ίσο περίπου με το βάθος του υποτιθέμενου κύκλου κατολίσθησης. Τα χαντάκια αυτά που γεμίζονται με χονδρά λιθορίμματα, επιτρέπουν την απομάκρυνση του υπόγειου νερού. Επιπλέον αυξάνουν την αντοχή του εδάφους στην διάτμηση (Σχήμα 2.13). Υπάρχει όμως κίνδυνος, ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα, να γεμίσουν τα κενά από αργιλώδες έδαφος, οπότε στη περίπτωση αυτή η αποτελεσματικότητα των χαντακιών περιορίζεται. Πιο αποτελεσματική λύση είναι η εκτέλεση γεωτρήσεων, περίπου οριζόντιων, από τη βάση Α του πρανούς, με διάμετρο 70 ως 100 cm, οι οποίες λειτουργούν σαν φίλτρα (Σχήμα 2.14). Τέλος είναι δυνατό να εκτελεστεί από το πρανές απομηραντική σήραγγα. Η λύση αυτή, η οποία εφαρμόστηκε με επιτυχία στη Λυών της Γαλλίας είναι εντελώς ικανοποιητική, αλλά πολύ πιο δαπανηρή από τις προηγούμενες. Πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε πολύ μεγάλη ανάγκη (Σχήμα 2.15) (Βαλαλάς, 1984).



Σχήμα 2.13 Χαντάκια με χονδρά λιθορίμματα κατά την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (Βαλαλάς, 1984).



Σχήμα 2.14 Οριζόντιες γεωτρήσεις προς τη βάση του πρανούς (Βαλαλάς, 1984).



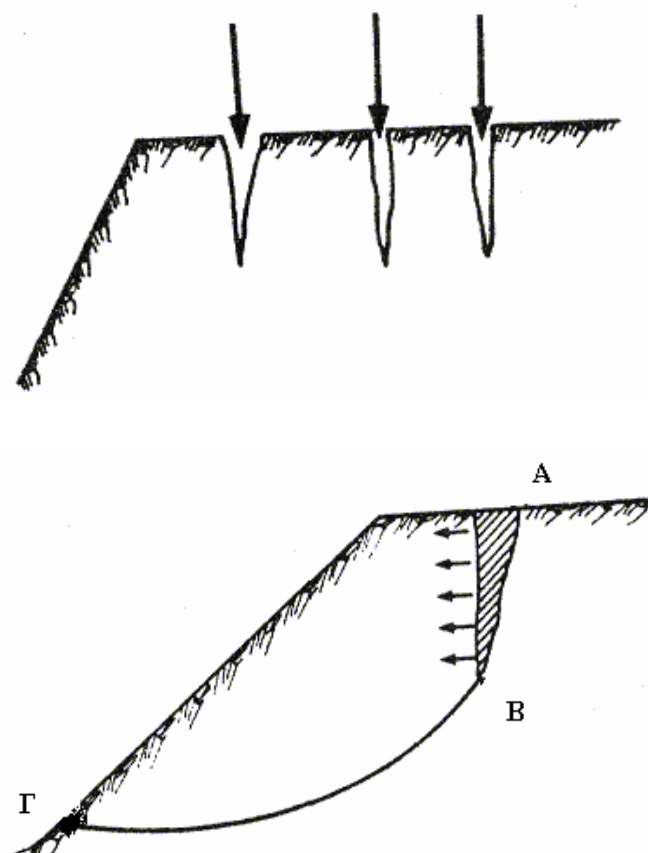
Σχήμα 2.15 Απομηραντική σήραγγα κάτω από το πρανές (Βαλαλάς, 1984).

- 2) Όταν η κατολίσθηση οφείλεται στην είσοδο μέσα στο έδαφος των νερών της βροχής από τις επιφανειακές ρωγμές, το καλύτερο μέτρο είναι το σφράγισμα των κενών αυτών (Σχήμα 2.16). Γίνεται συνήθως χρήση τσιμεντοενέσεων. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στο Μαρόκο. Ο Terzaghi δεν θεωρεί ότι η μέθοδος είναι αποτελεσματική αλλά από την εποχή που εξέφρασε αυτή τη γνώμη (1948) μέχρι σήμερα, η τεχνική των ενέσεων έκανε μεγάλες προόδους. Πάντως πρέπει να δίνεται η προσοχή που χρειάζεται στο προσδιορισμό της πίεσης των ενέσεων για να αποφεύγεται ο πρόσθετος κίνδυνος κατολίσθησης που θα οφειλόταν στις πιέσεις αυτές.

β) Αν η κατολίσθηση οφείλεται στον ερπυσμό του εδάφους, κυρίως στην περίπτωση της αργίλου ή στη μείωση της αντοχής του και όχι στην ενέργεια του νερού, η

αποξήρανση έχει μικρή μόνο αποτελεσματικότητα. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω μέθοδοι, οι οποίες όμως είναι δαπανηρές.

- 1) *Ηλεκτροχημική στερεοποίηση*, με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο προκαλεί μετατόπιση των ιόντων της αργίλου (Cambefort, 1961 και 1963).
- 2) *Ψήσιμο του εδάφους*. Αν το έδαφος δεν είναι κορεσμένο και αποτελείται από ιλύ χωρίς πολύ άργιλο, μπορεί να μεταβληθεί σε στερεό, με τρόπο ανάλογο προς τη μέθοδο παραγωγής πλίνθων, αν θερμανθεί σε 800° περίπου. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται κατά πολύ η αντοχή του εδάφους και αποφεύγεται η κατολίσθηση.
- 3) *Πάγωμα του εδάφους*. Αντίστροφα είναι δυνατό να στερεοποιηθεί το έδαφος με τη μεταβολή σε πάγο του νερού των πόρων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στη κατασκευή του φράγματος της Columbia στις ΗΠΑ το 1937 (Βαλαλάς, 1984).



Σχήμα 2.16 Επιφανειακές ρωγμές, επιτρέπουν την είσοδο του νερού στο έδαφος (Βαλαλάς, 1984).

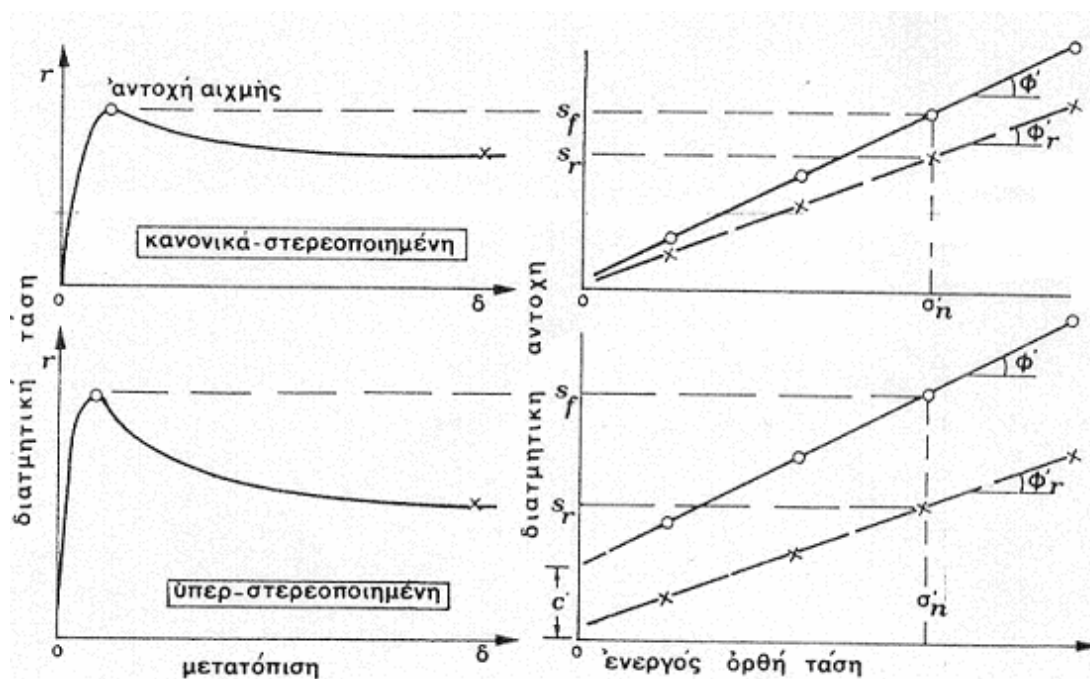
2.6.2 Μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους

Στα εδάφη η αντοχή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την συνοχή.

Η συνοχή μπορεί να μειωθεί για μια από τις εξής αιτίες (Βαλαλάς, 1984):

- Από την ευαισθησία της: Μια εξωτερική δυναμική επιπόνηση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη πτώση της αντοχής. Είναι κλασική η περίπτωση μιας κατολίσθησης που προκλήθηκε από τους κραδασμούς που οφείλονταν στην διάβαση ενός τρένου.
- Εξαιτίας της αύξησης της περιεκτικότητας σε νερό, που μειώνει, όπως είναι γνωστό, την αντοχή.
- Εξαιτίας του ερπυσμού. Όταν το έδαφος παρουσιάζει παραμόρφωση πέρα από μια ορισμένη τιμή, χάνει ένα μεγάλο μέρος από την αντοχή του. Στο Σχήμα 2.17 δίνεται μια χαρακτηριστική περίπτωση μείωσης της αντοχής, για μια υπερστερεοποιημένη άργιλο. Για μια κανονικά στερεοποιημένη άργιλο το φαινόμενο είναι λιγότερο αισθητό.
- Εξαιτίας της συνεχούς ρηγμάτωσης των επιφανειακών στρωμάτων με την επίδραση συνήθως των κλιματικών μεταβολών, αλλά και για άλλους λόγους. Οι ρηγματώσεις αυτές μειώνουν το μήκος της καμπύλης θραύσης και κατά συνέπεια και την τιμή των δυνάμεων συνοχής που εμποδίζουν τις κατολισθήσεις. Έτσι στο Σχήμα 2.16 η συνοχή ενεργεί στο μήκος ΒΓ και όχι στο ολικό μήκος ΑΓ της επικίνδυνης γραμμής θραύσης. Στην Ελλάδα παρατηρούνται συχνά τέτοιου είδους ρηγματώσεις, που πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη, γιατί ενδέχεται να αποτελούν προειδοποιητικά στοιχεία. Η κατάσταση επιδεινώνεται όταν μετά από μια ισχυρή βροχόπτωση προστεθούν κατά μήκος της επιφάνειας ΑΒ οι υδροστατικές πιέσεις που αυξάνουν τις ροπές κατολίσθησης.

Έχει διαπιστωθεί ότι για πολλά πρανή ο συντελεστής ασφάλειας είναι πολύ λίγο μεγαλύτερος από τη μονάδα (ίσως π.χ. με 1,01). Έτσι μια ελάχιστη μεταβολή της αντοχής μπορεί να γίνει αιτία καταστροφής.



Σχήμα 2.17 Μείωση αντοχής για στερεοποιημένη και υπερ-στερεοποιημένη άργιλο (Βαλαλάς, 1984)

2.6.3 Αγκύρωση σε στερεό έδαφος και τοίχοι αντιστήριξης

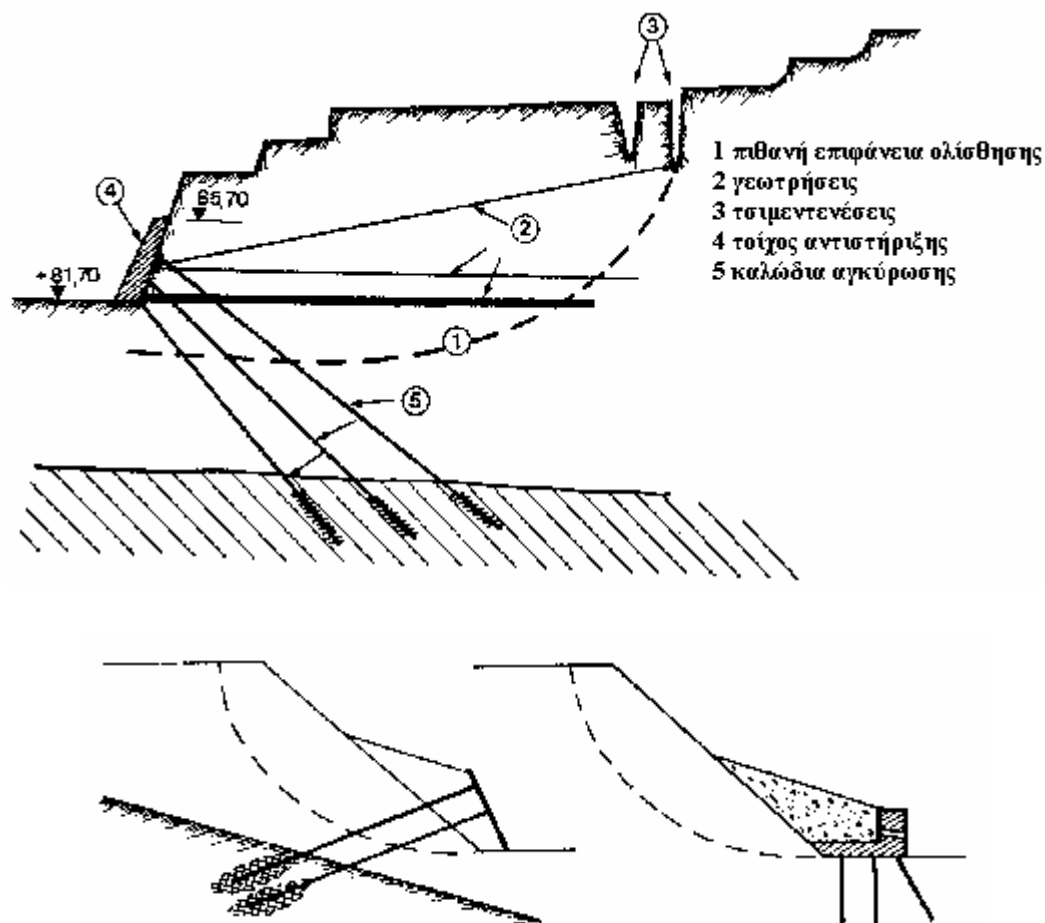
Συνηθίζεται η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης στη βάση των πρανών, με ή χωρίς αγκυρώσεις μέσα στο στερεό έδαφος.

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

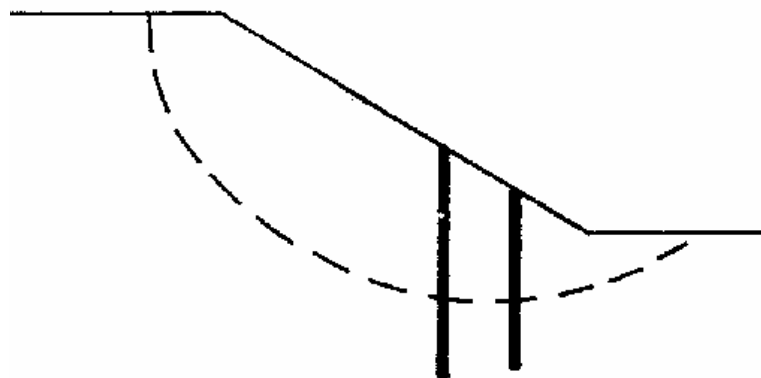
Αν οι αγκυρώσεις εκτελεστούν κατάλληλα και ιδιαίτερα αν γίνουν με την τεχνική της προέντασης, τα αποτελέσματα θα είναι ικανοποιητικά. Αλλά πρέπει να εξετάζεται το πρόβλημα της διατήρησης των δυνάμεων αγκύρωσης σε όλη τη διάρκεια του έργου. Αγκυρώσεις χωρίς τοίχο που να επιτρέπει τη καλή κατανομή των αντιδράσεων στο έδαφος, έχουν μικρή αποτελεσματικότητα. Αντί για τοίχο είναι δυνατό να εκτελούνται σχάρες από δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος κατά μήκος του πρανούς (Σχήμα 2.18) (Βαλαλάς, 1984).

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάσχεση πραγματοποιείται με την τοποθέτηση μεγάλου αριθμού πασσάλων στη ζώνη της βάσης του πρανού (Σχήμα 2.19). 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.



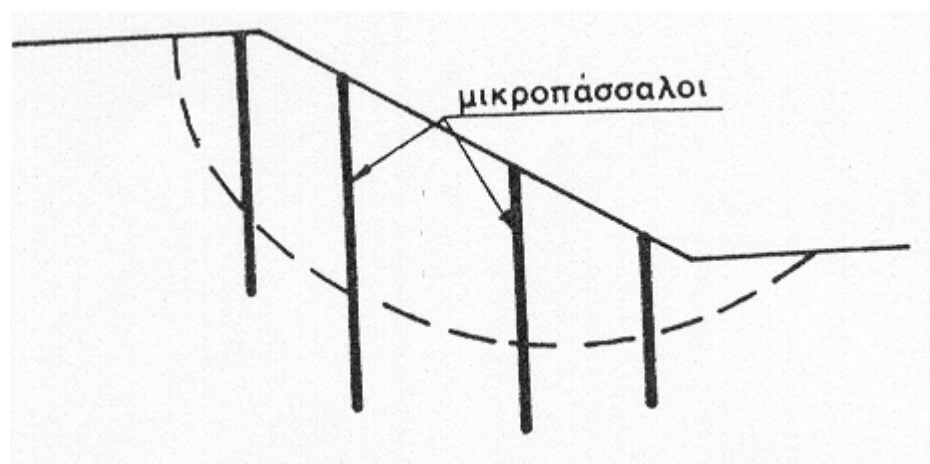
Σχήμα 2.18 Τοίχος αντιστήριξης και αγκύρωση πρανούς (Βαλαλάς, 1984).



Σχήμα 2.19 Τοποθέτηση πασσάλων στη βάση του πρανούς (Βαλαλάς, 1984).

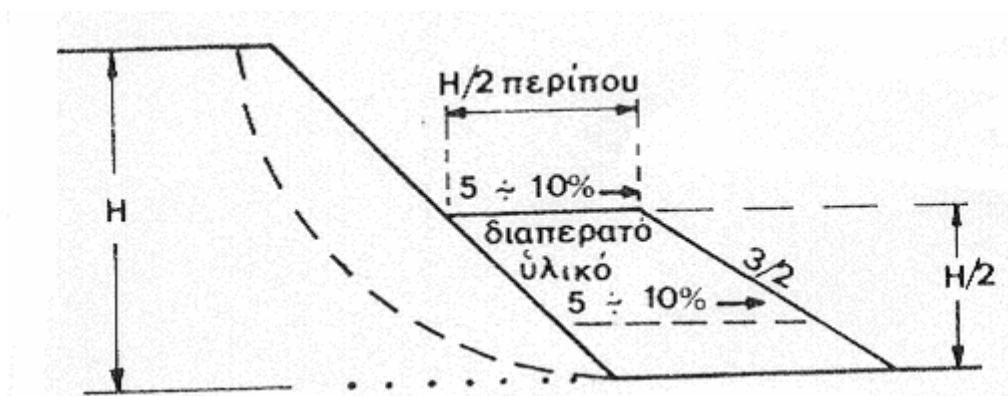
Οι πάσσαλοι είναι από ξύλο, από χάλυβα ή από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μικρό-πάσσαλοι από σκυρόδεμα διαστάσεων λίγων εκατοστών που τοποθετούνται σε όλη την επιφάνεια του πρανούς σε απόσταση 2m περίπου μεταξύ τους (Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20 Μικροπάσσαλοι σκυροδέματος σ' όλη την επιφάνεια του πρανούς (Βαλαλάς, 1984).

Μια απλή λύση είναι η κατασκευή βοηθητικού αναχώματος στη βάση του πρανούς (Σχήμα 2.21).

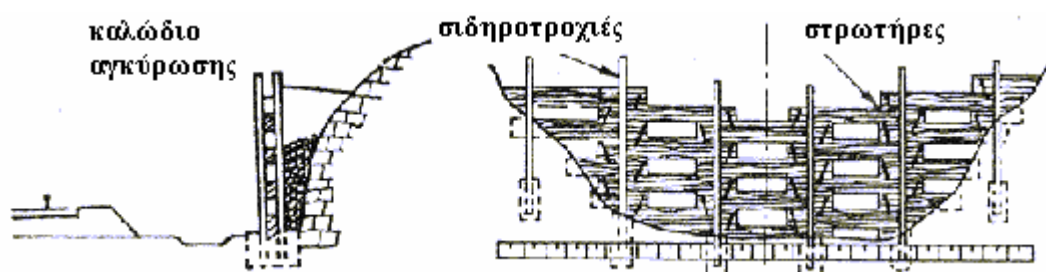


Σχήμα 2.21 Κατασκευή βοηθητικού αναχώματος στη βάση του πρανούς (Βαλαλάς, 1984).

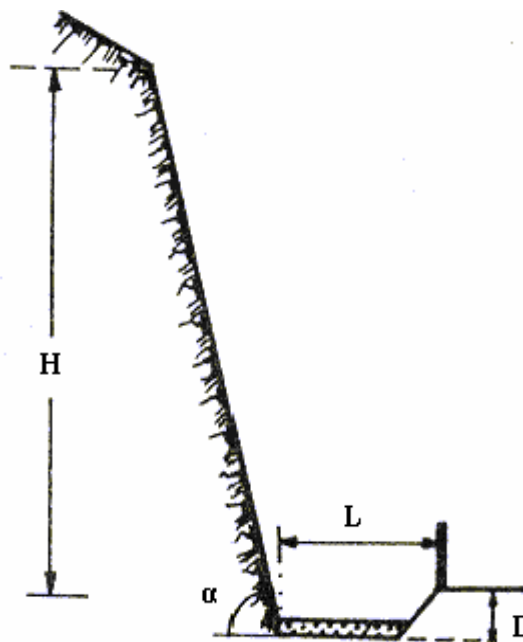
2.6.4 Βραχώδη πρανή

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

- Κατασκευάζεται στη βάση του πρανού και σε μια σχετικά απόσταση ένα διάφραγμα από σκυρόδεμα ή και άλλα υλικά με τρόπο που τα προϊόντα των ολισθήσεων να πέφτουν πίσω από το διάφραγμα (Σχήμα 2.22). Σ' ορισμένες περιπτώσεις αρκεί να προβλεφθεί μια ζώνη ασφάλειας μεταξύ της οδού και της βάσης του πρανού (Σχήμα 2.23). Το πλάτος της είναι συνάρτηση της γωνίας α του πρανού και του ύψους H . Για $\alpha=75^\circ$ το $L=3m$, για $H=10m$, και $L=8m$, για $H=3m$. Για $\alpha=55^\circ$ το L έχει τιμές από 3 μέχρι 5m. Το βάθος της ζώνης προστασίας είναι της τάξης του 1-2m. Είναι καλό να προστίθεται και ένας προστατευτικός φράκτης.



Σχήμα 2.22 Κατασκευή διαφράγματος στη βάση του πρανού (Βαλαλάς, 1984).

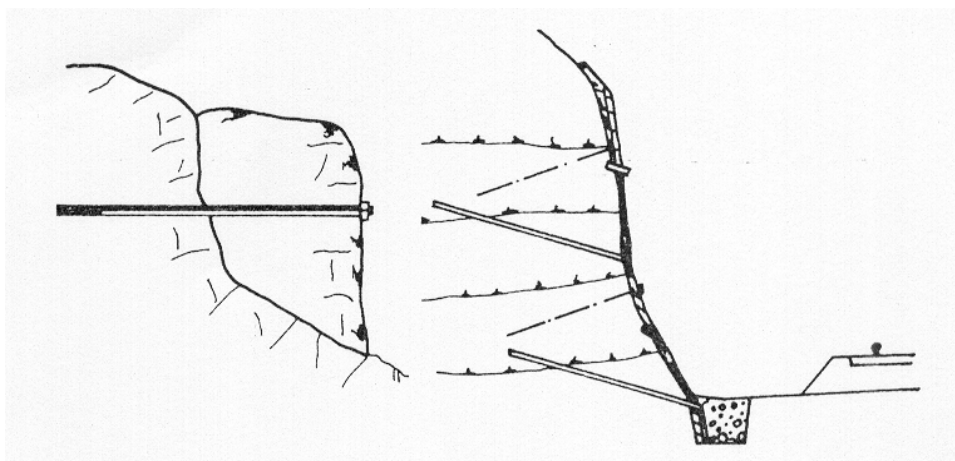


Σχήμα 2.23 Ζώνη ασφάλειας μεταξύ της οδού και της βάσης του πρανού (Βαλαλάς, 1984).

- Τοποθετείται ένα μεταλλικό πλέγμα που οδηγεί τους βράχους μικρών διαστάσεων προς τον πόδα. Το πλέγμα αγκυρώνεται στην κορυφή και είναι ανοιχτό στη βάση
- Τέλος μια απλή λύση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη χώρα μας είναι και η τοποθέτηση απλής πινακίδας με τη φράση : «Προσοχή πτώση βράχων!»

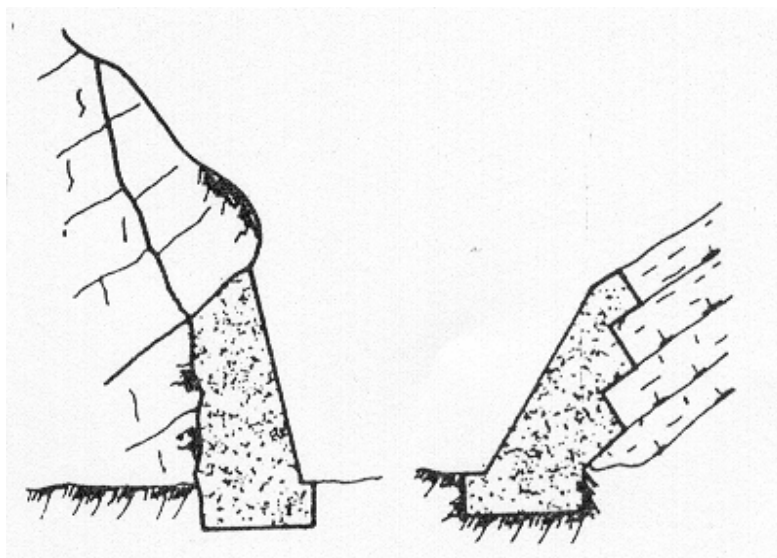
β) Για πιο σημαντικές κατολισθήσεις χρησιμοποιούνται τα εξής μέτρα (Βαλαλάς, 1984):

- Γίνονται αγκυρώσεις μέσα στο βράχο (Σχήμα 2.24). Οι αγκυρώσεις μπορεί να είναι απλές ή προεντεταμένες, οριζόντιες ή με κλίση προς τα κάτω. Συνοδεύονται συχνά με την κατασκευή πέδιλου αγκύρωσης.
- Ενίσχυση του βράχου με βοηθητικά έργα αντιστήριξης, με προστασία της επιφάνειας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με ένα μεταλλικό πλέγμα ή και με τη κατασκευή προστατευτικής στοάς (Σχήμα 2.25).



Σχήμα 2.24 Αγκυρώσεις μέσα στο βράχο (Βαλαλάς, 1984).

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



Σχήμα 2.25 Ενίσχυση του βράχου με βοηθητικά έργα αντιστήριξης (Βαλαλάς, 1984).

Πολλά από τα παραπάνω στοιχεία προέρχονται από τον κώδικα VIC της Διεθνούς Ενώσεως των Σιδηροδρόμων.

2.7 Διαγνωστική των κατολισθήσεων

Η διαδεδομένη χρήση των γεωτεχνικών μετρητικών οργάνων αποτελεί πολύτιμο βοήθημα για την παρακολούθηση γεωτεχνικών έργων πριν ή μετά τη μελέτη και κατασκευή τους. Από τα γεωτεχνικά όργανα που έχουν συνήθως εφαρμογή, τα αποκλισίδμετρα ελέγχονται συνεχώς οι εδαφικές μετακινήσεις, ενώ συνδυάζονται με τοπογραφικές παρατηρήσεις, γεωλογικές και υδρολογικές πληροφορίες. Αποτελούν την ακριβέστερη και πλέον αξιόπιστη μεθοδολογία για τον έλεγχο ευστάθειας πρανών, κατολισθήσεων, εκσκαφών μεγάλου βάθους της συμπεριφοράς αντιστηρίξεων, φραγμάτων, διανοίξεων υπογείων έργων.

Στα γεωτεχνικά έργα, επειδή οι αβεβαιότητες που υπάρχουν είναι σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές, με την εγκατάσταση κατάλληλων οργάνων δίνεται η δυνατότητα συλλογής απαραίτητων πληροφοριών για τη μελέτη, παρακολούθηση και διαπίστωση της εφικτότητας των εφαρμοζόμενων γεωτεχνικών λύσεων. Για το καθορισμό του βέλτιστου προγράμματος εγκατάστασης γεωτεχνικών οργάνων αρχικά θεσπίζονται τα ακόλουθα κριτήρια (Ρίτσος κ.α., 2000):

- α. Καθορισμός του σκοπού και της αποτελεσματικότητας των γεωτεχνικών οργάνων.
- β. Καθορισμός του κρίσιμου γεωλογικά και γεωτεχνικά μηχανισμού ισορροπίας.
- γ. Καθορισμός των παραμέτρων που θα ελέγχονται και θα μετρώνται με τα όργανα.
- δ. Πρόβλεψη των αναμενόμενων μεγεθών μεταβολής των μετρούμενων παραμέτρων, και ανάλογος καθορισμός της απαιτούμενης ακρίβειας των μετρήσεων.
- ε. Επιλογή κατάλληλων γεωτεχνικών οργάνων και προσδιορισμός θέσεων παρακολούθησης.
- στ. Καθορισμός των τεχνικών προδιαγραφών χρήσης και εγκατάστασης των οργάνων.
- ζ. Χρονοδιάγραμμα μετρήσεων, μακροχρόνιας και βραχυχρόνιας παρακολούθησης.
- η. Καθορισμός κόστους εγκατάστασης γεωτεχνικών οργάνων και παρακολούθησης.

Δευτερεύοντες παράγοντες αλλά εξίσου σημαντικοί είναι η εγκατάσταση οργάνων χωρίς προβλήματα λειτουργίας, η λήψη μέτρων προστασίας τους ώστε να είναι δυνατή η μακροχρόνια λειτουργία τους, και βασικά η παρακολούθηση τους από εξειδικευμένο προσωπικό.

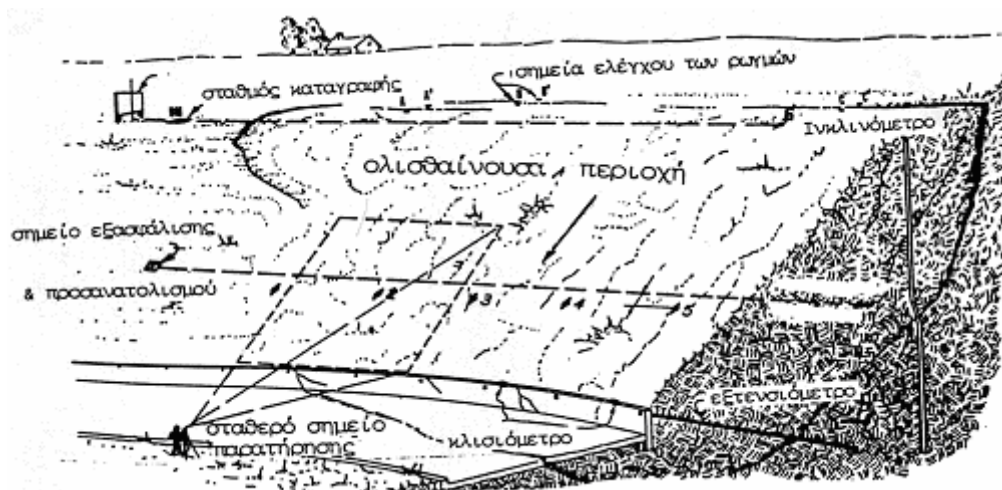
Με την εφαρμογή των γεωτεχνικών οργάνων, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους, καθορίζονται έγκαιρα οι παράγοντες που επιδρούν στους μηχανισμούς εδαφικής αστάθειας, μεταβολής των αναπτυσσόμενων ωθήσεων και εντάσεων σε τεχνικά έργα, καθώς και η αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων έργων ανάσχεσης.

Από τα συνήθως εφαρμοζόμενα γεωτεχνικά όργανα, τα αποκλισιόμετρα δίνουν την δυνατότητα να ελέγχονται συνεχώς οι εδαφικές δράσεις και παραμορφώσεις σε όλο το μήκος εγκατάστασής τους.

Παρακάτω δίνονται μερικά στοιχεία για τις μετρήσεις και τα όργανα που χρησιμοποιούνται, ενώ αναλύονται περισσότερο τα γεωτεχνικά όργανα, αποκλισιόμετρα τα οποία έχουν και μεγαλύτερη εφαρμογή.

2.7.1 Τοπογραφικές επιφανειακές μετρήσεις

Σκοπός τους είναι η παρακολούθηση της εξέλιξης με το χρόνο και ο καθορισμός της έκτασης της κατολισθαίνουσας περιοχής. Απαιτούν την εγκατάσταση κατάλληλου δικτύου στόχων, την εξάρτηση του από κατά δυνατόν σταθερούς εξωτερικούς στόχους και τη χρήση θεοδόλιχου ή σύγχρονων ηλεκτροοπτικών οργάνων, (Σχήμα 2.26).



Σχήμα 2.26 Τοπογραφικές επιφανειακές μετρήσεις σε πρανές (Τσότσος, 1991).

2.7.2 Ερευνητικές γεωτρήσεις

Οι ερευνητικές γεωτρήσεις δίνουν την δυνατότητα της διαπιστώσεως της δομής του υπεδάφους. Οι απαιτήσεις για την ποιότητα της δειγματοληψίας είναι εδώ ειδικότερα υψηλές, γιατί η επίτευξη συνεχούς εικόνας της δομής του υπεδάφους και των μηχανικών του χαρακτηριστικών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες σε ότι αφορά τον μηχανισμό και το επίπεδο ολίσθησης, καθώς και στην επίδραση των υπόγειων υδάτων.

2.7.3 Πιεζόμετρα

Σκοπός τους είναι γενικά η μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων σε διάφορα βάθη και σε διάφορες χρονικές περιόδους. Χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι ανάλογα με το κατά πόσο είναι διαθέσιμοι και ανάλογοι με την επιδιωκόμενη ακρίβεια και πληρότητα στις μετρήσεις. Στην περίπτωση που οι σωλήνες των πιεζόμετρων διαπερνούν το επίπεδο ολίσθησεως, παρατηρείται μία σταδιακή

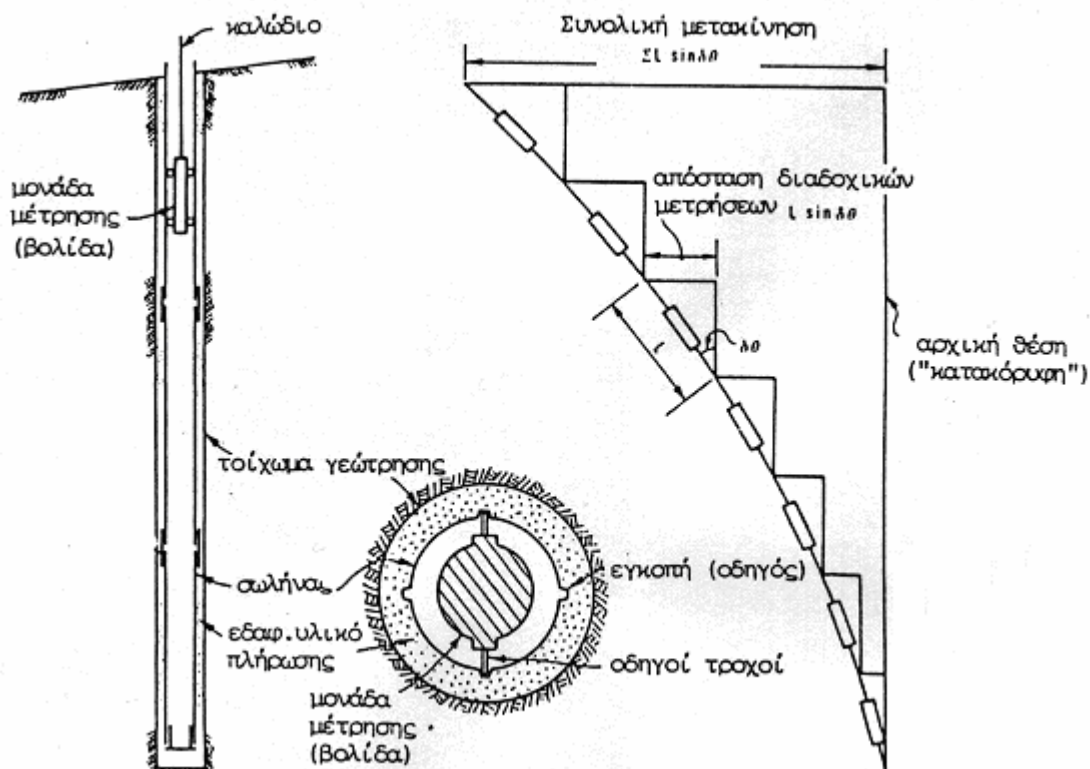
παραμόρφωση τους, που εκδηλώνεται με εντονότερη κάμψη τους στο επίπεδο ολισθήσεως (Βασιλόπουλος, 1982).

2.7.4 Αποκλισιόμετρα

Το αποκλισιόμετρο ή κατά άλλους κλισιόμετρο είναι ένα ηλεκτρονικό εκκρεμές, το οποίο έχει την δυνατότητα να μετρά σε διάφορα βάθη, εντός της στήλης αναφοράς, την απόκλιση από την κατακόρυφο, ελέγχοντας την σε σχέση με την αρχική της θέση (πρώτη μέτρηση) (Ρίτσος κ.α., 2000).

Οι προοδευτικές αποκλίσεις από την κατακόρυφο ανάγονται σε εδαφικές μετακινήσεις στο περιβάλλον έδαφος. Για την τοποθέτηση του οργάνου διανοίγεται με γεωτρύπανο οπή διαμέτρου 10 έως 15 cm και μέχρι βάθους 5 έως 10 m μεγαλύτερου από το γεωλογικά αναμενόμενο βάθος εκδήλωσης των εδαφικών παραμορφώσεων. Εντός της οπής εισάγεται ένεμα και κατόπιν η στήλη των σωλήνων αναφοράς. Οι σωληνώσεις έχουν εσωτερικά αύλακες σε γωνία 90°, μέσα στους οποίους ολισθαίνει το όργανο μετρήσεως. Αυτό κατεβαίνει σε βαθμίδες των 50 cm έως 100 cm μέχρι την τελική στάθμη. Το όργανο συνδέεται με καλώδιο το οποίο καταλήγει στην επιφάνεια σε φορητό κιβώτιο ελέγχου που αναγράφονται ή καταγράφονται οι μετρήσεις σε κάθε στάθμη. Οι ενδείξεις του ποτενσιομέτρου στο φορητό κιβώτιο είναι ανάλογες της κλίσης του οργάνου στο επίπεδο του ηλεκτρονικού εκκρεμούς. Οι μετρήσεις παίρνονται κάθε φορά στα ίδια βάθη και με τον ίδιο προσανατολισμού του οργάνου για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Η κύρια διεύθυνση αναφοράς (A+) ορίζεται να είναι προς την διεύθυνση κίνησης, μαρκάρεται και με πυξίδα μετράται το αζιμούθιό της. Οι μετρήσεις παίρνονται ανά ζεύγη σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (A+, B+) και (A-, B-) (Ρίτσος κ.α., 2000).

Στο Σχήμα 2.27 δίνεται το εφαρμοζόμενο σύστημα αναφοράς, η γενική διάταξη, η τομή, τα αναλυτικά αποτελέσματα και το τελικό διάγραμμα.



Σχήμα 2.27 Αποκλισιόμετρο (Τσότσος, 1991).

Τα διαγράμματα που βασικά συντάσσονται για την αξιολόγηση των μετρήσεων είναι (Ρίτσος κ.α., 2000):

α. Τοπικά διαγράμματα (Incremental displacement). Παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων σε κάθε στάθμη μέτρησης, στις διευθύνσεις Α και Β.

β. Αθροιστικά διαγράμματα (Cumulative displacement) στις διευθύνσεις Α και Β. Οι μεταβολές της κλίσης για κάθε στάθμη μέτρησης αθροίζονται αλγεβρικά για να προκύψει η παραμόρφωση της στήλης του αντιστοιχεί στην παραμόρφωση και διανυσματική μετακίνηση του εδάφους σε σύγκριση με την αρχική του θέση.

γ. Διαγράμματα ολικής μετακίνησης. Παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων στη συνισταμένη διεύθυνση των αξόνων Α και Β.

δ. Χρονικά διαγράμματα. Παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των μετακινήσεων.

ε. Συγκριτικά διαγράμματα. Γίνεται συσχετισμός των εδαφικών μετακινήσεων με μετρήσεις άλλων οργάνων, όπως πιεζόμετρα, σειсмоγράφοι, βροχόμετρα, κ.α. Η

συχνότητα των μετρήσεων εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα εξελίξεως του φαινομένου. Επηρεάζεται από την σπουδαιότητα του έργου, το μέγεθος του κινδύνου, το στάδιο μελέτης, κατασκευής, λειτουργίας του έργου. Αρχικά κατά των χρόνων εγκατάστασης των οργάνων η ταχύτητα είναι άγνωστη και πολύ αδρές εκτιμήσεις μπορεί να γίνουν στηριζόμενες σε ανάλογες εμπειρίες. Στον Πίνακα 2.3 δίνεται μία ταξινόμηση της ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κατά τους Cruden and Varnes (1992).

Πίνακας 2.3: Ταξινόμηση ταχύτητας εδαφικών μετακινήσεων (Cruden & Varnes, 1992).

Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/sec)
Υπερβολικά αργή	$< 0,50 \cdot 10^{-6}$
Πολύ αργή	$0,50 \cdot 10^{-6}$
Αργή	$50 \cdot 10^{-6}$
Ενδιάμεση	$5 \cdot 10^{-3}$
Γρήγορη	0,50
Πολύ γρήγορη	50
Υπερβολικά γρήγορη	$5 \cdot 10^3$

Οι ταχύτητες μεταβάλλονται σε εξαιρετικά μεγάλο εύρος, αρχίζοντας από τον ερπυσμό και φτάνοντας μέχρι την αστοχία. Είναι αυτονόητο ότι οι μετρήσεις με αποκλισιόμετρο πραγματοποιούνται μόνο σε χαμηλές ταχύτητες.

Η υπερβολικά αργή κίνηση συμπεριλαμβάνει και τον ερπυσμό, ο οποίος συχνά έχει περιοδικό χαρακτήρα που συνδυάζεται με τις βροχοπτώσεις. Ο επιφανειακός ερπυσμός παρουσιάζει συνήθως μηδενική ταχύτητα κατά την ξηρά περίοδο και επανέρχεται μετά από τις φθινοπωρινές βροχές όταν κορεστεί το επιφανειακό έδαφος. Εάν η επιφάνεια θραύσεως βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, τότε η μετακίνηση

εξαρτάται από τον εμπλουτισμό του υπογείου ορίζοντα και το φαινόμενο είναι αρκετά πολύπλοκο (Ρίτσος κ.α., 2000).

Η συχνότητα των μετρήσεων πρέπει να καταγράφει και τις περιόδους ακινησίας για να μην υποβιβάζει την ταχύτητα μετακίνησης. Γι' αυτό χρειάζονται δύο τουλάχιστον μετρήσεις τον χρόνο (άνοιξη–φθινόπωρο).

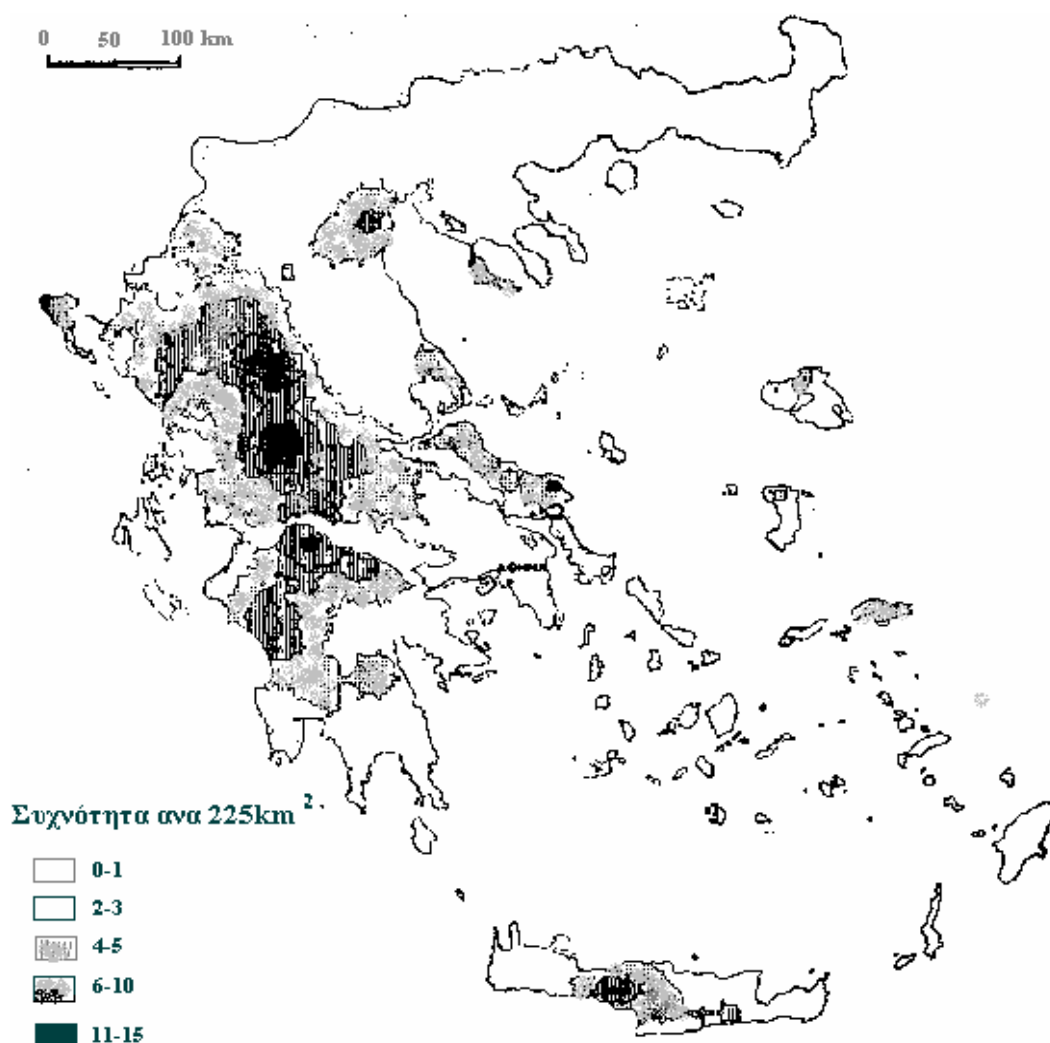
Στις περιπτώσεις πολύ μικρών ταχυτήτων οι μετρήσεις παίρνονται σε αραιά χρονικά διαστήματα που εξαρτώνται και από την ακρίβεια των ενδείξεων του αποκλισιομέτρου.

Όταν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη παίρνονται συχνότερες μετρήσεις, ιδίως κατά το πρώτο έτος μετά την εγκατάσταση των οργάνων, για να εντοπιστούν το μέγεθος της ταχύτητας, τυχόν περίοδοι ακινησίας κλπ (Ρίτσος κ.α., 2000).

Συγχρόνως οι μετρήσεις θα συντελέσουν σε πληρέστερη ανάλυση του μηχανισμού ευστάθειας και από αυτόν θα καθοριστεί το μελλοντικό πρόγραμμα μετρήσεων (Ρίτσος κ.α., 2000).

2.8 Κατολισθήσεις στον Ελλαδικό χώρο

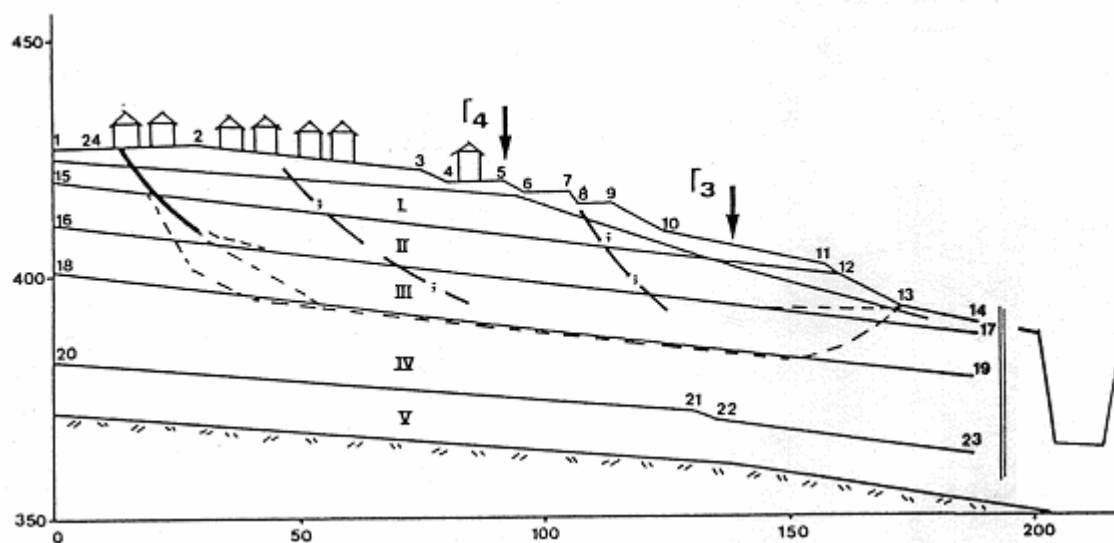
Ο Ελλαδικός χώρος, εξαιτίας της πολυσύνθετης γεωλογικής κατασκευής και της έντονης τεκτονικής καταπόνησης του, δοκιμάζεται συχνά από κατολισθητικά φαινόμενα. Το θέμα έχει μελετηθεί και έχει βρεθεί ότι 500 περίπου οικισμοί είναι υπό μετακίνηση ή έχουν μετακινηθεί άρα οι κατολισθήσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως το σοβαρότερο γεωλογικό, καταστροφικό φαινόμενο. Μετά από επεξεργασία αρχείου 1500 τεχνικογεωλογικών εκθέσεων, αναφερόμενων σε 800 περιπτώσεις κατολισθήσεων μελετητές έχουν προχωρήσει στη σύνθεση μέσων συσχετίσεων μεταξύ παραγόντων, οι οποίοι υπεισέρχονται στο πρόβλημα, όπως η κλίση, η μορφολογία, το υψόμετρο, η ποσότητα των βροχοπτώσεων, το είδος του γεωυλικού, ο τύπος της ολίσθησης κ.α. Στο Σχήμα 2.28 φαίνεται χάρτης, στον οποίο ο Ελλαδικός χώρος μετά από επεξεργασία έχει διαιρεθεί σε ζώνες διαφορετικής συχνότητας κατολισθήσεων (Κούκης & Ζιούρκας, 1989).



Σχήμα 2.28 Χάρτης ζωνών συχνότητας κατολισθήσεων του Ελλαδικού χώρου (Κούκης & Ζιούρκας, 1989).

Τα τελευταία χρόνια, αφού προηγήθηκαν εργασίες στο πεδίο και γεωλογική μελέτη από ομάδες του ΥΠΕΧΩΔΕ και του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ, ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής μελέτησε από τη σκοπιά του Πολιτικού Μηχανικού τα κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή έξι οικισμών στην Πιερία, και προχώρησε στην πρόταση και το σχεδιασμό μέτρων σταθεροποίησης. Η μελέτη συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τις επιτόπου παρατηρήσεις, επιβεβαίωσε ότι πρηνή αποτελούμενα από σκληρές υπερστερεοποιημένες αργίλους, οι οποίες περιέχουν διαπερατές υδροφόρες ενστρώσεις, που είναι συνηθισμένος σχηματισμός του Ελλαδικού χώρου, ειδικά όταν στον πόδα τους το ανάγλυφο είναι δυσμενές (Σχήμα 2.29), είναι ασταθή και ευαίσθητα σε τυχόν αυξήσεις της τιμής της

πίεσης του νερού.



Σχήμα 2.29 Τυπική μορφή κατολισθήσεων στη Πιερία
(Μηχανισμός προοδευτικής θραύσης)
(Αναγνωστόπουλος, 1988).

Οι κατολισθήσεις αυτές παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού της προοδευτικής θραύσης και επαναδραστηριοποιούνται κατά καιρούς. Στις περιπτώσεις αυτές εξαιτίας και της μεγάλης έκτασης της ολισθαίνουσας περιοχής, κύριο σταθεροποιητικό μέτρο ήταν ο σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης έργων αποστράγγισης και μόνο τοπικά ήταν δυνατή και προσφερόταν η κατασκευή συστοιχίας σταθεροποιητικών πασσάλων (Αναγνωστόπουλος, 1988).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

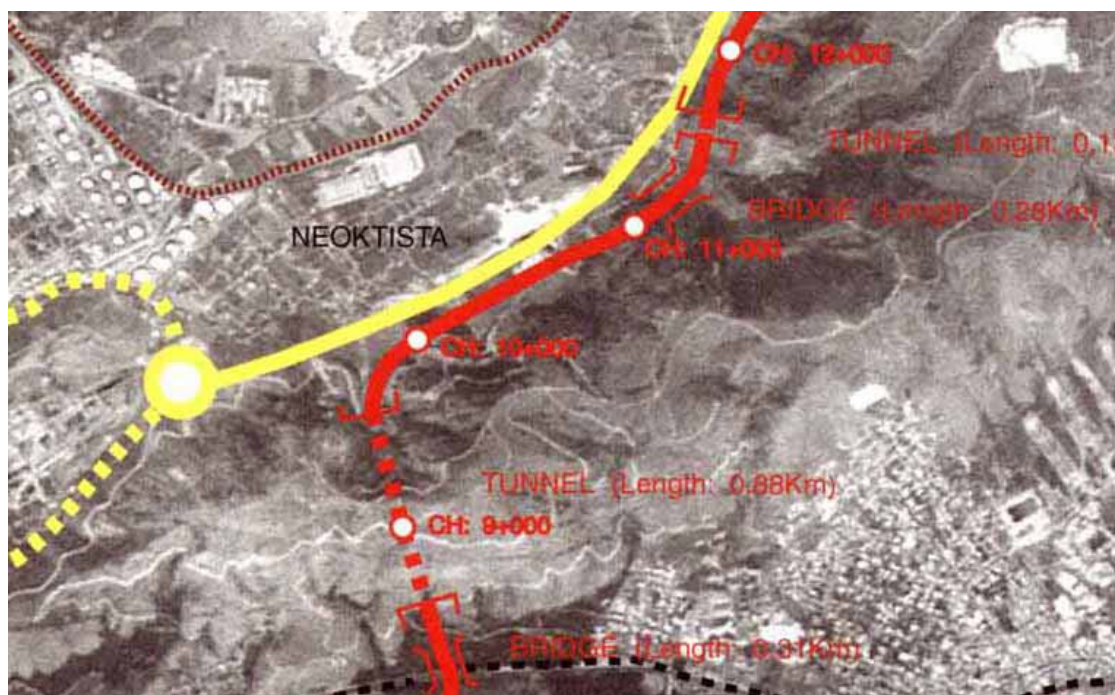
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΑΙΓΑΛΕΩ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.

Η Οριστική Μελέτη¹ χάραξης της σιδηροδρομικής γραμμής σύνδεσης του λιμένα Ν.Ικονίου με το υπόλοιπο σιδηροδρομικό δίκτυο προβλέπει την διέλευση της γραμμής περί την Χ.Θ. 10+400 έως Χ.Θ. 10+690 από ασταθή περιοχή όπου έχουν εκδηλωθεί στο παρελθόν έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Στην αεροφωτογραφία της περιοχής (Εικόνα 3.1), απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα η μελλοντική χάραξη της γραμμής.

Η χάραξη διέρχεται μεταξύ της δυτικής Περιφερειακής Λεωφ. Αιγάλεω (Δ.Π.Λ.ΑΙ.), που βρίσκεται στα χαμηλότερα σημεία της πλαγιάς, και ενός εργοστασίου, που βρίσκεται λίγο ψηλότερα. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται το εργοστάσιο, η περιοχή κατολίσθησης καθώς και η Δ.Π.Λ.ΑΙ, ενώ στην Εικόνα 3.3 φαίνεται το εργοστάσιο και η ευρύτερη περιοχή μέσω αεροφωτογραφίας. Ακριβώς πάνω από το εργοστάσιο υπάρχει δασικός δρόμος, ο οποίος προβλέπεται να διατηρηθεί ως παράπλευρη οδός εξυπηρέτησης.

Η κατολίσθηση που ενεργοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1990, κατέστρεψε την Δ.Π.Λ.ΑΙ. και έφθασε μέχρι την περιοχή του εργοστασίου. Λεπτομερής περιγραφή της εξέλιξης των κατολισθητικών φαινομένων δίνεται στο υποκεφάλαιο 3.1.

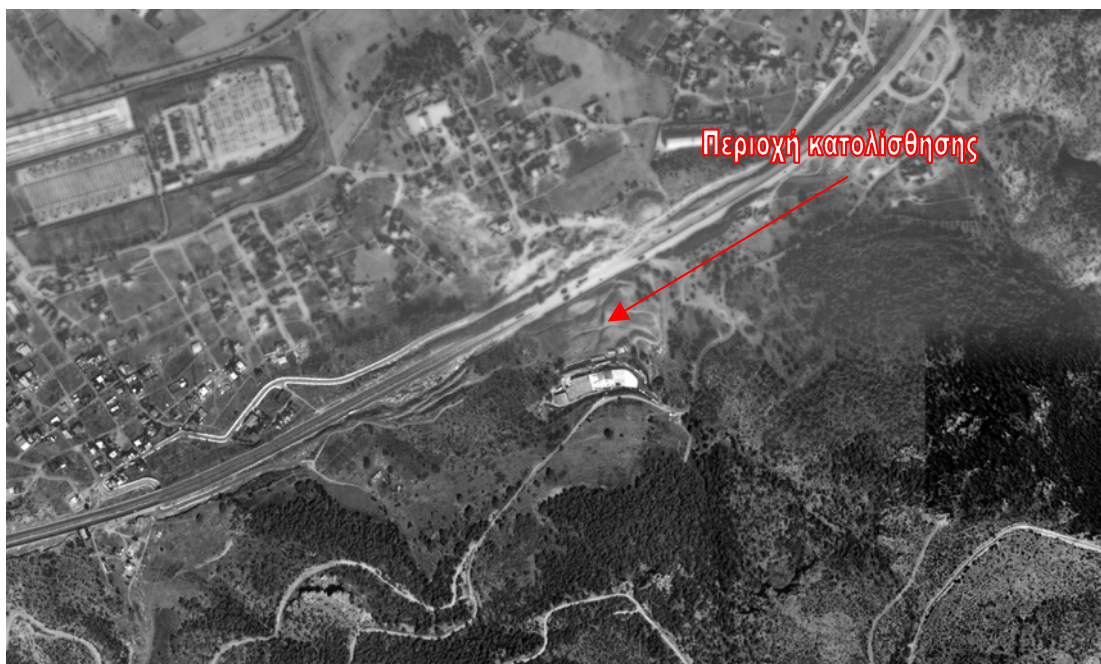
¹ Σημειώνεται ότι το κεφάλαιο αυτό βασίζεται σε μελέτες που έχουν γίνει για την εταιρεία ΕΡΓΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε (ΕΡΓΟΣΕ) από τον Όμιλο Τεχνικών Μελετών (ΤΕΠΕ) καθώς επίσης και στην εργασία με τίτλο «Εναλλακτικές Λύσεις Σταθεροποίησης Κατολίσθησης» των Παραθύρας, Α και Η. Μιχάλης (2001).



Εικόνα 3.1 Αεροφωτογραφία της περιοχής κατολίσθησης (ΕΡΓΟΣΕ, 2003).



Εικόνα 3.2 Περιοχή κατολίσθησης (ΕΡΓΟΣΕ, 2003).



Εικόνα 3.3 Αεροφωτογραφία της ευρύτερης περιοχής (ΕΡΓΟΣΕ, 2003).

Στο υποκεφάλαιο 3.2 παρατίθενται τα γεωλογικά και τεκτονικά στοιχεία της περιοχής, όπως προέκυψαν από τις προηγούμενες έρευνες και μελέτες. Βασικά ολίσθησαν τα επιφανειακά κορήματα κυμαινόμενου πάχους που επικάθονται σε στρώματα σχιστολίθου. Σε βαθύτερα στρώματα συναντάται ασβεστόλιθος, πέτρωμα νεώτερης γεωλογικής ηλικίας από τον σχιστόλιθο ο οποίος είναι επωθημένος πάνω σε αυτόν. Αυτό σημαίνει έντονο τεκτονισμό της περιοχής και πολυπλοκότητα των γεωλογικών δομών, που επηρέασαν τον τελικό σχεδιασμό του έργου.

Στο υποκεφάλαιο 3.3 συνοψίζονται τα ευρήματα των διάφορων γεωτεχνικών ερευνών, που έχουν γίνει στην περιοχή της κατολίσθησης. Η γεωτεχνική έρευνα του Ομίλου Τεχνικών Μελετών, το Δεκέμβριο του 2001, περιγράφει τα δυνατά μέτρα αντιμετώπισης της κατολίσθησης της περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προηγούμενες έρευνες. Τέλος στο υποκεφάλαιο 3.4 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προηγούμενες γεωτεχνικές έρευνες.

3.1 Ιστορικό κατολίσθησης και συναφών έργων

Η κατολίσθηση ενεργοποιήθηκε για πρώτη φορά τον Μάιο 1990 κατά τη διάρκεια των εκσκαφών για τη διαμόρφωση του ορύγματος της Λεωφ. Αιγάλεω. Πριν από την

κατασκευή της λεωφόρου είχε προηγηθεί επιφανειακή γεωλογική αποτύπωση της περιοχής, η οποία είχε δείξει ότι ο δρόμος θα περάσει από κορήματα ελαφρά έως μέτρια συγκολλημένα πάνω σε Τριαδικό - Ιουρασικό ασβεστόλιθο. Η αρχική κλίση του φυσικού πρανούς ήταν περίπου 22°.

Όταν η εκσκαφή του ορύγματος είχε σχεδόν ολοκληρωθεί, ενεργοποιήθηκε το αρχικό τμήμα της κατολίσθησης που είχε πλάτος περίπου 50m, με κορυφή στο υψ.+142m και κατώτερη επιφάνεια ολίσθησης, που περνούσε κάτω από το οδόστρωμα και αναδυόταν περίπου στον άξονα της οδού σε υψ.+115m έως +117m. Τα κατολισθημένα υλικά ήταν κυρίως κορήματα. Κάτω από αυτά εμφανίστηκε ένας υποπράσινος σχιστόλιθος τόσο στην κορυφή της κατολίσθησης όσο και στην περιοχή του δρόμου.

Η αρχική κατολίσθηση διευρύνθηκε σταδιακά και έφθασε στην κορυφή της μέχρι το υψ.+164m. Σύμφωνα με μαρτυρίες, ρωγμές εμφανίσθηκαν και στο δάπεδο του εργοστασίου (υψ.+170m) που βρίσκεται λίγο ψηλότερα αμέσως πάνω από τον κύριο όγκο της κατολίσθησης. Η εξέλιξη της κατολίσθησης ήταν σταδιακή από τον Μάιο 1990 ως τον Οκτώβριο 1991 και συνέβαινε κυρίως κατά την ξηρά περίοδο.

Το ΥΠΕΧΩΔΕ ανέθεσε μέσω του αναδόχου κατασκευής του δρόμου την εκπόνηση γεωτεχνικής έρευνας - μελέτης, η οποία πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο 1991 από την εταιρεία Γεωμηχανική. Τα συμπεράσματα αυτής της έρευνας, όπως και των επόμενων που πραγματοποιήθηκαν, αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 3.4.

Η μελέτη της Γεωμηχανικής προέβλεπε τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης με τρεις σειρές πασσάλων ώστε ν' αντιστηριχτεί η περιοχή του εργοστασίου. Επίσης, την αφαίρεση των κατολισθημένων χωμάτων όγκων από την Λεωφ. Αιγάλεω και την κατασκευή τοίχου αντιστήριξης ποδός πρανούς.

Το ΚΕΔΕ συμπλήρωσε τη γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή της κατολίσθησης με μετρήσεις τεσσάρων κλισιομέτρων, που είχαν τοποθετηθεί, και πρόσθετες εργαστηριακές δοκιμές. Στην έκθεση που έκανε τον Ιούνιο 1992 πρότεινε δύο λύσεις:

α) Την απαλλοτρίωση του εργοστασίου και την σταθεροποίηση της γύρω περιοχής με χωματουργικά και στραγγιστικά έργα, και

β) Την σταθεροποίηση της κάτω του εργοστασίου περιοχής με πασσάλους.

Τελικώς επιλέχθηκε η λύση της κατασκευής τριών σειρών φρεατοπασσάλων και τοίχου ποδός πρανούς, η οποία άρχισε να υλοποιείται τον Οκτώβριο 1992. Οι πάσσαλοι ήταν διαμέτρου Φ100, σε αποστάσεις 1,00m και σε βάθος που έφθασε μέχρι 1,0÷1,5m μέσα στον ασβεστόλιθο. Οι δύο ανώτερες σειρές κοντά στο εργοστάσιο (υψ.+162m έως +165m) επρόκειτο να συνδεθούν με κεφαλόδεσμο και εγκάρσιες δοκούς, ώστε να λειτουργήσουν ως χωρικό πλαίσιο. Η τρίτη σειρά πασσάλων στο υψ.+143m έως +146m δεν προβλεπόταν να έχει κεφαλόδεσμο, αλλά τελικώς ο εργολάβος κατασκεύασε μια δοκό χωρίς σημαντικό οπλισμό. Κατάντη της τρίτης αυτής σειράς φρεατοπασσάλων έγινε απάλυνση της κλίσης με αφαίρεση χωμάτων όγκων και κατασκευή ενδιάμεσου αναβαθμού.

Στα κατώτερα τμήματα της κατολίσθησης είχε αποφασισθεί η κατασκευή τοίχου ποδός πρανούς παράλληλα με τη Λεωφ. Αιγάλεω. Ο τοίχος αυτός άρχισε να κατασκευάζεται τον Αύγουστο 1993. Στις αρχές Σεπτεμβρίου 1993, κατά τη διάρκεια εκσκαφών για τη θεμελίωση του τοίχου, η κατολίσθηση επανενεργοποιήθηκε αρχικά στο κατώτερο τμήμα της, παρασύροντας το τμήμα του τοίχου που είχε ήδη κατασκευασθεί, και στη συνέχεια επεκτάθηκε στο ανώτερο τμήμα της καθώς και σε πλευρικές διευρύνσεις. Ο κεφαλόδεσμος της τρίτης σειράς πασσάλων καταστράφηκε, ενώ αντιθέτως δεν προέκυψαν ενδείξεις μετακίνησης των κεφαλόδεσμων των ανωτέρων δύο σειρών. Επίσης δεν προέκυψαν ενδείξεις μετακίνησης των κεφαλών των φρεατοπασσάλων, τόσο των δύο ανώτερων σειρών, όσο και της τρίτης σειράς, παρόλο που είχε καταστραφεί ο κεφαλόδεσμος της.

Μετά από αυτά τα νέα κατολισθητικά φαινόμενα ανατέθηκε νέα μελέτη σταθεροποιητικών μέτρων στην εταιρεία Μηχανική-Γεωστατική. Διατρήθηκαν δύο ακόμη γεωτρήσεις στην περιοχή του δρόμου. Τα συμπεράσματα της μελέτης υποβλήθηκαν σε δύο Εκθέσεις τον Νοέμβριο 1993 και τον Ιανουάριο 1994. Προτάθηκε η κατασκευή νέας σειράς φρεατοπασσάλων Φ100 στο πόδι του πρανούς σε αποστάσεις 1,25m στο πλάτος της κατολίσθησης και 1,50 έως 2,00m πέραν των ορίων αυτής και βάθος 12 έως 17m, που θα φέρουν κεφαλόδεσμο συνδεόμενο άκαμπτα με τον τοίχο ποδός πρανούς. Στην 3η σειρά φρεατοπασσάλων προβλέπεται η κατασκευή νέου οπλισμένου κεφαλοδεσμού σε αντικατάσταση του υπάρχοντος, που είχε ρηγματωθεί λόγω της κατολίσθησης.

Η συνολική ευστάθεια του πρανούς προβλεπόταν να βελτιωθεί με αφαίρεση 2,5m κορημάτων κατάντη της 3ης σειράς φρεατοπασσάλων. Τέλος η μελέτη προβλέπει την κατασκευή αγκυρώσεων 15t ανά 3,0m στη θέση της 3ης σειράς πασσάλων για την επίτευξη επαρκούς συντελεστή ασφαλείας, καθώς και την πρόβλεψη οπών για ενδεχόμενες μελλοντικές αγκυρώσεις ανά 2,5m στην κατώτερη σειρά πασσάλων.

Σύμφωνα με πληροφορίες της Υπηρεσίας Δ.Κ.Ε.Ο. του ΥΠΕΧΩΔΕ τα παραπάνω μέτρα υλοποιήθηκαν, εκτός των εργασιών που αφορούσαν την 3η σειρά φρεατοπασσάλων. Άντ' αυτών έγινε επέκταση προς τα άνω του πασσαλότοιχου της 2ης σειράς με τοίχωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο αγκυρώθηκε με 30 προεντεταμένα αγκύρια φέρουσας ικανότητας (χάλυβας) 63t ανά αποστάσεις ~2,5m, για περαιτέρω εξασφάλιση του εργοστασίου.

Κατά τα έτη 2000–2001 ολοκληρώθηκαν οι εργασίες αποκατάστασης της Δ.Π.Λ.ΑΙ στην περιοχή της κατολίσθησης, με αφαίρεση όσων κατολισθημένων γαιωδών μαζών ευρίσκοντο ακόμη στην οδό και αποκατάσταση του οδοστρώματος.

Μέσα στον τοίχο αντιστήριξης που κατασκευάστηκε αμέσως ανάντη της οδού και ο οποίος εδράζεται στην πασσαλοστοιχία σύμφωνα με τη μελέτη, έχουν τοποθετηθεί κατ' αποστάσεις κατακόρυφοι σωλήνες PVC, οι οποίοι διήκουν σε όλο το βάθος των υποκείμενων πασσάλων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τοποθέτηση αποκλισιομετρικών σωλήνων για την μελλοντική παρακολούθηση της συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια λειτουργίας των έργων.

Συμπληρωματικές γεωερευνητικές εργασίες, έγιναν την περίοδο 1997-1998. Από τις μετρήσεις των δύο κλισιομέτρων, που τοποθετήθηκαν, προέκυψαν ενδείξεις μετακινήσεων στ' ανώτερα στρώματα του σχιστολίθου. Πάντως επανενεργοποίηση της κατολίσθησης δεν έχει παρατηρηθεί μετά το 1993, ούτε και μετά τον σεισμό της Αθήνας τον Σεπτέμβριο 1999.

3.2 Γεωλογικά – Τεκτονικά στοιχεία περιοχής

Η γεωλογία της περιοχής της κατολίσθησης, όπως είναι φυσικό αποτέλεσε την κύρια παράμετρο σχεδιασμού του έργου. Το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής είναι

περίπλοκο, δεδομένου ότι οι παλαιότεροι σχηματισμοί των σχιστολίθων έχουν αναδυθεί και εφιππεύσει τους νεώτερους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς.

Η ευρύτερη περιοχή του όρους Αιγάλεω, στις βασικές παρυφές του οποίου εκδηλώθηκε η κατολίσθηση αποτελείται από δύο κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς: τους παλαιοζωικούς σχιστολίθους - ψαμμίτες και τους νεώτερους ασβεστόλιθους του Τριαδικού - Ιουρασικού. Οι σχιστόλιθοι γενικώς αποτελούν τα βαθύτερα στρώματα του όρους και υπόκεινται των ασβεστόλιθων.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο τεκτονισμό με πολλαπλές πτυχώσεις που δημιουργούν εναλλασσόμενα σύγκλινα και αντίκλινα, τα οποία γενικώς έχουν κατεύθυνση Α-Δ. Οι εγκάρσιες μετακινήσεις έχουν εκδηλωθεί με τη μορφή ρηγμάτων, αλλά και εφιππεύσεων των παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών πάνω στους νεώτερους. Έτσι, η γεωλογική δομή της περιοχής παρουσιάζεται εξαιρετικά πολύπλοκη. Οι έντονα διαρρηγμένοι ασβεστόλιθοι (συνήθως δολομιτικοί) του Τριαδικού - Ιουρασικού, που αποτελούν τον κύριο γεωλογικό σχηματισμό του όρους Αιγάλεω, εμφανίζονται τοπικά να υπόκεινται των παλαιοζωικών σχιστολίθων ακριβώς λόγω αυτών των εφιππεύσεων.

Οι παλαιοζωικοί σχιστόλιθοι και ψαμμίτες έχουν συχνά φακοειδείς ενστρώσεις τεφρών - μελανότεφρων ασβεστόλιθων, που ενίοτε δεν διακρίνονται από τους νεώτερους ασβεστόλιθους του Τριαδικού - Ιουρασικού. Έτσι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αν δείγματα ασβεστόλιθου από γεωτρήσεις ανήκουν στους ασβεστόλιθους του Τριαδικού - Ιουρασικού (τον κύριο γεωλογικό σχηματισμό του Αιγάλεω) ή σε κάποια φακοειδή ένστρωση εντός των παλαιοζωικών σχιστολίθων, οπότε κάτω απ' αυτούς αναμένεται να ξανασυναντηθούν οι σχιστόλιθοι.

Οι τεκτονικές κινήσεις και ιδιαιτέρως οι εφιππεύσεις των σχιστολίθων έχουν κατακερματίσει τους σχηματισμούς και έχουν δημιουργήσει μυλωνιτοποιημένες ζώνες, με αποτελέσματα να εμφανίζονται τοπικά οι σχηματισμοί αυτοί πλήρως εξαλλοιωμένοι.

Τοπικά και σε σημαντική έκταση ανάντη και κατάντη της κατολίσθησης, οι παλαιότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί καλύπτονται επιφανειακά από πρόσφατα πλευρικά κορήματα. Η επιφανειακή γεωλογική αποτύπωση της περιοχής σε κλ. 1:500, που έγινε το 1999, οριοθέτησε την έκταση των κορημάτων προς τα δυτικά,

βόρεια και ανατολικά, αλλά όχι πλήρως προς τα νότια δηλ. προς τα ψηλότερα υψόμετρα του λόφου.

Από την συναξιολόγηση όλων των παραπάνω στοιχείων προέκυψαν οι εκτιμήσεις των γεωλογικών στρωμάτων. Οι εκτιμήσεις αυτές θα πρέπει να θεωρούνται προσεγγιστικές και όχι λεπτομερώς ακριβείς δεδομένης της πολυπλοκότητας του γεωλογικού μοντέλου, όπως προαναφέρθηκε, αλλά και των αποστάσεων μεταξύ των γεωτρήσεων, που είναι μεγάλες σε σύγκριση με την πυκνότητα των διατομών.

Πάντως τα βασικά χαρακτηριστικά του γεωλογικού μοντέλου θεωρούνται σαφή: Επιφανειακά η περιοχή καλύπτεται από κορήματα ασβεστολιθικής κυρίως προέλευσης και πάχους κυμαινόμενου από 0,70m έως περίπου 13,0m. Τα κορήματα επικάθονται σχεδόν παντού πάνω στον επωθημένο σχιστόλιθο, το πάχος του οποίου είναι πολύ μικρό στα δυτικά - νοτιοδυτικά της κατολίσθησης και αυξάνεται προοδευτικά προς τα βόρεια - βορειοανατολικά. Ο υποκείμενος γεωλογικός σχηματισμός είναι οι ασβεστόλιθοι, αλλά λόγω της εφίπνευσης του σχιστολίθου, εμφανίζονται τοπικά εναλλαγές σχιστόλιθου - ασβεστόλιθου. Σημειώνεται και πάλι ότι όλες οι παλαιότερες κατολισθήσεις έχουν λάβει χώρα στ' ανώτερα στρώματα του σχιστολίθου αμέσως κάτω από τα κορήματα.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή του όρους Αιγάλεω οριοθετείται προς βορρά από ένα μεγάλο γεωλογικό ρήγμα, στο οποίο έχει σχηματιστεί η κοιλάδα του Ασπρόπυργου. Η κοιλάδα έχει καλυφθεί από νεογενείς αποθέσεις, που αποτελούν και τον νεώτερο, γεωλογικά, σχηματισμό της περιοχής.

3.3 Αποτελέσματα Γεωτεχνικών Ερευνών

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα ευρήματα των διαφόρων γεωτεχνικών ερευνών, που έχουν γίνει στην περιοχή της κατολίσθησης σε προηγούμενες φάσεις. Οι έρευνες αναφέρονται με τη χρονολογική σειρά εκτέλεσής τους. Τα δεδομένα κάθε παλιάς έρευνας χρησιμοποιούνται στις μεταγενέστερες.

3.3.1 Γεωτεχνική Έρευνα εταιρείας Γεωμηχανική, Δεκ. 1991

Η γεωτεχνική έρευνα της εταιρείας Γεωμηχανική περιελάμβανε τα εξής:

- Γεωλογική αποτύπωση της περιοχής της κατολίσθησης σε κλ.1:500
- 10 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1-Γ10) βάθους 8,10 έως 25,50m, με δοκιμές SPT, όπου το έδαφος το επέτρεπε, και εργαστηριακές δοκιμές
- 14 ερευνητικές διασκοπήσεις ENPASOL {E1-E11 και E1', E2', E2''}
- Εγκατάσταση 4 κλισιομέτρων

Από τη συνολική αξιολόγηση των παραπάνω ερευνών προέκυψε η εξής εικόνα της περιοχής της κατολίσθησης:

Πλευρικά κορήματα

Αποτελούν το επιφανειακό στρώμα πάχους κυμαινόμενου από 0,0m (Γ-7) έως 13,0m (Γ-2 και Γ-3). Συνίστανται από αργιλοϊλίδες μικρής έως μέσης πλαστικότητας και άμμους με κυμαινόμενο ποσοστό χαλίκων και κροκαλών ασβεστολιθικής σύστασης. Τα κορήματα είναι κατά τόπους μέτρια έως καλά συγκολλημένα. Οι τιμές SPT, κυμαίνονται από $N = 10$ έως $N > 50$ (άρνηση).

Εξαλλοιωμένοι αργιλικοί σχιστόλιθοι

Οι σχιστόλιθοι είναι πράσινου έως τεφροπράσινου και κατά θέσεις μαύρου χρώματος τελείως εξαλλοιωμένοι σε άργιλο μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, αν και κατά θέσεις ήταν μέτρια αποσαθρωμένοι έως υγιείς.

Η φυσική υγρασία κυμάνθηκε από 6% έως 26%. Οι τιμές SPT κυμάνθηκαν από $N = 27$ έως άρνηση. Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έδωσαν τιμές αντοχής $\sigma_c = 122$ έως 816kPA, ενώ από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης προέκυψαν παράμετροι αντοχής $\phi = 6^\circ$ -17° και $c=92$ -160kPA. Οι σχιστόλιθοι υπόκεινται των κορημάτων, το δε πάχος τους κυμαίνεται από 2,0m (Γ-7) έως 9,0m (Γ-5).

Μυλωνιτιομένο αργιλικό υλικό

Συναντήθηκε σε ορισμένες γεωτρήσεις αμέσως κάτω από τον εξαλλοιωμένο αργιλικό σχιστόλιθο, σε πάχος 0,5–1,0m περίπου. Ήταν κυρίως αργιλικής σύστασης με μεγάλη πλαστικότητα.

Τεκτονικά λατυποπαγή

Ο σχηματισμός αυτός συναντήθηκε σε ορισμένες γεωτρήσεις αμέσως πάνω από τον υποκείμενο ασβεστόλιθο και εμφανίζεται συμπαγής. Το πάχος του κυμαίνεται από 1,0m (Γ-8) έως 8,0m (Γ-10).

Ασβεστόλιθοι

Το υπόβαθρο όλων των παραπάνω σχηματισμών ήταν οι ασβεστόλιθοι. Σημειώνεται ότι οι γεωτρήσεις διατρήθηκαν σε βάθος 2,0m έως 6,0m μέσα στον ασβεστόλιθο. Ο ασβεστόλιθος είναι γενικά παχυστρωματώδης, τεκτονικά καταπονημένος και κατά θέσεις καρστικοποιημένος, με πλήθος διακλάσεων σε αποστάσεις 0,2–0,5m, πληρωμένες με αργιλικό ή εξαλλοιωμένο σχιστολιθικό υλικό και ασβεστίτη.

Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και των διασκοπήσεων ENPASOL σχεδιάστηκαν οι υψομετρικές καμπύλες του ασβεστολιθικού υποβάθρου και της διεπιφάνειας κορημάτων - σχιστολίθων.

Επισημαίνεται ότι σ' αυτή τη φάση των ερευνών δεν ήταν σαφές ποια ακριβώς ήταν η επιφάνεια πάνω στην οποία έγινε η κατολίσθηση. Γι' αυτό και η μελέτη των μέτρων σταθεροποίησης βασίσθηκε στην παραδοχή ότι η κατολίσθηση ήταν βαθιά και είχε λάβει χώρα στη διεπιφάνεια ασβεστόλιθου - υπερκειμένων στρώσεων.

Η ανάλυση έγινε για δύο περιπτώσεις μηχανικών παραμέτρων της επιφάνειας ολίσθησης:

- $c=80\text{kPa}$ και $\varphi=0^\circ$
- παραμένουσα διατμητική αντοχή $\varphi_{\text{res}}=16^\circ$ και $c_{\text{res}}=0$

3.3.2 Γεωτεχνική Έρευνα ΚΕΔΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ, Ιούνιος 1992

Η έρευνα του ΚΕΔΕ είχε σαν στόχο τον έλεγχο των παραπάνω παραμέτρων μηχανικής αντοχής της επιφάνειας ολίσθησης, που είχαν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη των μέτρων σταθεροποίησης και φυσικά, τον προσδιορισμό της επιφάνειας ολίσθησης.

Για το σκοπό αυτό λήφθηκαν περιοδικές μετρήσεις στους 4 κλισιομετρικούς σωλήνες, αλλά για διάστημα μόνο δύο μηνών (26-2-92 έως 29-4-92), οι οποίες

έδειξαν μετακινήσεις 3-45mm και σε βάθος που αντιστοιχούσε στη διεπιφάνεια κορημάτων -σχιστολίθων.

Το ΚΕΔΕ έκανε επίσης εργαστηριακές δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης στη συσκευή Bromhead πάνω σε δείγματα εξαλλοιωμένου αργιλικού σχιστολίθου, από τις οποίες προέκυψαν τιμές:

$$\phi'_{\text{res}} = 11^0 - 21^0 \text{ (αναλόγως βαθμού εξαλλοίωσης)}$$

$$\text{με μέση τιμή: } \phi'_{\text{res}} = 15,6^0$$

έγινε επίσης ανάστροφη ανάλυση της ευστάθειας του κατολισθημένου πρανούς από την οποία προέκυψε:

$$\phi'_{\text{res}} = 16,7^0 \text{ για συντελεστή ασφάλειας } F = 1,0$$

Το ΚΕΔΕ πρότεινε, μετά από συνεκτίμηση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων, οι αναλύσεις ευστάθειας να θεωρούν ως κρίσιμο επίπεδο ολίσθησης την άνω επιφάνεια του σχιστολίθου με παραμέτρους διατμητικής αντοχής:

$$\phi'_{\text{res}} = 16^0 \text{ και } c'_{\text{res}} = 0.$$

3.3.3 Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα Εταιρείας Μηχανική-Γεωτεχνική

Μετά τις νέες κατολισθήσεις του Σεπτεμβρίου 1993 έγινε συμπληρωματική γεωτεχνική έρευνα με δύο νέες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, τις ΝΓ1 και ΝΓ2 στο πόδι του πρανούς, στην περιοχή του δρόμου. Η θέση τους φαίνεται στο Σχέδιο αριθμ. ΙΚ-ΑΞ-ΚΑΤ-1 με τίτλο «Περιοχή Κατολίσθησης Λεωφ. Αιγάλεω-Οριζοντιογραφία», το οποίο δίνεται στο Παράρτημα.

Η στρωματογραφία του υπεδάφους αποτελείται από τα κορήματα, τον εξαλλοιωμένο σχιστόλιθο, πάχους 1-4,5m, και στη συνέχεια άμμο και χάλικες ή εξαλλοιωμένο λατυποπαγές μέχρι βάθους 31m.

Από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων του σωλήνα της γεώτρησης ΝΓ2 διαπιστώθηκαν μετακινήσεις σε βάθος 9m περίπου, δηλαδή στην διεπιφάνεια σχιστολίθου και υπερκειμένων κορημάτων.

3.3.4 Γεωτεχνική Έρευνα Ομίλου Τεχνικών Μελετών ΤΕΠΕ, Νοέμβριος 1998

Η έρευνα του Ο.Τ.Μ είχε ως κύριο στόχο τον σαφή προσδιορισμό του μηχανισμού της κατολίσθησης, όχι μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή που είχε κατολισθήσει, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή, κυρίως ανάντη και εκατέρωθεν της κατολίσθησης, όπου απαντώνται οι ίδιοι γεωλογικοί σχηματισμοί.

Η έρευνα επικεντρώθηκε σε δύο άξονες, προσεκτική δειγματοληψία στις γεωτρήσεις και τοποθέτηση οργάνων για εντοπισμό τυχόν υπόγειου ορίζοντα και μετακινήσεων σε κάποιο επίπεδο ολίσθησης.

Ευρήματα Γεωτρήσεων

Εκτελέστηκαν συνολικά ένδεκα (11) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Τα βάθη τους και το είδος του οργάνου που τοποθετήθηκε δίνονται στον Πίνακα 3.1, η δε θέση τους φαίνεται στο Σχέδιο αριθμ. ΙΚ-ΑΞ-ΚΑΤ-1 με τίτλο «Περιοχή Κατολίσθησης Λεωφ. Αιγάλεω – Οριζοντιογραφία», το οποίο δίνεται στο Παράρτημα.

Πίνακας 3.1: Στοιχεία γεωτρήσεων περιοχής κατολίσθησης.

Γεώτρηση	Βάθος (m)	Όργανο
B1	48,5	κλισιόμετρο
B2	42,1	κλισιόμετρο
B3	35,0	κλισιόμετρο
B4	10,1	πιεζόμετρο
B5	26,5	κλισιόμετρο
B6	23,0	πιεζόμετρο
B8	40,0	πιεζόμετρο
B9	25.0	πιεζόμετρο
B10	40,0	κλισιόμετρο
B11	50,0	κλισιόμετρο
B12	40,0	-

Από τη μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων των γεωτρήσεων προκύπτουν τα παρακάτω σχετικά με τη λιθολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών.

Γεώτρηση B1: Επιφανειακά και μέχρι του βάθους των 3m συναντάται καστανέρυθρη άργιλος με χαλίκια. Από τα 3m και μέχρι το βάθος των 19,50m απαντούν πολύ καλά συγκολλημένα πλευρικά κορήματα ασβεστολιθικής σύστασης. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της γεώτρησης (48,50m) συναντάται ο σχιστόλιθος του παλαιοζωϊκού, χρώματος τεφροπράσινου ή τεφρομέλανος, πολύ αποσαθρωμένος με ενστρώσεις καστανότεφρου ψαμμίτη.

Γεώτρηση B2: Επιφανειακά και μέχρι του βάθους των 11,90m συναντώνται πλευρικά κορήματα (ασβεστολιθικής σύστασης με αργιλικό - ασβεστιτικό συνδετικό υλικό). Στη συνέχεια και μέχρι το βάθος των 17,80m συναντάται κερματισμένος λατυποπαγής ασβεστόλιθος. Από τα 17,80m μέχρι τα 22,40m συναντάται τεφροπράσινος σχιστόλιθος με ψαμμιτικά τεμάχια. Από τα 22,40m και μέχρι τέλος της γεώτρησης (42,10m) συναντάται λευκότεφρος ασβεστόλιθος κατά θέσεις έντονα διαρρηγμένος με καρστικά μικροέγκοιλα.

Γεώτρηση B3: Μέχρι του βάθους των 11,20m υπάρχουν ασβεστολιθικά κορήματα με αργιλικό - ασβεστικό συνδετικό υλικό. Από τα 11,20m μέχρι τα 18,00m συναντάται τεφροπράσινος ή μελανότεφρος σχιστόλιθος μυλωνιτοποιημένος, με τεμάχια ψαμμιτών. Στην συνέχεια συναντάται τεφρόχρους αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος, μέχρι το τέλος της γεώτρησης (35,00m).

Γεώτρηση B4: Επιφανειακά και μέχρι τα 0,70m συναντάται καστανέρυθρη άργιλος με χαλίκια. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της γεώτρησης (10,10m) συναντάται τεφρόχρους ασβεστόλιθος, ελαφρά αποσαθρωμένος.

Γεώτρηση B5: Από την επιφάνεια και μέχρι τα 0,50m βάθος υπάρχει μία καστανέρυθρη άργιλος με χαλίκια και στη συνέχεια μέχρι το βάθος των 2,70m συνεκτικό λατυποπαγές και μετά μέχρι τα 12,70m πλευρικά κορήματα με χαλίκια και κροκάλες ασβεστόλιθου σε αργιλοϊλύδες υλικό. Από τα 12,70m και μέχρι τα 20,40m συναντάται τεφροπράσινος ή μελανότεφρος σχιστόλιθος, τελείως ή πολύ αποσαθρωμένος με ενστρώσεις ψαμμίτη και χαλαζίτη. Από τα 20,40m και μέχρι το τέλος της γεώτρησης (26,50m) συναντάται ανοιχτότεφρος μέχρι τεφρομέλας

ασβεστόλιθος κατά θέσεις έντονα διαρρηγμένος και καρστικοποιημένος και με ενστρώσεις πολύ αποσαθρωμένου σχιστόλιθου.

Γεώτρηση B6: Από την επιφάνεια και μέχρι το βάθος των 7,20m αναπτύσσονται τα πλευρικά κορήματα από χαλίκια και κροκάλες ασβεστόλιθου σε αργιλοϊλυώδες υλικό. Στη συνέχεια και μέχρι τα 12,40m συναντάται πρασινότεφος σχιστόλιθος, τελείως έως μέτρια αποσαθρωμένος. Από τα 12,40m και μέχρι τέλος της γεώτρησης (23,00m) συναντάται τεφρός - τεφρομέλας ασβεστόλιθος, κατά θέσεις καρστικοποιημένος και δολομιτιωμένος, ελαφρά μέχρι αποσαθρωμένος, με ενστρώσεις μαργαϊκού ασβεστολίθου, σχιστολίθου και σχιστοκερατόλιθου και πλήθος ασβεστιτικών φλεβών.

Γεώτρηση B8: Μέχρι του βάθους των 6,40m υπάρχουν υλικά επιχωμάτωσης (άργιλος με χαλίκια). Στη συνέχεια και μέχρι το βάθος των 11,40m απαντούν ασβεστολιθικά κορήματα. Από τα 11,40m και μέχρι τα 19,10m συναντώνται εναλλαγές λεπτών στρώσεων αποσαθρωμένου σχιστολίθου και κερματισμένου ασβεστόλιθου ή τελείως εξαλλοιωμένος σχιστόλιθος. Στη συνέχεια από τα 19,10m και μέχρι τέλους της γεώτρησης (40,0m) συναντάται τεφρός ασβεστόλιθος κατά θέσεις έντονα κερματισμένος, με ένστρωση (25,50-28,30m) υποπράσινου σχιστολίθου έως βυσινέρυθρου αργιλοποιημένου σχιστοκερατόλιθου.

Γεώτρηση B9: Μέχρι το βάθος των 9,90m συναντώνται πλευρικά κορήματα από χαλίκια και κροκάλες ασβεστόλιθου μέσα σε αργιλοϊλυώδες υλικό. Από τα 9,90m έως τα 10,70m υπάρχει μία λεπτή στρώση φαιοπράσινου εξαλλοιωμένου σχιστόλιθου. Από τα 10,70m και μέχρι τέλος της γεώτρησης (25,00m) συναντάται τεφρός ασβεστόλιθος, με ενστρώσεις σχιστολίθου και κερατολίθου πολλές φλέβες ασβεστίτη.

Γεώτρηση B10: Μέχρι το βάθος των 31,80m συναντώνται ασβεστολιθικά κορήματα, κατά θέσεις πολύ καλά συγκολλημένα. Μάλιστα στο βάθος 28,30-31,80m παρατηρήθηκε ένα συμπαγές ασβεστολιθικό τέμαχος, ολισθημένο και επικαθημένο στα νεογενή ιζήματα της κοιλάδας. Στη συνέχεια και μέχρι του βάθους των 36,20m συναντώνται τεφρή άργιλος και αργιλόμαργα με οργανικά, ενώ από τα 36,20m και μέχρι τα 40,00m (τέλος γεώτρησης) συναντάται μαργαϊκός ασβεστόλιθος με λεπτές ενστρώσεις μάργων.

Γεώτρηση B11: Από την επιφάνεια και μέχρι τα 5,50m βάθος απαντούν ασβεστολιθικά κορήματα (ασβεστολιθικά χαλίκια σε καστανέρυθρη άργιλο). Στα 5,50m–6,00m υπάρχει στρώση λατυποπαγούς ασβεστόλιθου και στη συνέχεια (6,00m-6,60m) λεπτή στρώση τεφροπράσινου σχιστολίθου. Από τα 6,60m και μέχρι τα 50,00m (τέλος γεώτρησης) συναντάται λευκότεφρος ασβεστόλιθος κατά θέσεις κερματισμένος και με καρστικά μικροέγκοιλα.

Γεώτρηση B12: Επιφανειακά και μέχρι τα 2,50m απαντούν ασβεστολιθικά κορήματα. Στη συνέχεια και μέχρι τέλους της γεώτρησης (40,00m) συναντάται λευκότεφρος ή ροδόχρους ασβεστόλιθος κατά θέσεις κερματισμένος και με λίγα καρστικά μικροέγκοιλα.

Μετρήσεις οργάνων

Πιεζόμετρα

Πιεζόμετρα τοποθετήθηκαν στις γεωτρήσεις B4, B6, B8 και B9. Σε κανένα από αυτά τα πιεζόμετρα δεν παρατηρήθηκε στάθμη υπόγειου ορίζοντα.

Κλισιόμετρα

Κλισιόμετρα τοποθετήθηκαν στις γεωτρήσεις B1, B2, B3, B5, B10 και B11. Από αυτά μόνον τα κλισιόμετρα B1 και B5 εγκαταστάθηκαν το 1997, οπότε έγιναν και οι αρχικές μετρήσεις, ενώ όλα τα υπόλοιπα εγκαταστάθηκαν αργότερα κατά τη Β' φάση διάτρησης των γεωτρήσεων.

Σ' αυτή τη σύντομη περίοδο των δύο μηνών έγινε μόνον η αρχική μέτρηση και μία μέτρηση ακόμη, οπότε δεν είναι δυνατό να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Κατά την περίοδο αυτή άλλωστε κανένα γεγονός δεν συνέβη που να δικαιολογεί κάποια αξιόλογη εξέλιξη της κατολίσθησης.

Για τον υπολογισμό της αρχικής μέτρησης σε κάθε κλισιόμετρο γίνονται τρεις μετρήσεις και στις δυο κατευθύνσεις, Α και Β. Από αυτές επιλέγεται μία, αυτή που έχει την μικρότερη απόκλιση από τον μέσο όρο των τριών, ως η αρχική μέτρηση για το συγκεκριμένο κλισιόμετρο.

Στον Πίνακα 3.2 δίνεται ο προσανατολισμός της κατεύθυνσης Αο σε κάθε κλισιόμετρο, με βάση την οποία γίνονται όλες οι επόμενες συγκριτικές μετρήσεις.

Υπενθυμίζεται ότι η μία μέτρηση των αποκλίσεων σε κάθε κλισιόμετρο, γίνεται κατά την κατεύθυνση Α-Α και η άλλη μέτρηση κατά την κατεύθυνση Β-Β.

Στον Πίνακα 3.3 δίνεται ο αριθμός και η χρονολογία των μετρήσεων που έχουν γίνει στα κλισιόμετρα της κατολίσθησης.

Πίνακας 3.2: Διευθύνσεις κλισιομετρήσεων Αο.

Γεώτρηση	Αο
B1	B310°
B2	B120°
B3	B30°
B5	B350°
B10	B130°
B11	B110°

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις κλισιομέτρων.

Γεώτρηση	Αρχική Μέτρηση (3 μετρήσεις)	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	4 ^η Μέτρηση	5 ^η Μέτρηση
B1	16-12-97	17-6-98	20-10-98	4-11-98	
B2	19-10-98	4-11-98			
B3	19-10-98	4-11-98			
B5	30-10-97	16-12-97	17-6-98	2-10-98	4-11-98
B10	20-10-98	4-11-98			
B11	19-10-98	4-11-98			

Αξιολόγηση Ευρημάτων Γεωτρήσεων

Η πολύπλοκη γεωλογική δομή της περιοχής της κατολίσθησης επιβεβαιώθηκε με τις γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν.

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί, που συναντήθηκαν, είναι οι εξής:

- Πλευρικά **κορήματα** κυρίως ασβεστολιθικής προέλευσης
- **Ασβεστόλιθοι**, συνήθως δολομιτικοί, του Τριαδικού - Ιουρασικού
- Παλαιοζωϊκοί **σχιστόλιθοι**, (συνήθως αργιλικοί), και ψαμμίτες.
- Ασβεστολιθικό **λατυποπαγές**, χαλαρό έως πολύ καλά συγκολλημένο

Έτσι στη γεώτρηση B1, μέχρι το βάθος των 48,50m συναντήθηκε μόνο ο παλαιοζωϊκός σχιστόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη, που καλύπτεται από παχιά πλευρικά κορήματα (πάχους 19,50m).

Η γεώτρηση B2, διέτρησε μέχρι του βάθους των 11,90m πλευρικά κορήματα με μεγάλα ασβεστολιθικά τεμάχια στη συνέχεια και μέχρι τα 17,80m ασβεστόλιθο και από τα 17,80-22,40m σχιστόλιθο. Από τα 22,40m και μέχρι τα 42,10m (τέλος γεώτρησης) ασβεστόλιθο. Τόσο ο υπερκείμενος του σχιστολίθου ασβεστόλιθος, όσο και ο σχιστόλιθος φαίνεται να έχουν επωθηθεί στον υποκείμενο ασβεστόλιθο του Τριαδικού - Ιουρασικού.

Η γεώτρηση B3, διέτρησε μέχρι του βάθους των 11,20m κορήματα, στη συνέχεια και μέχρι τα 18,00m σχιστόλιθο, ενώ από τα 18,00 και μέχρι τα 35,00m (τέλος γεώτρησης) ασβεστόλιθο.

Και στη γεώτρηση αυτή ο παλαιοζωϊκός σχιστόλιθος έχει επωθηθεί στον υποκείμενο ασβεστόλιθο του Τριαδικού - Ιουρασικού.

Η γεώτρηση B4, διέτρησε μέχρι το βάθος των 10,10m, όπου και περατώθηκε, μόνο τεφρούς ασβεστόλιθους, που κατά πάσα πιθανότητα αποτελούν το υποκείμενο ασβεστολιθικό υπόβαθρο του Τριαδικού - Ιουρασικού.

Στη γεώτρηση B5, τα πλευρικά κορήματα πάχους 12,70m καλύπτουν τον σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη που φθάνει μέχρι το βάθος των 20,40m. Από το βάθος αυτό

και μέχρι τα 26,50m συναντάται τεφρομέλας ασβεστόλιθος με ενστρώσεις όμως σχιστολίθου που δείχνει ότι πιθανό να πρόκειται για φακοειδή ένστρωση εντός του σχιστολίθου.

Το ίδιο ισχύει και για τις γεωτρήσεις B6 και B9, όπου ο τεφρός - τεφρομέλας ασβεστόλιθος με τις ενστρώσεις σχιστολίθου που συναντάται σε βάθος 12,40-23,00m στη γεώτρηση B6 και 10,70-25,00m στη B9, είναι πιθανό να αποτελεί φακοειδή ένστρωση των παλαιοζωικών σχιστολίθων, και να μην ανήκει στους Τριαδικούς - Ιουρασικούς ασβεστόλιθους.

Η γεώτρηση B8, διέτρησε μέχρι του βάθους των 11,40m υλικά επιχωμάτωσης και κορήματα. Από τα 11,40-19,10m διατρήθηκαν εναλλαγές σχιστολίθου και ασβεστόλιθου, και από τα 19,10m μέχρι τα 40,00m (τέλος γεώτρησης) ασβεστόλιθος. Στο βάθος 25,50-28,30m συναντήθηκαν ζώνες υποπράσινου σχιστολίθου έως ερυθροϊώδους σχιστολίθου - σχιστοκερατολίθου.

Και στη γεώτρηση αυτή ο σχιστόλιθος (με τις ενστρώσεις ασβεστόλιθου) έχει επωθηθεί στον υποκείμενο ασβεστόλιθο, παρόλο που δεν είναι απολύτως σαφές πια ακριβώς είναι το βάθος του υποκείμενου ασβεστόλιθου.

Στη γεώτρηση B10, η οποία βρίσκεται κατάντη της κατολίσθησης, κάτω από τα μεγάλου πάχους πλευρικά κορήματα (31,80m), στα οποία περιλαμβάνεται και μεγάλο κατολισθημένο τέμαχος ασβεστόλιθου, συναντώνται νεώτερα ιζήματα της λεκάνης του Ασπροπύργου, αργίλου και μάργας με οργανικά καθώς και μαργαϊκού ασβεστόλιθου.

Στη γεώτρηση B11, που βρίσκεται εντός της κατολισθαίνουσας μάζας, κάτω από τα κορήματα πάχους 5,50m συναντάται λεπτή στρώση ασβεστόλιθου (5,50-6,00m) και σχιστολίθου (6,00-6,60m), ενώ από τα 6,60m και μέχρι τέλος της γεώτρησης (50,00m) διατρήθηκε ο ασβεστόλιθος.

Οι λεπτές στρώσεις του ασβεστόλιθου και σχιστολίθου ανήκουν στην επωθημένη μάζα, ενώ ο υποκείμενος ασβεστόλιθος βρίσκεται στη θέση του και είναι του Τριαδικού - Ιουρασικού.

Τέλος, η γεώτρηση B12, κάτω από τα μικρού πάχους (2,50m) κορήματα, διέτρησε μέχρι του βάθους των 40,00m (τέλος γεώτρησης) ασβεστόλιθο του Τριαδικού - Ιουρασικού.

Παραμέτροι αντοχής της μελέτης

Οι παράμετροι αντοχής, που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις, είναι οι εξής:

Κορήματα

Με βάση τις δοκιμές κατάταξης που έγιναν σε προηγούμενες έρευνες λαμβάνονται ως παράμετροι αντοχής για τα κορήματα:

$$\varphi=30^{\circ}-35^{\circ}$$

$$c=0$$

Οι αναλύσεις ευστάθειας της κατολίσθησης έγιναν και με τις δύο παραδοχές $\varphi = 30^{\circ}$ και $\varphi = 35^{\circ}$ με μικρή επίπτωση στο συντελεστή ασφάλειας.

Σχιστόλιθος

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των προηγούμενων ερευνών έδωσαν τιμές που κυμαίνονται από 122 kPa έως 816 kPa. Η μοναδική δοκιμή της παρούσας έρευνας έδωσε $q_u = 162$ kPa, που βρίσκεται μέσα στα φάσμα των παραπάνω τιμών.

Έγινε επίσης ανάστροφη ανάλυση της ευσταθείας της κατολίσθησης για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής του σχιστόλιθου όπου προέκυψαν οι εξής τιμές:

$$\text{Κάτω τμήμα: } \varphi' = 20^{\circ} \div 21^{\circ}$$

$$\text{Άνω τμήμα: } \varphi' = 17^{\circ} \div 17,4^{\circ}$$

Υπόγειο Νερό

Υπόγειος ορίζοντας δεν εντοπίστηκε πουθενά στην περιοχή της κατολίσθησης σε καμία γεωτεχνική έρευνα. Ο σχιστόλιθος είναι γενικώς αδιαπέρατο πέτρωμα, ενώ ο υποκείμενος ασβεστόλιθος είναι διαπερατός και συνεπώς στραγγίζει οποιαδήποτε μικρή κατείσδυση ομβρίων μέσω διακλάσεων.

Κατεισδύσεις ομβρίων μέσω των κορημάτων μπορεί να συμβαίνουν γι' αυτό ίσως και τα ανώτερα στρώματα του σχιστόλιθου είναι περισσότερο εξαλλοιωμένα. Πάντως η ενεργοποίηση των κατολισθήσεων της περιοχής, που έγιναν όλες σε ξηρές περιόδους, υποδηλώνει ότι το νερό δεν έχει συμβάλει άμεσα στις ήδη εκδηλωμένες κατολισθήσεις. Όμως θα πρέπει και πάλι να επισημανθεί ότι τόσο ο σχιστόλιθος όσο και τα κορήματα μπορεί να εμφανίσουν μειωμένες αντοχές, υπό την επίδραση αυξημένων πιέσεων πόρων σαν συνέπεια ανάπτυξης έστω και προσωρινού επικρεμάμενου ορίζοντα μέσα στα κορήματα. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητή η καλή αποστράγγιση της περιοχής.

3.3.5 Γεωτεχνική Έρευνα Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΤΕΠΕ, Δεκέμβριος 2001

Για τις αναλύσεις ευστάθειας των πρανών ενδιαφέρει κυρίως ο σχιστόλιθος, που αποτελεί και τον ασθενέστερο σχηματισμό. Από την συνεκτίμηση του συνόλου των διαθέσιμων στοιχείων είχε προταθεί στην Έκθεση Αξιολόγησης Ερευνητικών Εργασιών (εγκεκριμένη από την ΕΡΓΟΣΕ) να ληφθούν οι εξής παράμετροι αντοχής:

- Για το σχιστόλιθο $\phi = 17^\circ$, $c = 0$ και
- Για τα κορήματα $\phi = 30^\circ \pm 35^\circ$, $c = 0$

Η παραπάνω πρόταση βασίσθηκε κυρίως στις ανάστροφες αναλύσεις ευστάθειας της κατολίσθησης, στ' αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και στην εικόνα του πετρώματος, όπως φάνηκε στους πυρήνες των γεωτρήσεων.

Οι παραπάνω τιμές κρίνονται εύλογες και αποδεκτές, είναι εγκεκριμένες και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι, αναφορικά με τον σχιστόλιθο, οι τιμές $\phi' = 17^\circ$, $c' = 0$, που μπορούν να θεωρηθούν παράμετροι παραμένουσας (residual) αντοχής, αντιπροσωπεύουν τα πλέον ασθενή, εξαλλοιωμένα και μυλωνιτοποιημένα στρώματα, το πάχος των οποίων συνήθως δεν ξεπερνάει τα 0,80m. Το πρόβλημα είναι η συνέχεια και η έκταση αυτών των στρώσεων, που ούτως ή άλλως δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί προκαταβολικά. Γι' αυτό και ως συντηρητική προσέγγιση λήφθηκαν οι παραπάνω τιμές των παραμέτρων αντοχής για το σύνολο του σχιστόλιθου. Πάντως αναμένεται τοπικά ο σχιστόλιθος να παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή, κυρίως όπου υπάρχει λιγότερο

ποσοστό αργιλικού κλάσματος και αυξημένο ποσοστό ψαμμίτη. Από την εικόνα των πυρήνων των γεωτρήσεων φαίνεται ότι τα πλέον ασθενή στρώματα σχιστολίθου παρατηρούνται στην επαφή με τους ασβεστόλιθους ή τα κορήματα.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι η διατμητική αντοχή των σχηματισμών εξαρτάται όχι μόνον από τις τιμές των ως άνω παραμέτρων αλλά και από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις νερού των πόρων, που καθορίζονται από την ύπαρξη του υπόγειου νερού.

Αναφορικά με τον ασβεστόλιθο δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει καμία ιδιαίτερη έρευνα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής του. Το πέτρωμα, ακόμη και μετρίως τεκτονισμένο και/ή τοπικά αποσαθρωμένο, παρουσιάζει πολύ καλές ιδιότητες. Μια μάλλον συντηρητική παραδοχή για τις παραμέτρους αντοχής θα μπορούσε να είναι $\phi' = 35^\circ$, $c' = 300 \text{ KPA}$.

Προτεινόμενα μέτρα αντιμετώπισης της κατολίσθησης

Για την αντιμετώπιση της κατολίσθησης προτείνεται η εφαρμογή ριζικών λύσεων με απολλοτρίωση του εργοστασίου και σταθεροποίηση της ευρύτερης περιοχής με χωματοουργικά και στραγγιστικά έργα.

Προτείνεται αφαίρεση όλων των κατολισθητικών υλικών, από το υψόμετρο της σιδηροδρομικής γραμμής και πάνω, καθώς και το μεγαλύτερο μέρος των κορημάτων και των σχιστόλιθων. Αυτό συνεπάγεται την απομάκρυνση του εργοστασίου το οποίο βρίσκεται πάνω σε κορήματα.

3.4 Συμπεράσματα των γεωτεχνικών ερευνών

Με βάση τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από κάθε έρευνα οι μελετητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

Το Γενικό Γεωλογικό Μοντέλο

Η ευρύτερη περιοχή της κατολίσθησης είναι μία ζώνη επώθησης του παλαιοζωικού σχιστόλιθου και νεώτερων ασβεστόλιθων πάνω στον ασβεστόλιθο του Τριαδικού - Ιουρασικού, που είναι στη θέση του. Το σχιστολιθικό υπόβαθρο είναι μακράν, για το εξεταζόμενο πρόβλημα, και δεν επηρεάζει τις γεωλογικές-γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής.

Η περιοχή επιφανειακά καλύπτεται από κορήματα. Το μέσο πάχος των επωθημένων σχιστόλιθων είναι 3-5m, αλλά αυξάνει σημαντικά στα χαμηλότερα υψόμετρα και κυρίως προς ΒΑ.

Τα Προηγούμενα Γεγονότα

Η κατολίσθηση έγινε μετά την εκσκαφή του ορύγματος της Λεωφ. Αιγάλεω. Επανενεργοποιήθηκε και επεκτάθηκε στη συνέχεια, παρά την ύπαρξη τριών σειρών πασσάλων, κατά τη διάρκεια συμπληρωματικών εκσκαφών στην οδό.

Η επιφάνεια ολίσθησης ήταν στα άνω στρώματα του σχιστόλιθου.

Η Εκτίμηση για το Μέλλον

Η σημερινή διαμορφωμένη κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε οριακή ισορροπία, δηλαδή με συντελεστή ασφαλείας ~1,0.

Από τις ανάστροφες αναλύσεις ευστάθειας προέκυψαν παράμετροι αντοχής του σχιστόλιθου:

$$\varphi' = 17^\circ$$

$$c = 0$$

Τα κλισιόμετρα δείχνουν πολύ μικρή τάση μετακίνησης εντός του σχιστόλιθου, το οποίο δείχνει οριακή κατάσταση με δυνητική εκδήλωση περαιτέρω κίνησης.

Στην ανάντη της κατολίσθησης περιοχή (εργοστάσιο και λόφος, ανάντη) είναι δυνατή η επέκταση της κατολίσθησης ή ακόμη και η εκδήλωση μιας νέας ολίσθησης, που να περιλαμβάνει κυρίως τα κορήματα (πάχους μέχρι και 12m), αλλά και τα ανώτερα στρώματα του υποκειμένου σχιστόλιθου.

Σε περίπτωση εκσκαφής του ορύγματος της σιδηροδρομικής γραμμής, θα δημιουργηθούν στην ανάντη περιοχή συνθήκες ανάλογες με αυτές που προκάλεσαν την υπάρχουσα κατολίσθηση οπότε είναι βέβαιο ότι η κατολίσθηση θα επανενεργοποιηθεί και θα επεκταθεί με κάθε προσπάθεια εκσκαφής.

Στην περιοχή ανατολικά της κατολίσθησης είναι πιθανή η επέκταση της κατολίσθησης ή ακόμα και η εκδήλωση κάποιας νέας βαθύτερης, που να

περιλαμβάνει κυρίως τα κορήματα, αλλά ακόμη και τ' ανώτερα τμήματα του σχιστόλιθου. Όμως, το πρόβλημα προς αυτή την κατεύθυνση μειώνεται, επειδή δεν υπάρχει μεγάλη δυνατότητα ανάπτυξης της κατολίσθησης λόγω της τοπογραφίας, αλλά και επειδή το ύψος του ορύγματος μειώνεται.

Στην περιοχή της κατολισθαίνουσας μάζας δεν υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της κατολίσθησης προς τα δυτικά, ούτε εκδήλωσης βαθύτερης ολίσθησης, λόγω του υποκειμένου σταθερού ασβεστόλιθου. Τέλος δεν υπάρχουν ενδείξεις βαθύτερης ολίσθησης προς την κοιλάδα του Ασπροπύργου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η ευστάθεια των πρανών μελετάται συνήθως με τη χρήση μεθόδων οριακής ισορροπίας. Αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτών των μεθόδων είναι ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή ασφαλείας, FS , για τη δυσμενέστερη περίπτωση επιφάνειας ολίσθησης.

Η τιμή του συντελεστή αποτελεί έκφραση και μέτρο συνολικής ασφαλείας, που παρουσιάζει το πρανές. Επειδή το πρόβλημα γενικά είναι υπερστατικό, ήταν αναγκαίο κατά την ανάλυση να γίνουν διάφορες απλοποιητικές υποθέσεις, έτσι ώστε η θεώρηση όλων ή ορισμένων συνθηκών ισορροπίας να οδηγήσει σε λύση. Πράγματι μέχρι σήμερα έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες διαφέρουν ως προς τον αριθμό και τον τύπο των υποθέσεων (Τσότσος, 1991).

Εκτός από τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί, ιδίως τα τελευταία χρόνια, ελαστοπλαστικές μέθοδοι, κατά την εφαρμογή των οποίων υπολογίζονται σε κρίσιμες θέσεις οι μέγιστες διατμητικές τάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αντοχές των γεωυλικών. Οι μέθοδοι αυτές είναι γενικά πολύ πιο σύνθετες (Τσότσος, 1991).

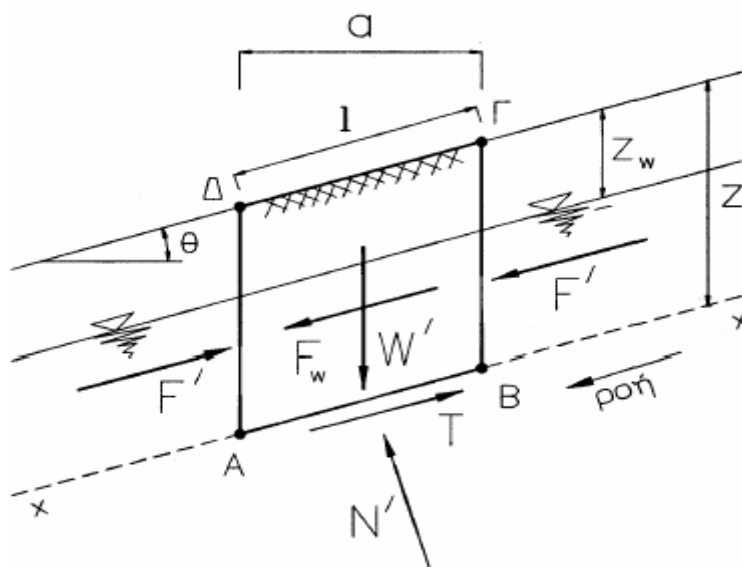
Επίσης τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods). Σήμερα, υπάρχει πλήθος μεθόδων για την αριθμητική επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας – πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (π.χ. εδάφη, πετρώματα). Μια αριθμητική μέθοδος είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

Η ανάπτυξη που ακολουθεί, περιορίζεται στις μεθόδους οριακής ισορροπίας και συγκεκριμένα στην παρουσίαση των πιο γνωστών και έγκυρων μεθόδων, οι οποίες αντιμετωπίζουν περιπτώσεις συνηθισμένες στο πεδίο και στην πράξη. Καταρχήν αναλύεται η ευστάθεια πρανών με μεγάλο (θεωρητικώς άπειρο) ύψος με ομοιόμορφη κλίση και στη συνέχεια η ευστάθεια πρανών με περιορισμένο ύψος.

4.1 Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση

Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει ένα πρανές μεγάλου μήκους με ομοιόμορφη κλίση (θ). Στο εσωτερικό του πρανούς υπάρχει μόνιμη υδατική ροή (διήθηση) με διεύθυνση παράλληλη προς το πρανές και ελεύθερη επιφάνεια ροής σε βάθος z_w . Λόγω του μεγάλου μήκους του πρανούς, η πιθανή επιφάνεια ολίσθησης είναι παράλληλη με την επιφάνεια του πρανούς. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η εντατική κατάσταση σε ένα επίπεδο (xx) παράλληλο με την επιφάνεια, σε βάθος z . Στο εδαφικό τεμάχος (ΑΒΓΔ) ασκούνται οι ενεργές δυνάμεις που είναι σημειωμένες στο Σχήμα 4.1. Το "ενεργό" βάρος του τεμάχους είναι (Καββαδάς, 2000):

$$W' = a [z_w \gamma + (z - z_w) \gamma'] \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.1 Πρανές μεγάλου μήκους με υδατική ροή (Καββαδάς, 2000).

όπου γ είναι το ολικό ειδικό βάρος και γ' το υπό άνωση ειδικό βάρος του εδάφους.

Η δύναμη διήθησης είναι ίση με:

$$F_w = (i \gamma_w) \alpha z \quad (4.2)$$

όπου $i = \sin \theta$ είναι η υδραυλική κλίση (επειδή η ελεύθερη επιφάνεια της ροής έχει κλίση θ). Τέλος, λόγω συμμετρίας, οι δυνάμεις F' που ασκούνται στις πλευρές του τεμάχους είναι ίσες και αντίθετες. Συνεπώς, η στατική ισορροπία του τεμάχους δίνει:

$$T = F_w + W' \sin \theta = \alpha (z\gamma + z_w\gamma_w) \sin \theta \quad (4.3)$$

$$N' = W' \cos \theta = \alpha (z\gamma' + z_w\gamma_w) \cos \theta \quad (4.4)$$

Η ορθή ενεργός τάση (σ') και η διατμητική τάση (τ) στο επίπεδο (xx) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma' = \frac{N'}{1} = (z\gamma' + z_w\gamma_w) \cos^2 \theta \quad (4.5)$$

$$\tau = \frac{T}{1} = (z\gamma + z_w\gamma_w) \sin \theta \cos \theta \quad (4.6)$$

οπότε, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι πιθανής αστοχίας στο επίπεδο (xx) είναι:

$$FS = \frac{\tau_u}{\tau} = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{\tau} = \frac{\frac{c}{\cos^2 \theta} + (z\gamma' + z_w\gamma_w) \tan \phi}{(z\gamma + z_w\gamma_w) \tan \theta} \quad (4.7)$$

όπου τ_u η διατμητική αντοχή, $\phi \tan \phi'$ η γωνία εσωτερικής τριβής και c η συνοχή. Ο ανωτέρω συντελεστής ασφαλείας εξειδικεύεται σε μερικές συνήθεις περιπτώσεις πρακτικών εφαρμογών (Καββαδάς, 2000).

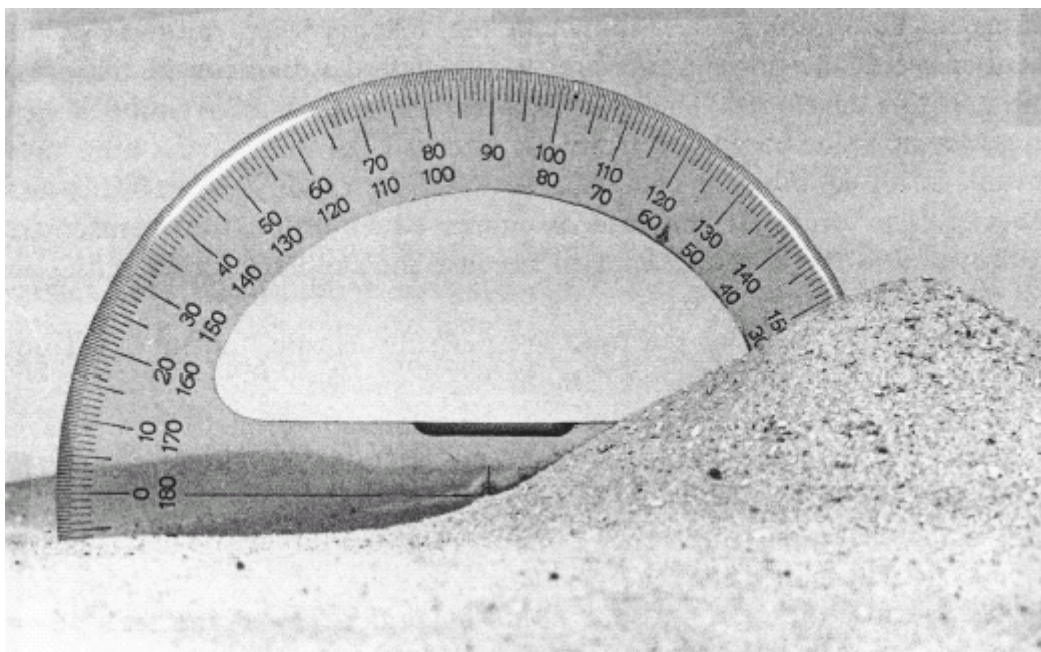
4.1.1 Πρανές ξηρής άμμου

Στην περίπτωση της ξηρής άμμου ($c = 0$, $z_w = 0$, $\gamma = \gamma'$), ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (4.8)$$

δηλαδή το πρανές αστοχεί, όταν η κλίση του είναι ίση με τη γωνία τριβής της άμμου. Συχνά, το συμπέρασμα αυτό χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της γωνίας τριβής μιας ξηρής άμμου σε πολύ χαλαρή διάταξη. Η γωνία τριβής θεωρείται ίση με τη γωνία της ελεύθερης απόθεσης (Σχήμα 4.2).

Η συμπεριφορά μιας άμμου που είναι πλήρως βυθισμένη στο νερό (π.χ. άμμος στον πυθμένα της θάλασσας) είναι όμοια με τη συμπεριφορά της ξηρής άμμου και συνεπώς το βυθισμένο πρανές αστοχεί όταν η κλίση του γίνει ίση με τη γωνία τριβής. Η περίπτωση της υγρής άμμου (π.χ. άμμος παραλίας) είναι διαφορετική, επειδή οι αρνητικές πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στους τριχοειδείς μηνίσκους αυξάνουν τις ενεργές τάσεις, με συνέπεια την εμφάνιση "φαινόμενης συνοχής" (Καββαδάς, 2000).



Σχήμα 4.2 Γωνία απόθεσης μιας ξηρής άμμου (Καββαδάς, 2000).

4.1.2 Πρανές άμμου με ελεύθερη επιφάνεια ροής στην επιφάνεια του εδάφους

Στην περίπτωση άμμου με ελεύθερη επιφάνεια ροής στην επιφάνεια του εδάφους ($c=0$, $z_w = 0$), ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$FS = \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma \tan \theta} \quad (4.9)$$

δηλαδή η ύπαρξη ροής μειώνει το συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, επειδή $\gamma < \gamma'$ (Σχέση 4.8). Το πρανές αστοχεί, όταν η γωνία κλίσης γίνει (Καββαδάς, 2000):

$$\theta = \arctan\left(\frac{\gamma'}{\gamma} \tan \phi\right) < \phi$$

4.1.3 Πρανές άμμου με ροή

Στην περίπτωση άμμου με ροή ($c=0$), ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$FS = \frac{z\gamma' + z_w\gamma_w \tan \phi}{z\gamma + z_w\gamma_w \tan \theta} \quad (4.10)$$

Η σχέση (4.10) δηλώνει ότι, για ορισμένη κλίση του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με το βάθος και συνεπώς:

(α) Όταν: $\tan \theta < \frac{\gamma'}{\gamma} \tan \phi$, το πρανές δεν αστοχεί.

(β) Όταν: $\frac{\gamma'}{\gamma} \tan \phi < \tan \theta < \frac{\gamma}{\gamma + \gamma_w} \tan \phi$, το πρανές αστοχεί σε βάθη μεγαλύτερα

από την κρίσιμη τιμή z_{cr} :

$$z_{cr} = z_w \frac{\gamma_w (\tan \phi - \tan \theta)}{\gamma \tan \theta - \gamma' \tan \phi}$$

(γ) Όταν: $\frac{\gamma}{\gamma + \gamma_w} \tan \phi < \tan \theta < \tan \phi$, το πρανές αστοχεί σε όλα τα βάθη κάτω από

την ελεύθερη επιφάνεια της ροής.

(δ) Όταν, τέλος: $\tan \theta \geq \tan \phi$, το πρανές αστοχεί σε όλες τις θέσεις (Καββαδάς, 2000).

4.1.4 Πρανές συνεκτικού υλικού με ροή

Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση (4.7) που δηλώνει ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με το βάθος. Το κρίσιμο βάθος, κάτω από το οποίο το έδαφος αστοχεί, δίνεται από τη σχέση:

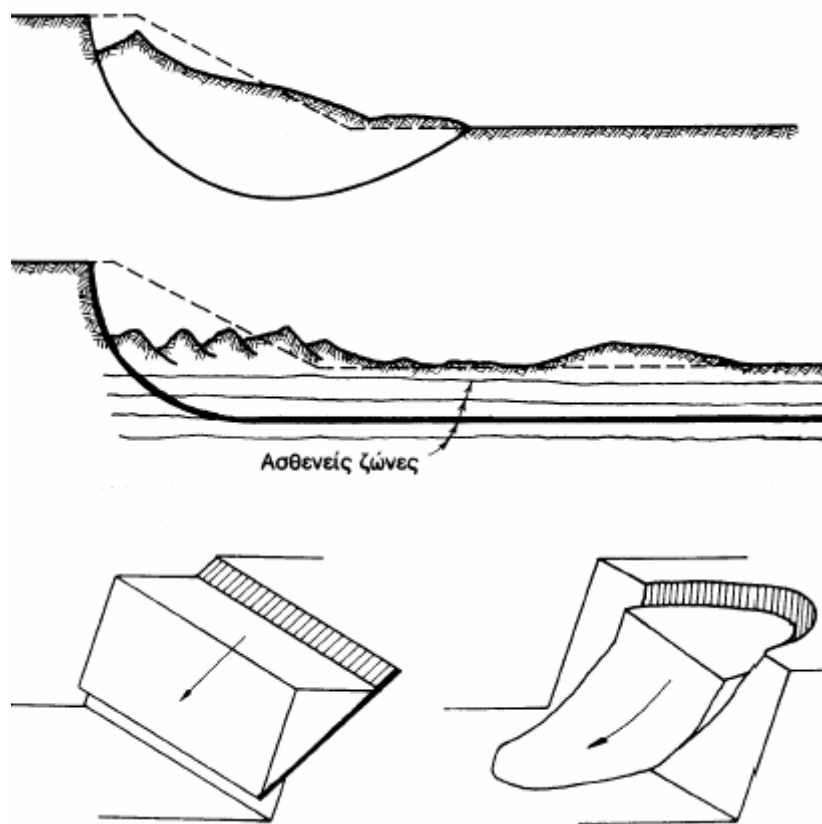
$$z_{cr} = \frac{\frac{c}{\cos^2 \theta} + z_w \gamma_w (\tan \phi - \tan \theta)}{\gamma \tan \theta - \gamma' \tan \phi} \quad (4.11)$$

Το κρίσιμο βάθος και ο συντελεστή ασφαλείας μειώνονται όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλότερη (δηλαδή όσο μειώνεται το z_w). Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και στη φύση, όπου φυσικά πρανή συνήθως αστοχούν μετά από έντονες βροχοπτώσεις, οπότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ανέρχεται (Καββαδάς, 2000).

4.2 Πρανή περιορισμένου ύψους

Όταν το ύψος του πρανού δεν είναι πολύ μεγαλύτερο από το κρίσιμο βάθος των επιπέδων αστοχίας (z_{cr}), οι δυνάμεις F' που ασκούνται σε κατακόρυφα επίπεδα (Σχήμα 4.1) δεν είναι ίσες και συνεπώς η αστοχία μπορεί να συμβεί σε επιφάνειες που δεν είναι παράλληλες με την επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή η ευστάθεια του πρανού πρέπει να μελετηθεί με τις μεθόδους που αφορούν πρανή περιορισμένου ύψους και περιγράφονται παρακάτω (Καββαδάς, 2000).

Σε φυσικά πρανή ή εκσκαφές περιορισμένου ύψους οι πρώτες ενδείξεις μιας επερχόμενης αστοχίας είναι συνήθως η ανύψωση του εδάφους (φούσκωμα) στη βάση του πρανού και η εμφάνιση ρωγμών στη στέψη του. Κατά την αστοχία μία εδαφική μάζα, που περιλαμβάνει το σύνολο (ή μέρος μόνον) του πρανού, μετακινείται προς τα κατάντη μέχρι να φθάσει σε νέα θέση ισορροπίας, οπότε η κίνησή της σταματά (Σχήμα 4.3). Συχνά η κινούμενη μάζα τεμαχίζεται και παραμορφώνεται. Η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η ολίσθηση της εδαφικής μάζας (επιφάνεια αστοχίας) έχει συνήθως κυλινδρικό σχήμα (οπότε η αστοχία συμβαίνει υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) ή σφαιρικό σχήμα, οπότε η αστοχία είναι τρισδιάστατη. Σε ορισμένες περιπτώσεις η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίπεδη ή αποτελείται από σύστημα επιπέδων και κυλινδρικών επιφανειών. Τούτο συμβαίνει όταν το έδαφος περιλαμβάνει ασθενείς εδαφικές στρώσεις που καθορίζουν την επιφάνεια ολίσθησης. Λόγω της ποικιλίας μορφών της επιφάνειας ολίσθησης, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την ανάλυση της ευστάθειας πρανών με οποιαδήποτε μορφή πιθανής επιφάνειας ολίσθησης (Καββαδάς, 2000).

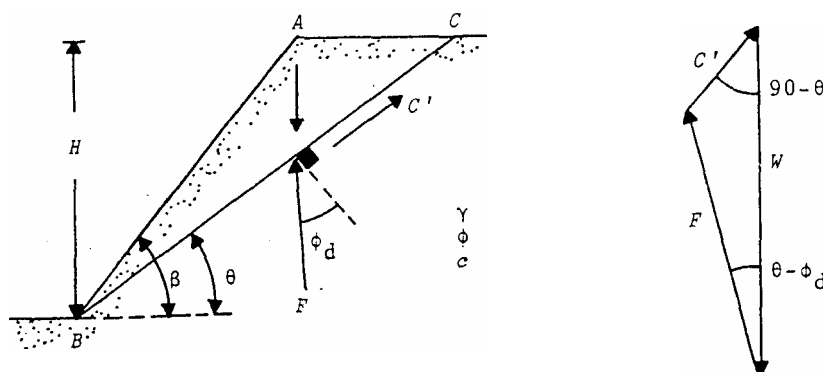


Σχήμα 4.3 Τυπικές μορφές αστοχίας πρανών (Καββαδάς, 2000).

4.2.1 Επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης

Η περίπτωση αυτή παρατηρείται στην πράξη σε φυσικά ή τεχνητά πρανή, όταν κατά μία ορισμένη διεύθυνση η αντοχή είναι χαμηλότερη απ' ότι σε άλλες, π.χ. η εκτέλεση εκσκαφής σε στρωματοποιημένο σχηματισμό, όταν τα στρώματα βυθίζονται προς την εκσκαφή, μπορεί να προκαλέσει παρόμοιου τύπου ολίσθηση. Αντίθετα σε ομοιογενείς αποθέσεις η επιφάνεια ολίσθησης έχει συνήθως καμπύλη μορφή (Τσότσος, 1991).

Για την ανάλυση των περιπτώσεων αυτών ακολουθείται συνήθως η μέθοδος του Culmann. Καταρχήν η ολίσθηση γίνεται κατά μήκος επιπέδου, που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς οπότε σχηματίζεται η σφήνα ολίσθησης ABC. Στη σφήνα θεωρείται, ότι ενεργούν τρεις δυνάμεις (Σχήμα 4.4) (Τσότσος, 1991).



Σχήμα 4.4 Πρανές περιορισμένου ύψους (Τσότσος, 1991).

Το βάρος της σφήνας, W , υπολογίζεται εύκολα χρησιμοποιώντας τα γνωστά γεωμετρικά δεδομένα του σχήματος 4.4 με τη σχέση:

$$W = \frac{1}{2} \gamma x \left[\left(\frac{H}{\sin \beta} \right) \sin(\beta - \Theta) \right] \quad (4.12)$$

όπου x το μήκος BC και γ το ειδικό βάρος του γεωυλικού.

Η υπάρχουσα ασφάλεια εκτιμάται, εάν συγκριθεί η κατά μήκος της επιφάνειας BC πραγματική αντοχή προς την αντοχή που απαιτείται για την ισορροπία της σφήνας, σύμφωνα με το δυναμοπολύγωνο του σχήματος. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι τιμές των παραμέτρων αντοχής ϕ και c κατά μήκος της BC. Η τεχνική επίλυσης είναι η εξής:

- Επιλέγεται μια αρχική τιμή της γωνίας τριβής, ϕ_d , κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, έτσι ώστε $\phi_d < \phi$ και από το δυναμοπολύγωνο υπολογίζεται η αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή της συνοχής c_d :

$$c_d = W \left[\frac{\sin(\theta - \phi_d)}{\cos \phi_d} \right]$$

- Εκτιμώνται οι τιμές των προσωρινών επιμέρους συντελεστών ασφαλείας:

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

$$F_c = \frac{c}{c_d}$$

Συχνά επιλέγεται ως αρχική τιμή της δοκιμαστικής γωνίας τριβής η τιμή $\phi_d = \phi$ οπότε $F_\phi = 1$ και εάν προκύπτει ο F_c μεγαλύτερος του 1, γίνεται μία πρώτη εκτίμηση κατά πόσον η σφήνα είναι σταθερή ή όχι.

- Η υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται με τρόπο παρόμοιο, με στόχο να καταλήξει σε ίσες πρακτικά τιμές των επιμέρους συντελεστών F_ϕ και F_c , οπότε θεωρείται ότι και ο γενικός συντελεστής ασφαλείας, F , είναι ίσος με την κοινή τιμή τους, $F = F_\phi = F_c$. Προς το σκοπό αυτό είτε χρησιμοποιείται κατάλληλο απλό πρόγραμμα H/Y, είτε η επίλυση γίνεται με τη γραφική κατασκευή του σχήματος 4.4 (Τσότσος 1991).

Πολλές φορές όταν, η αξιοπιστία των τιμών των παραμέτρων αντοχής είναι διαφορετική και κρίνεται, ότι θα πρέπει να διαφέρουν οι συντελεστές ασφαλείας, η τρίτη φάση διαφοροποιείται κατάλληλα.

Στη φύση σε πολλές περιπτώσεις το πρόβλημα διαφοροποιείται από την ανάπτυξη για διάφορους λόγους μεγάλου βάθους ρωγμών στην άνω ελεύθερη επιφάνεια, οι οποίες από τη μία διαφοροποιούν τα γεωμετρικά δεδομένα, αποτέμνουσες το επίπεδο ολίσθησης και από την άλλη γεμίζουν από τα απορέοντα επιφανειακά νερά (Σχήμα 4.5). Στη σφήνα ABCD ενεργούν οι εξής δυνάμεις (Τσότσος 1991):

- Το βάρος της σφήνας W
- Η κάθετη στην κατακόρυφη ρωγμή υδροστατική δύναμη U_1

$$U_1 = \left(\frac{1}{2}\right) \gamma_w Z_1^2, \text{ γενικά } Z_1 \neq Z_c$$

- Η κάθετη στο επίπεδο ολίσθησης δύναμη U_2

$$U_2 = \left(\frac{1}{2}\right) \gamma_w Z_1 X \text{ όπου } X=AB=\frac{H-Z_c}{\cos \theta} \text{ οπότε}$$

$$U_2 = \left(\frac{1}{2}\right) \gamma_w Z_1 \left(\frac{H - Z_c}{\cos \theta}\right)$$

Η συνισταμένη των παράλληλων προς την επιφάνεια ολίσθησης AB συνιστωσών των τριών δυνάμεων F , U_1 , U_2 αποτελεί την κινούσα δύναμη T :

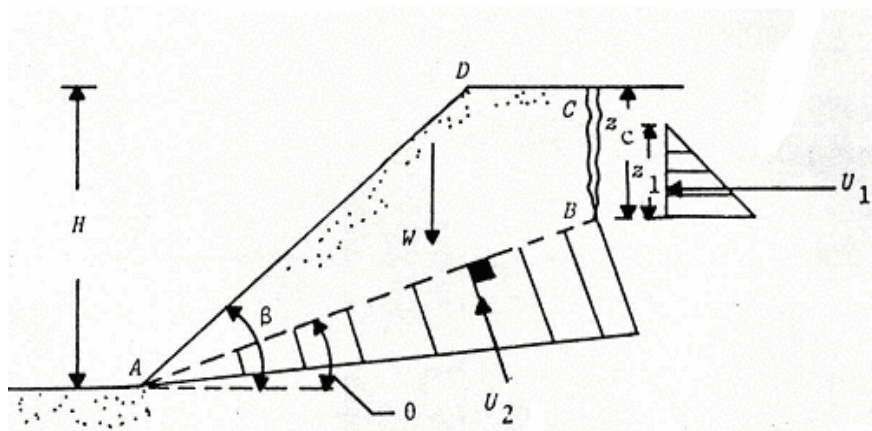
$$T = W \sin \theta + U_1 \cos \theta \quad (4.13)$$

Η μέγιστη αντίσταση, η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος της επιφάνειας AB , S , δίνεται από τη σχέση:

$$S = c X + (W \cos \theta - U_1 \sin \theta - U_2) \tan \phi \quad (4.14)$$

Έτσι σύμφωνα με το γενικό ορισμό του, ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{c \frac{(H - Z_c)}{\cos \theta} + (W \cos \theta - U_1 \sin \theta - U_2) \tan \phi}{(W \sin \theta + U_1 \cos \theta)} \quad (4.15)$$



Σχήμα 4.5 Πρανές περιορισμένου ύψους.
Ανάπτυξη και παρουσία στην επιφάνεια
Βαθιών κατακόρυφων ρωγμών (Τσότσος 1991).

4.2.2 Καμπύλη επιφάνεια ολίσθησης

Κατά την ανάλυση των ολισθήσεων περιστροφικής μορφής απαιτείται, όπως είναι φυσικό, η παραδοχή καμπύλων επιφανειών ολίσθησης ομοίου περίπου σχήματος. Οι

πιο συνηθισμένες μέθοδοι ανάλυσης με κυκλική επιφάνεια αστοχίας είναι η μέθοδος του κύκλου τριβής και οι μέθοδοι των λωρίδων.

Μέθοδος του κύκλου τριβής

Η μέθοδος του κύκλου τριβής, σύμφωνα με τον Taylor (1948) είναι η μόνη εν χρήσει μέθοδος, που δέχεται το κινούμενο τμήμα του εδάφους ως ενιαίο στερεό. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τις ολικές τάσεις και δέχεται ότι η επιφάνεια ολίσθησης είναι κυκλική και το έδαφος είναι ομοιογενές. Η τελική παρουσίαση της μεθόδου κατέληξε στην πρόταση δύο εύχρηστων νομογραφημάτων, που δίνονται στο Σχήμα 4.5. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου με δεδομένες τη γωνία τριβής, ϕ , και τη γωνία του πρανούς, β , υπολογίζεται από τα νομογραφήματα ο παράγοντας ευστάθειας, N_s (Τσότσος, 1991):

$$N_s = \frac{\gamma H_c}{C}$$

ή

(4.16)

$$H_c = \frac{CN_s}{\gamma}$$

Η υπολογιστική πορεία προχωράει με τον υπολογισμό από τη δεύτερη σχέση (4.16) του κρίσιμου ύψους H_c και εφόσον είναι γνωστό το πραγματικό ύψος H , ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας FS από τη σχέση:

$$FS = \frac{H_c}{H}$$
(4.17)

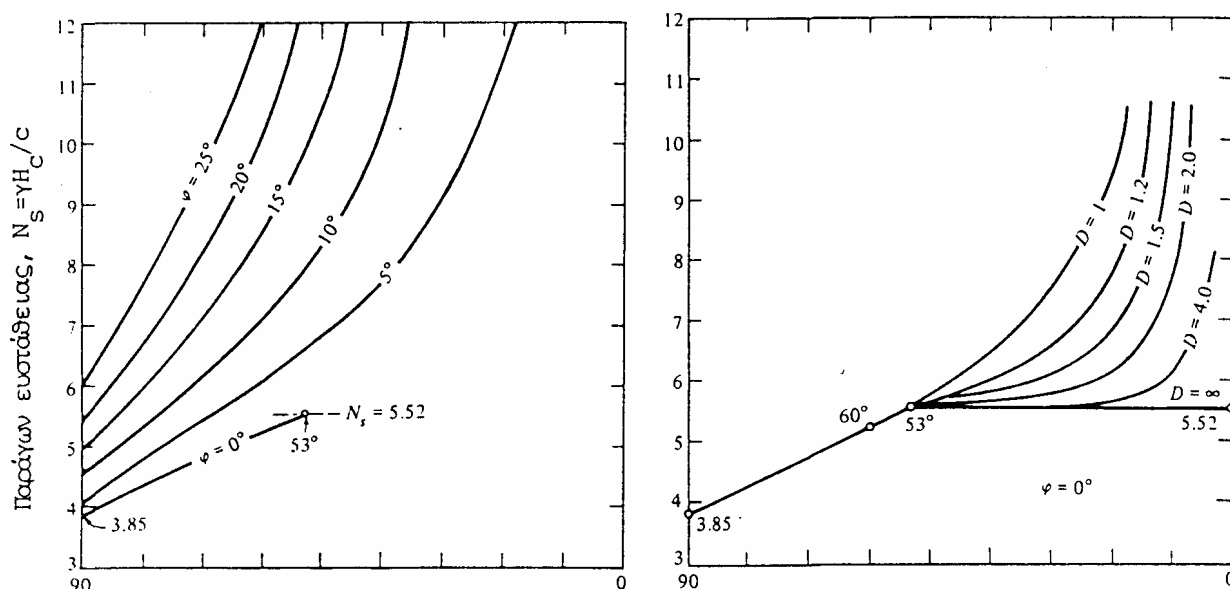
Στις περισσότερες από τις τεχνικές εφαρμογές (επιχώματα κ.α.) είναι δεδομένο το ύψος H , γίνεται αποδεκτή μία τιμή για το συντελεστή ασφαλείας και με την αντίστοιχη υπολογιστική πορεία, καθορίζεται η τιμή της γωνίας β , αν χρησιμοποιηθούν υλικά και τεχνική κατασκευής, που οδηγούν σε δεδομένες τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών ϕ και c .

Συμφωνά με τη μέθοδο, όπως είναι φανερό από τα νομογραφήματα (Σχήμα 4.6), ανάπτυξη βαθέως κύκλου ολίσθησης παρουσιάζεται μόνο όταν η γωνία τριβής θεωρηθεί ίση με μηδέν, ή στην πράξη είναι πολύ μικρή και πλησιάζει το μηδέν, όπως

παρατηρείται κάτω από αστράγγιστες συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, για τον υπολογισμό του N_s , όπως φαίνεται από το δεύτερο νομογράφημα, είναι απαραίτητο να ορισθεί η τιμή του παράγοντα βάθους D ίσου με το λόγο της μέγιστης βύθισης του κύκλου προς το ύψος του πρανούς (Τσότσος, 1991).

Μέθοδοι των λωρίδων

Οι μέθοδοι που βασίζονται στην τεχνική του χωρισμού του πρανούς σε λωρίδες, υπερέχουν της μεθόδου του κύκλου τριβής, γιατί επιτρέπουν να μελετηθεί σχετικά εύκολα η ευστάθεια ανομοιογενών πρανών αποτελούμενων από πολλές εδαφικές στρώσεις, αλλά και γιατί με κατάλληλη προσαρμογή της υπολογιστικής διαδικασίας παρέχουν τη δυνατότητα να εξετασθούν πιο σύνθετες επιφάνειες ολίσθησης (Τσότσος, 1991).



Σχήμα 4.6 Μέθοδος του κύκλου τριβής (Taylor, 1948), (έδαφος ομοιογενές, κυκλική επιφάνεια ολίσθησης). Νομογράμματα υπολογισμού του παράγοντα ευστάθειας N_s : α) Για κύκλο ποδός $\phi > 0$ ή $\phi = 0$ και $\beta \geq 53^\circ$ β) Για βαθύ κύκλο ($\phi = 0$ και $\beta < 53^\circ$) (Τσότσος, 1991).

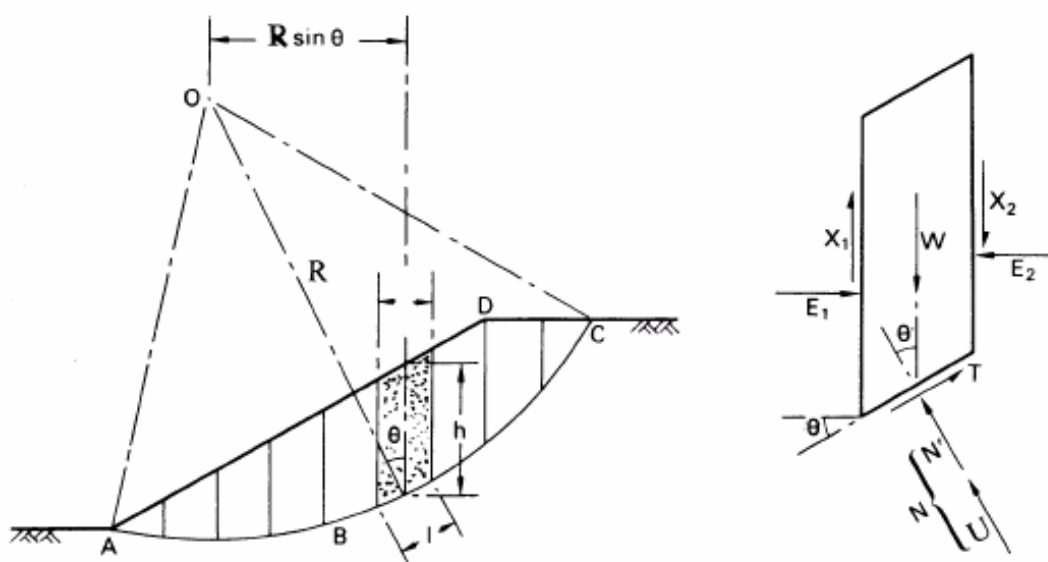
Κατά τις μεθόδους αυτές η εδαφική μάζα χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Το Σχήμα 4.8 παρουσιάζει τις δυνάμεις που δρουν σε μία τυπική λωρίδα (i). Αυτές είναι (Καββαδάς, 2000):

1. Το βάρος (Wi) της λωρίδας και η εξωτερική επιφόρτιση (κατακόρυφη συνιστώσα Pi και οριζόντια συνιστώσα Hi).

2. Οι ορθές πλευρικές δυνάμεις (E_i και E_i') και οι αντίστοιχες διατμητικές (X_i και X_i') που δρουν στις διεπιφάνειες μεταξύ της λωρίδας (i) και των γειτονικών της.
3. Η ορθή ενεργός δύναμη (N_i'), η δύναμη ($Pb_i = u_i l$) που οφείλεται στην πίεση πόρων (u_i) και η διατμητική δύναμη (S_i) στη βάση της λωρίδας.

Οι άγνωστοι του προβλήματος είναι (για n λωρίδες) (Τσότσος, 1991):

1. Οι πλήθους (n) ορθές ενεργές δυνάμεις (N_i) στις βάσεις των λωρίδων.
2. Οι πλήθους (n) διατμητικές δυνάμεις στη βάση κάθε φέτας.

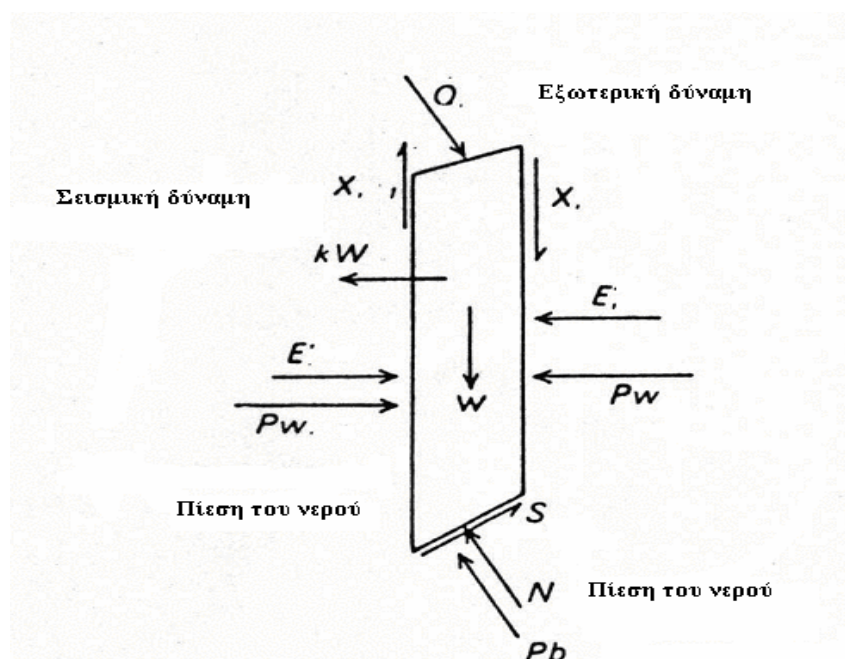


Σχήμα 4.7 Ανάλυση πρανών με την τεχνική του χωρισμού σε λωρίδες (Καββαδάς, 2000).

3. Οι πλήθους (n) θέσεις του άξονα εφαρμογής των ορθών δυνάμεων.
4. Οι πλήθους ($n-1$) πλευρικές διατμητικές δυνάμεις.
5. Οι πλήθους ($n-1$) ορθές πλευρικές δυνάμεις (E_i) στις διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων.

6. Οι πλήθους $(n-1)$ θέσεις του άξονα εφαρμογής των πλευρικών ορθών δυνάμεων.
7. Ο άγνωστος συντελεστής ασφαλείας (FS) .

Για κάθε λωρίδα (i) μπορούν να διατυπωθούν 4 εξισώσεις, δηλαδή οι 3 εξισώσεις ισορροπίας και μία ακόμη εξίσωση μεταξύ των δυνάμεων N_i και S_i και των μηχανικών χαρακτηριστικών ϕ_i , c_i , η οποία προκύπτει με εφαρμογή της σχέσης του Coulomb στη βάση της λωρίδας. Δηλαδή συνολικά στο σύστημα των n λωρίδων προκύπτουν $4n$ εξισώσεις. Όπως εύκολα φαίνεται, το διαμορφωμένο μαθηματικό πια πρόβλημα, έχει λύση μόνο για $n=1$, ενώ για κάθε άλλη μεγαλύτερη τιμή του n , όπως βέβαια είναι επιθυμητό (π.χ. $n=10$ ή 15), είναι αόριστο και δεν έχει αυστηρή και ακριβή λύση.



Σχήμα 4.8 Τυπική εσωτερική λωρίδα, ασκούμενες δυνάμεις (Καββαδάς, 2000).

Υπό την πίεση της ανάγκης να αντιμετωπισθεί το πραγματικό πρόβλημα, έχουν προταθεί από αρκετούς μελετητές, διάφορες μέθοδοι οι οποίες ξεπερνούν το μαθηματικό αδιέξοδο, με απλοποιητικές προσεγγιστικές υποθέσεις.

Στη συνέχεια της ανάπτυξης του θέματος, περιγράφονται αρκετά αναλυτικά μερικές από τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες σχετικές μεθόδους.

Μέθοδος Fellenius

Κατά τη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια ολίσθησης αποτελεί τόξο κύκλου και οι πλευρικές δυνάμεις στις λωρίδες θεωρούνται μηδενικές και αγνοούνται στην πολύ απλουστευμένη υπολογιστική διαδικασία. Έτσι η υπόθεση αυτή μειώνει τον αριθμό των αγνώστων κατά $3n-3$, κυρίως όμως επειδή όλες οι δυνάμεις ενεργούν ή μεταφέρονται στην επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 4.9), ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται άμεσα, χωρίς την ανάγκη επίλυσης συστήματος ή επαναλήψεων (Τσότσος, 1991).

Ως συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ο λόγος της ροπής ως προς το κέντρο του κυκλικού τόξου των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση, προς την κινούσα ροπή (Τσότσος, 1991):

$$FS = \frac{M_{(αντιστ.)}}{M_{(κιν.)}} \quad (4.18)$$

Στη βάση κάθε λωρίδας σύμφωνα με τη σχέση του Coulomb, η αναπτυσσόμενη διατμητική αντοχή R , είναι ίση με το άθροισμα της τριβής, δηλαδή της ενεργού ορθής δύναμης επί την $\tan \phi'$ και της αντοχής που προσφέρει η συνοχή. Η R δίνεται από τη σχέση:

$$R = c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi' \quad (4.19)$$

Όπου l = το μήκος της βάσης της λωρίδας,

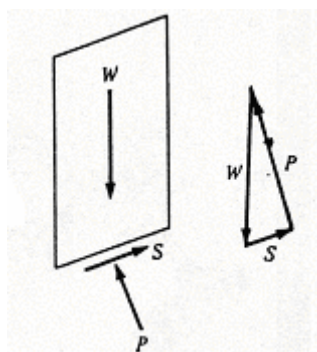
$W \cos \alpha$ = η ολική ορθή δύναμη P , συνιστώσα του βάρους W

u = η μέση πίεση του νερού των πόρων στη βάση της φέτας.

Η αντίστοιχη στη βάση της λωρίδας κινούσα δύναμη, S , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 είναι αντίστοιχα ίση με $W \sin \alpha$.

Επανερχόμενοι στη σχέση (4.18) και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι R και S έχουν διεύθυνση εφαπτόμενη του τόξου και οι δύο ροπές έχουν κοινό βραχίονα ως προς το κέντρο την ακτίνα r , η σχέση (4.18) οδηγείται στην παρακάτω αναλυτική μορφή:

$$F = \frac{\sum R_i}{\sum S_i r} = \frac{\sum R_i}{S_i} = \frac{\sum \{C_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \phi_i\}}{\sum (W_i \sin \alpha_i)} \quad (4.20)$$

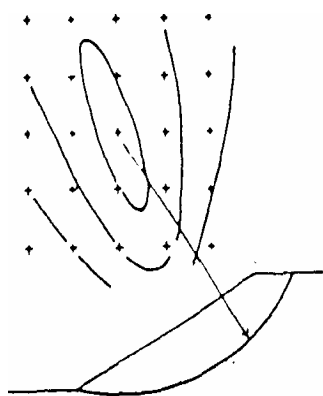


Σχήμα 4.9 Μέθοδος του Fellenius (Τσότσος, 1991).

Δύο παρατηρήσεις, που αξίζει να αναφερθούν και να σχολιασθούν, είναι οι εξής (Τσότσος, 1991):

- Η μέθοδος αγνοεί τις συνθήκες ισορροπίας των δυνάμεων στο γενικό σύστημα.
- Η μέθοδος δεν έχει τεχνική άμεσου και εξαρχής προσδιορισμού του δυσμενέστερου κύκλου. Έτσι ο υπολογιζόμενος με τη σχέση (4.20) συντελεστής ασφαλείας δεν είναι τελικός, καθώς ο κύκλος είναι τυχαίος. Το θέμα αντιμετωπίζεται με τη συστηματική δοκιμή ικανού αριθμού κύκλων και την επισήμανση του δυσμενέστερου και κρίσιμου. Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται σχηματικά η σχετική υπολογιστική τεχνική, η οποία σήμερα γίνεται σε σύντομο χρόνο με χρήση Η/Υ.

Η μέθοδος του Fellenius, υποεκτιμά την τιμή του συντελεστή ασφαλείας, ειδικά όταν ο κύκλος είναι βαθύς ή όταν η πίεση του νερού των πόρων είναι υψηλή. Παρά τούτο, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται ακόμη συχνά, ειδικά όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κάποιου έγκυρου προγράμματος Η/Υ. Τούτο είναι εύλογο, καθώς η ποιότητα της όλης μελέτης εξαρτάται πολύ περισσότερο από το γενικό σχεδιασμό, αλλά και πιο συγκεκριμένα, η ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται κυρίως από τη στρωματογραφία και τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που έγιναν δεκτές (Bromhead, 1986).



Δοκιμάζεται ικανός αριθμός κύκλων ολίσθησης, με κέντρα, τα σημεία του καννάβου και μεταβαλλόμενη ακτίνα. Προσδιορίζονται, οι μέγιστες τιμές του FS. Σχεδιάζονται καμπύλες ίσης τιμής του FS. Προσδιορίζεται το κρίσιμο κέντρο, ο αντίστοιχος κύκλος και η μέγιστη και κρίσιμη τιμή του FS.

Σχήμα 4.10 Σχηματική παρουσίαση της υπολογιστικής τεχνικής που χρησιμοποιείται, για τον προσδιορισμό του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης (Τσότσος, 1991).

Μέθοδος Bishop

Η μέθοδος του Bishop προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα, ως προς το ότι στη γενική μορφή της λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές πλευρικές δυνάμεις, T_1 και E_1 . (Σχήμα 4.11). Αποτέλεσμα της πιο συνθέτης αυτής θεώρησης είναι ότι η υπολογιστική διαδικασία οδηγεί κατά παρόμοιο τρόπο στην σχέση:

$$FS = \frac{\sum \left\{ C' \Delta l \cos \alpha + [(W + Q - u \Delta l \cos \alpha) + (T_1 - T_2)] \tan \phi' \right\} \left[\frac{\cos \alpha + (\tan \phi' \sin \alpha)}{F} \right]^{-1}}{\left[\sum (W + Q) \sin \alpha \right]} \quad (4.21)$$

Η σχέση (4.21), καθώς ο συντελεστής FS περιέχεται και στους δυο όρους της, κι ακόμη είναι άγνωστες εκτός του FS και οι δυνάμεις $T_1 - T_2$, απαιτεί μία περαιτέρω επαναληπτική και έμμεση υπολογιστική διαδικασία. Ο υπολογισμός θεωρείται ότι ολοκληρώνεται, όταν μετά από m επαναλήψεις ικανοποιηθούν οι τρεις συνθήκες (Τσότσος, 1991):

$$F_m - F_{m-1} = 0 \quad \sum (T_1 - T_2) = 0 \quad \sum (E_1 - E_2) = 0 \quad (4.22)$$

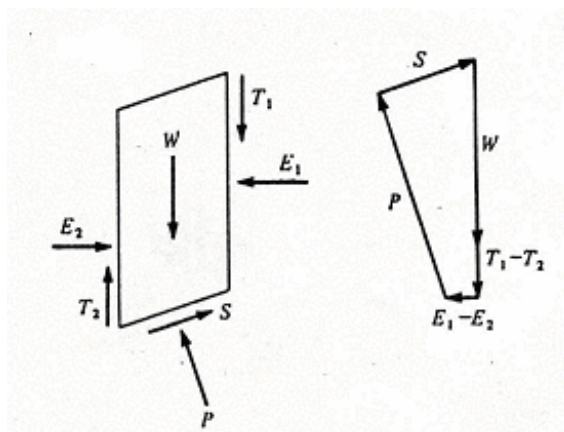
Η υπολογιστική διαδικασία απλοποιείται κατά πολύ, κυρίως γιατί διευκολύνεται η αβέβαιη σύγκλιση της, αν υποθεθεί ότι:

$$(\alpha) \sum (T_1 - T_2) \tan \phi' = 0 \text{ οπότε:}$$

$$FS = \frac{\sum \{c' b + (W + Q - ub)\} \left[\frac{\cos a + (\tan \phi' \sin a)}{F} \right]^{-1}}{\left[\sum (W + Q) \sin a \right]} \quad (4.23)$$

(β) Εάν από τις τρεις συνθήκες (4.22) διατηρηθεί μόνο η πρώτη, η οποία εκφράζει ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίστηκαν στις δύο τελευταίες επαναλήψεις δεν είναι σημαντική.

Η παραλλαγή αυτή της μεθόδου Bishop παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί ενώ είναι πολύ πιο απλή από την πρώτη, συνεπάγεται μικρό πρόσθετο μέσο σφάλμα της τάξεως του 0,01 (Fang, 1975). Γενικά στην πράξη εφαρμόζεται η μέθοδος του Bishop συνήθως με τη μορφή της σχέσης (4.23) ονομαζόμενη απλοποιημένη ή τυπική. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι και στη μέθοδο Bishop γίνεται δεκτή κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ότι όπως και στη μέθοδο Fellenius είναι απαραίτητο να αναζητηθεί και να προσδιορισθεί ο δυσμενέστερος κύκλος ολίσθησης (Τσότσος, 1991).



Σχήμα 4.11 Μέθοδος του Bishop (Τσότσος, 1991).

4.2.3 Μη κυκλικές, επιμήκεις επιφάνειες ολίσθησης

Όταν στην περιοχή της βάσης ενός πρανούς υπάρχει ένα ή περισσότερα στρώματα μικρής αντοχής, τότε η ολίσθηση αναπτύσσεται μέσα σ' αυτά, και το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης απομακρύνεται από το κυκλικό (Σχήμα 4.12). Για τη μελέτη αυτών των περιπτώσεων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, στις οποίες είναι δυνατή η παραδοχή οποιουδήποτε σχήματος για την επιφάνεια ολίσθησης. Η μεγάλη πρόσθετη δυσκολία που παρουσιάζουν αυτές οι μέθοδοι οφείλεται στο ότι διαφοροποιούνται οι τόσο ευνοϊκές συνθήκες που ίσχυαν κατά την εφαρμογή της

συνθήκης ισορροπίας των ροπών, η οποία γίνεται εξαιρετικά σύνθετη. Γι ' αυτό το λόγο οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν συνήθως τις συνθήκες ισορροπίας των δυνάμεων κατά τη διεύθυνση την παράλληλη και την κάθετη προς την επιφάνεια ολίσθησης (Τσότσος, 1991).

Μέθοδος Janbu

Η μέθοδος Janbu μία επαναληπτική υπολογιστική πορεία είναι ανάλογη προς την απλοποιημένη μέθοδο του Bishop. Η σχέση (4.24) είναι η βασική εξίσωση της μεθόδου του Janbu, η οποία ουσιαστικά προκύπτει από την κύρια συνθήκη ισορροπίας δυνάμεων (Janbu, 1973):

$$FS = \frac{\sum \{c' b + (W + Q - ub)\} \left\{ \frac{\sec^2 a}{1 + \frac{\tan a \tan \phi'}{F}} \right\}}{\sum [(W + Q) \sin a]} \quad (4.24)$$

Ως αρχική τιμή του FS , στον πρώτο κύκλο της επαναληπτικής διαδικασίας, προτείνεται τιμή ελαφρά μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει άμεσα και σχετικά εύκολα, με την εφαρμογή της σχέσης (4.20) (Bromhead, 1986).

Μέθοδος Morgenstern & Price

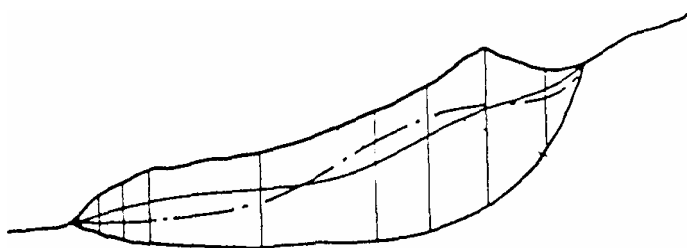
Οι Morgenstern & Price (1965) περιγράφουν μια μέθοδο ανάλυσης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και σε κυκλικές και σε μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Θεώρησαν ότι οι δυνάμεις και οι τάσεις ποικίλουν κατά μήκος τις επιφάνειας ολίσθησης, και επιλύονται κάθετα και παράλληλα στη βάση κάθε λωρίδας, προσδιόρισαν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

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x) \quad (4.25)$$

Όπου $f(x)$ είναι μια συνάρτηση που μεταβάλλεται συνεχώς, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και λ ένας συντελεστής. Για δεδομένη $f(x)$ προκύπτουν τιμές για τα λ και FS , για τις οποίες ικανοποιείται η ισορροπία δυνάμεων αλλά και η ισορροπία ροπών. Οι Morgenstern & Price υποστηρίζουν ότι ο συντελεστής

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

Κατά την μέθοδο αυτή η ολισθαίνουσα μάζα χωρίζεται σε τμήματα, των οποίων η βάση υποτίθεται ευθύγραμμη (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 Μη κυκλικές, επιμήκεις επιφάνειες ολίσθησης.
Μέθοδος των Morgenstern & Price (Τσότσος, 1991).

4.3 Έκφραση της ευσταθείας ενός πρανούς μέσω ενός συντελεστή ασφάλειας

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, ο συντελεστής ασφάλειας ενός εδαφικού πρανούς εκφράζει την πιθανότητα που αυτό έχει να αστοχήσει ή όχι κάτω από μια συγκεκριμένη εντατική κατάσταση. Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας που αναπτύχθηκαν δεν εξετάζουν κανένα άλλο από τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την ευστάθεια, παρά μόνο το συνδυασμό δυνάμεων και τάσεων πάνω σε μια δεδομένη επιφάνεια ολίσθησης. Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας όμως, θα έπρεπε να λαμβάνονται υπόψη και τα παρακάτω (Nash, 1987):

1. Το γεγονός ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους, λόγω ύπαρξης διαφορετικών ενστρώσεων ή ανομοιογένειας, είναι πιθανό να έχει εκτιμηθεί λάθος. Επίσης θα έπρεπε να γίνεται συσχετισμός της αντοχής που μετράται στο εργαστήριο με αυτή που πραγματικά παρουσιάζει το υλικό στο πεδίο.
2. Η αβεβαιότητα όσο αφορά τα φορτία που επιβάλλονται στο πρανές, είτε αν πρόκειται για επιφανειακή φόρτιση, πίεση πόρων, ή ακόμη και το ίδιο το βάρος του υλικού.

3. Το δεδομένο ότι είναι πιθανό η προσομοίωση να μην αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες στο πρανές, δηλαδή ο μηχανισμός αστοχίας του πρανούς να είναι διαφορετικός από αυτόν που θεωρητικά έχει αναγνωριστεί από το μηχανικό.
4. Το ότι θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι είναι επιτρεπτές οι παραμορφώσεις εσωτερικά στη μάζα του πρανούς.

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

Ο De Mello (1977) επισήμανε ότι ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με τη μονάδα, δεν υποδεικνύει απαραίτητα ότι το πρανές θα αστοχήσει. Ο πραγματικός συντελεστής ασφάλειας επηρεάζεται κατά πολύ από λεπτομέρειες στη γεωλογία, χαρακτηριστικά τάσης-παραμόρφωσης του υλικού, την πίεση πόρων, τις αρχικές τάσεις, την προοδευτική αστοχία και μια σειρά από παράγοντες ακόμη. Έτσι, παρόλο που η ανάλυση της ευστάθειας ενός εδαφικού πρανούς γίνεται με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό του συντελεστή ευστάθειας, θα πρέπει η ανάλυση αυτή να περιλαμβάνει μια αναφορά στην πιθανή αβεβαιότητα με την οποία εισήχθησαν κάποιες από τις παραμέτρους (Nash, 1987).

Οι έρευνες επικεντρώνονται πλέον στη διαδικασία σχεδιασμού. Αν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ή ακόμη και η μεταβλητότητα αυτών μπορούν να προσδιοριστούν πλήρως, τότε είναι δυνατή μια λεπτομερής ανάλυση. Αν η μεταβλητότητα των παραμέτρων του υλικού και της πίεσης των πόρων μπορεί να εκφραστεί στατιστικά, το ενδεχόμενο αστοχίας μπορεί να προκύψει με βάση την θεωρία των πιθανοτήτων. Η δυσκολία σε αυτή την προσέγγιση έγκειται στο γεγονός ότι περιοχές αβεβαιότητας απαιτούν μεγάλο αριθμό στατιστικών στοιχείων για την εξασφάλιση αξιόπιστου αποτελέσματος, πράγμα που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί. Οι μεθοδολογίες αυτές, έχουν σαν βάση τους τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, αλλά προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα μιας πιο λογικής προσέγγισης στο σχεδιασμό με σκοπό την ανάλυση της ευστάθειας πρανών, έστω και αν εισήχθησαν καθυστερημένα στον τομέα των γεωτεχνικών (Nash, 1987).

Κλείνοντας το θέμα της ανάλυσης των πρανών, παρατηρείται ότι (Τσότσος, 1991):

- Στις μελετώμενες παλιές κατολισθήσεις, ενεργές ή λανθάνουσες είναι σωστό να χρησιμοποιούνται οι παραμένουσες τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής αντί των μεγίστων. Η διαφοροποίηση αυτή προκαλεί πολύ μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα στις περιπτώσεις υπερστερεοποιημένων αργιλικών πρανών.
- Στα πρανή γίνονται γενικά δεκτές χαμηλές τιμές του συντελεστή ασφαλείας σε σύγκριση με άλλα γεωτεχνικά θέματα. Ο Πίνακας 4.1 δείχνει προτεινόμενες τιμές του συντελεστή ασφάλειας για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.1: Τιμές του συντελεστή ασφάλειας FS (Τσότσος, 1991).

Περιγραφή περίπτωσης	Προτεινόμενη τιμή συντελεστή ασφάλειας
Εκσκαφές, επιχώματα (όχι φράγματα)	1,30-1,40
Χωμάτινα φράγματα	> 1,50
Χωμάτινα φράγματα -Φάση κατασκευής	1,30
-Συνήθεις συνθήκες λειτουργίας	1,50
-Απότομη εκκένωση (ροή προς τα ανάντη)	1,30
Σταθεροποίηση ενεργών κατολισθήσεων (Μετά την κατασκευή του έργου, χαμηλή τιμή π.χ. 1,05-1,20)	< 1,00

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η όρυξη σηράγγων, η εκσκαφή πρανών καθώς και η κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για την κατανόηση των φαινομένων που σχετίζονται με τη δημιουργία των έργων αυτών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, τάσεων, μετατοπίσεων καθώς και ανηγμένων παραμορφώσεων σε φυσικά υλικά κάτω από δεδομένες συνθήκες (Αγιουτάντης, 2002).

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods). Σήμερα, υπάρχει πλήθος μεθόδων για την αριθμητική επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας – πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (π.χ. εδάφη, πετρώματα) (Αγιουτάντης, 2002).

5.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950. Από τότε βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών. Σήμερα αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων σε πολλούς θεωρητικούς ή εφαρμοσμένους επιστημονικούς τομείς.

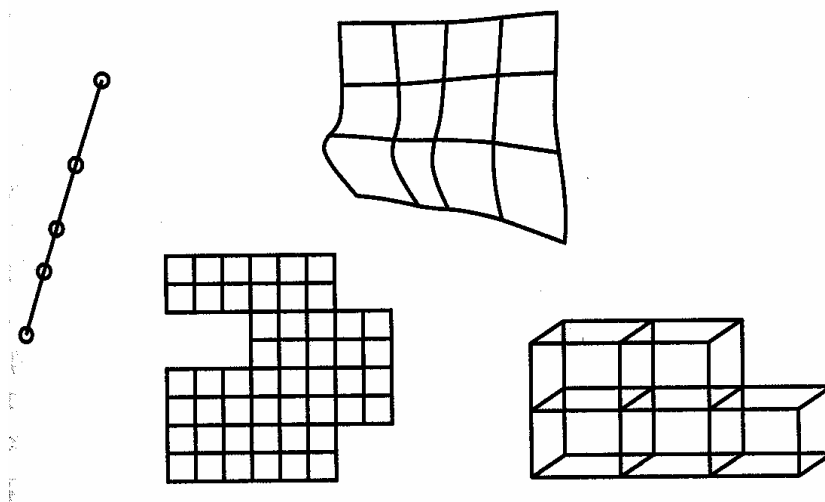
Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες βασίζεται στην ικανότητα των πεπερασμένων στοιχείων να περιγράφουν και να αναλύουν

προβλήματα που είναι εξαιρετικά περίπλοκα και πολλές φορές, αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα. Προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση οι αναλυτές καταφεύγουν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων, μια εκ των οποίων είναι και αυτή των πεπερασμένων στοιχείων.

5.2 Περιγραφή της μεθόδου

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι ιδιαίτερα περίπλοκες. Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος, έστω ένα σώμα του οποίου ζητείται να βρεθεί η κατανομή μιας άγνωστη μεταβλητής όπως για παράδειγμα η μετατόπιση.

Αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών (Σχήμα 5.1) γνωστών ως «στοιχεία» (elements). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται «κόμβοι» (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση (Fagan, 1996).



Σχήμα 5.1 Διακριτοποίηση σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που έχουν επιλεχτεί να περιγράψουν το σώμα, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται ότι επιδρά σε κάθε στοιχείο με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο. Τελικά η κατανομή της άγνωστης μεταβλητής στη μάζα του σώματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά αν αυτό έχει διακριτοποιηθεί σωστά. Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις όπως είναι οι τριγωνομετρικές και οι πολυωνυμικές συναρτήσεις. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται περισσότερο γιατί είναι απλός και εύχρηστος ο μαθηματικός τους χειρισμός και μπορούν να αποδώσουν με αρκετή ακρίβεια τις μετατοπίσεις των κόμβων.

Μετά από τη διαδικασία της διακριτοποίησης, υπολογίζονται οι εξισώσεις ισορροπίας που διέπουν κάθε στοιχείο, με βάση τη μέθοδο των μετατοπίσεων, και σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά όλων των στοιχείων του σώματος και κατά συνέπεια όλο το σώμα. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων έχει τη γενική μορφή:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (5.1)$$

όπου $[K]$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, γνωστός με τον όρο μητρώο ακαμψίας του σώματος, το $\{U\}$ παριστάνει το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων στους κόμβους και το $\{F\}$ περιγράφει τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους.

Η επίλυση της εξίσωσης (5.1) ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων θα αποδώσει τις τιμές των αγνώστων μεταβλητών. Πριν όμως πραγματοποιηθεί η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας και η επίλυση της εξίσωσης, πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Για παράδειγμα σε προβλήματα στατικών υπολογισμών η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών εμποδίζει ένα σώμα να μετατοπίζεται κατά την εφαρμογή δυνάμεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η λύση της εξίσωσης (5.1) δεν είναι μια απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για να περιγράψουν το μεγάλο αριθμό κόμβων. Δεν είναι υπερβολή να αναφερθεί ότι κάποια προβλήματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται πάνω από 50.000 εξισώσεις. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας δεν είναι εύκολη διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών μεθόδων έχει γίνει εφικτή η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε ικανοποιητικά χρονικά όρια (Fagan, 1996).

Από τη στιγμή που θα λυθεί η εξίσωση (5.1), και θα βρεθούν οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε κόμβο, είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και στη συνέχεια των τάσεων στα στοιχεία. Από αυτές γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων σε όλο το σώμα.

5.3 Διάρθρωση της μεθόδου

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάποιο λογισμικό πακέτο αποτελείται από τρία στάδια (Spyrakos, 1996):

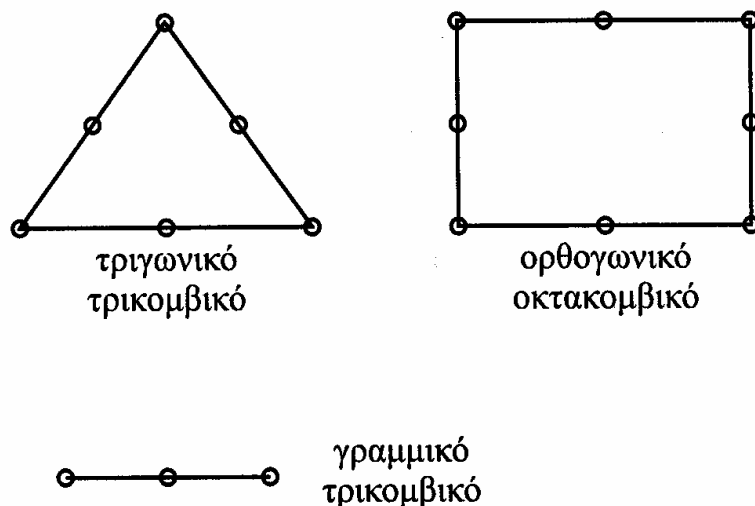
- ✓ Την προεπεξεργασία η οποία αποτελεί το βασικότερο μέρος ορισμού από το χρήστη των παραμέτρων της ανάλυσης. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Εισάγονται οι εξισώσεις που διέπουν τους κόμβους, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Τέλος εισάγονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και οι συνοριακές συνθήκες.
- ✓ Την επεξεργασία που αποτελεί το καθαρά μαθηματικό μέρος της μεθόδου και κατά κύριο λόγο εκτελείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του λογισμικού. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όλο το μοντέλο που πρόκειται να αναλυθεί. Από τις εξισώσεις αυτές δημιουργείται το μητρώο ακαμψίας και τα διανύσματα όλου του μοντέλου. Σε αυτά εισάγονται και οι συνοριακές συνθήκες που επιδρούν στο μοντέλο. Στο τελευταίο μέρος αυτού του σταδίου πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και η εύρεση των αγνώστων μεταβλητών στους κόμβους.
- ✓ Την μετα-επεξεργασία όπου λαμβάνει χώρα η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να παρασταθούν στο μοντέλο οι τάσεις και οι παραμορφώσεις. Συνήθως αυτές, εκτός από τις αριθμητικές τους τιμές μπορούν να παρασταθούν και γραφικά ώστε να είναι καλύτερα κατανοητές από τον μελετητή.

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια λεπτομερέστερη παρουσίαση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

5.4 Διαίρεση του πεδίου

5.4.1 Είδη στοιχείων

Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση, ή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με καμπύλα ή ευθύγραμμα τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους του πλέγματος ή καννάβου διακριτοποίησης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.2 Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και

προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ (Σχήμα 5.2) (Αγιουτάντης, 2002).

5.4.2 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου

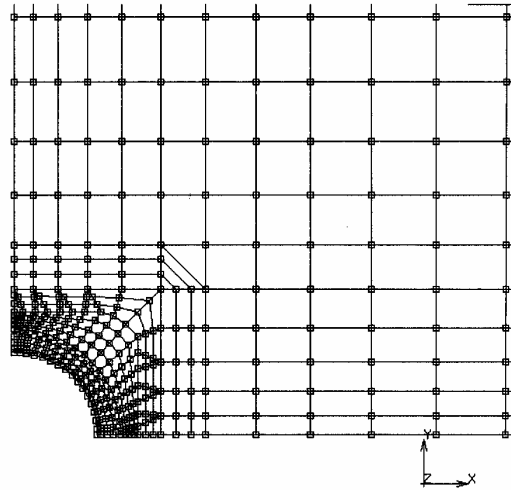
Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- ✓ Την επιλογή του αριθμού κόμβων 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 (Αγιουτάντης, 2002).

Για παράδειγμα, στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις, συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι κόμβοι σε ένα στοιχείο και να χρησιμοποιηθούν τετραπλευρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους (Αγιουτάντης, 2002).

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η μεταβαλλόμενη διακριτοποίηση του μέσου, στην περίπτωση προσομοίωσης κυκλικού ανοίγματος (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.3 Μεταβαλλόμενη γεωμετρία στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

5.5 Συναρτήσεις μορφής

Οι συναρτήσεις μορφής εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους. Οι συναρτήσεις μορφής μπορούν να παρομοιαστούν με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του. Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη γραμμικές.

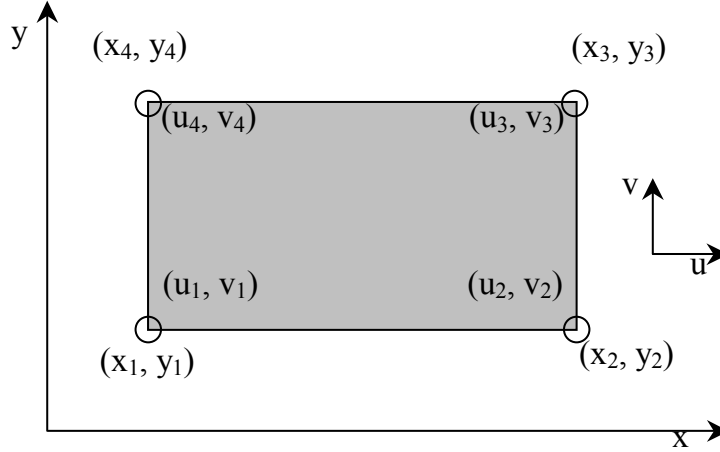
Στη γενική περίπτωση, η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των γενικευμένων συντεταγμένων (δηλαδή συντεταγμένων των κόμβων και τιμών στους κόμβους) (Σχήμα 5.4). Στην σχέση (5.2) εκφράζεται η μετατόπιση για ένα στοιχείο με τέσσερις κόμβους (Αγιουτάντης, 2002):

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (5.2)$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{u\} = [\Phi]\{\alpha\} \quad (5.3)$$

Τα $a_1 \dots a_4$ περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1,2,3,4. Αντικαθιστώντας στην σχέση (5.2) τα διανύσματα u , x και y με τις επιμέρους συνιστώσες τους (σημεία 1,2,3 και 4) προκύπτει:

$$\begin{aligned}
u_1 &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 + a_4 x_1 y_1 \\
u_2 &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 + a_4 x_2 y_2 \\
u_3 &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 + a_4 x_3 y_3 \\
u_4 &= a_1 + a_2 x_4 + a_3 y_4 + a_4 x_4 y_4
\end{aligned} \tag{5.4}$$



Σχήμα 5.4 Ενδεικτικές συντεταγμένες κόμβων και άγνωστες μεταβλητές δισδιάστατου στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002).

και επομένως:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3 y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4 y_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{q\} = [A]\{a\} \tag{5.5}$$

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

$$\{u\} = [\Phi]\{a\} \Rightarrow \{u\} = [\Phi][A]^{-1}\{q\} \Rightarrow \{u\} = [N]\{q\} \tag{5.6}$$

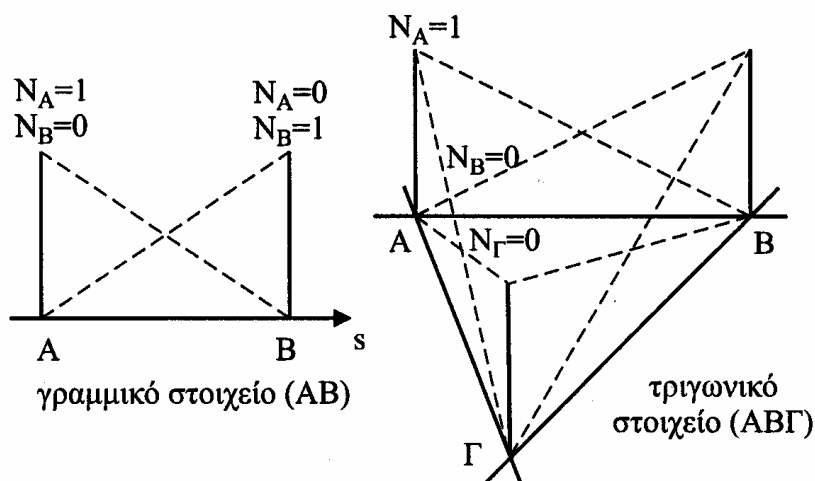
όπου $[N] = [\Phi][A]^{-1}$, δηλαδή

$$u = \sum_{i=1}^4 u_i N_i \tag{5.7}$$

που είναι μια έκφραση της μετατόπισης για ένα στοιχείο ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους (Αγιουτάντης, 2002).

Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι οι συναρτήσεις μορφής είναι οι συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων στη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Κατ' αρχάς αναφέρονται στις άγνωστες ποσότητες στους κόμβους αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε ποσότητα η οποία απαιτείται να μεταβληθεί στο εσωτερικό κάθε στοιχείου. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τυπικές γραμμικές συναρτήσεις μορφής. Ο υπολογισμός ή επιλογή των συναρτήσεων μορφής, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- ✓ Εμπειρικά (με επισκόπηση, με δοκιμή και λάθος κλπ.)
- ✓ Επίλυση αριθμητικών συστημάτων της μορφής που φαίνονται στη σχέση (5.6)



Σχήμα 5.5 Γραμμικές συναρτήσεις μορφής (Αγιουτάντης, 2002).

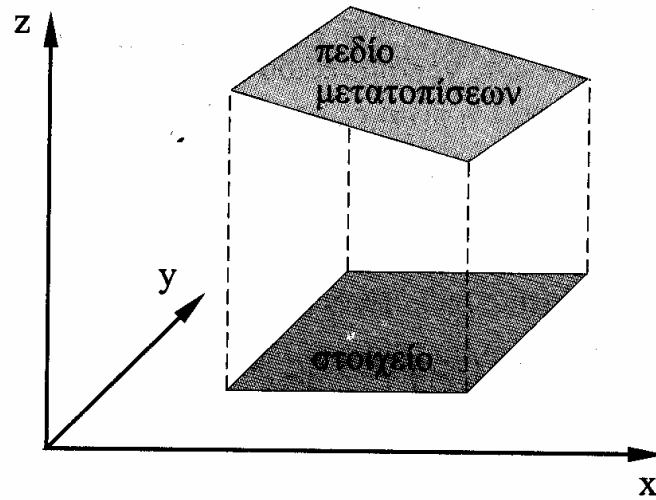
Η εξίσωση (5.8) δίνει τη βασική συνάρτηση μορφής όσον αφορά στις μετατοπίσεις στοιχείων:

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (5.8)$$

όπου u =η μετατόπιση σε τυχαίο σημείο ενός στοιχείου, N_i =η συνάρτηση μορφής, και u_i =οι τιμές της μετατόπισης σε κάθε κόμβο.

Η σχέση αυτή πρέπει να ισχύει για όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Επίσης, από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις συναρτήσεις μορφής, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο. Η κάθε συνάρτηση μορφής έχει την

ιδιαιτερότητα να μεγιστοποιείται στον κόμβο στον οποίο αντιστοιχεί και να μηδενίζεται στους υπόλοιπους (Σχήμα 5.5). Η χρήση των συναρτήσεων μορφής εξασφαλίζει την ομαλή μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε ένα στοιχείο (Σχήμα 5.6) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.6 Γραμμική μεταβολή μετατοπίσεων σε τετραπλευρικό στοιχείο (Αγιουτάντης, 2002).

Όπως φάνηκε από την παραπάνω ανάλυση, οι απλούστερες συναρτήσεις είναι οι πολυωνυμικές. Στην περίπτωση των γραμμικών συναρτήσεων, οι συναρτήσεις μορφής είναι δυνατόν να δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} & \text{όπου} & \quad y_{i-1} \leq y \leq y_i \\ N_i &= \frac{y_{i+1} - y}{y_{i+1} - y_i} & \text{όπου} & \quad y_i \leq y \leq y_{i+1} \end{aligned} \quad (5.9)$$

και στην περίπτωση των συναρτήσεων δευτέρου βαθμού (3 κόμβων) να είναι της μορφής:

$$N_i = \frac{(y - y_{i+1})(y - y_{i+2})}{(y_i - y_{i+1})(y_i - y_{i+2})} \quad (5.10)$$

5.6 Επίλυση σε επίπεδο στοιχείου

Μια από τις κυριότερες εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η ανάλυση προβλημάτων εντατικού πεδίου. Η μέθοδος μπορεί εύκολα να αντιμετωπίσει την εφαρμογή αρκετών μορφών φόρτισης. Μερικές από αυτές είναι συγκεντρωμένες δυνάμεις, κατανεμημένες πιέσεις, εσωτερικές δυνάμεις σώματος (βαρυτικές) κλπ.

Όπως συμβαίνει σε όλες τις αναλύσεις ελαστικότητας έτσι και στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται η αρχή της υπέρθεσης (superposition). Με την αρχή αυτή γίνεται εφικτή η ανάλυση οποιουδήποτε συνδυασμού εφαρμοσμένων φορτίων και την παράστασή τους τελικά σε μετατοπίσεις κόμβων. Από τις μετατοπίσεις αυτές υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και στη συνέχεια οι τάσεις.

Στη συνέχεια συνοψίζονται οι ενέργειες που έχουν γίνει για τη σύνδεση αιτίου – αποτελέσματος για δισδιάστατα στοιχεία, ενώ παρόμοιες είναι οι ενέργειες για την περίπτωση των τρισδιάστατων στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους $\{u_i\}$, από τη σχέση (5.8).
- ✓ Η παραμόρφωση σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \quad (5.11)$$

- ✓ Οι καταστατικές εξισώσεις συμπεριφοράς που παρίστανται από σχέσεις της μορφής:

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

το οποίο μπορεί να γραφεί υπό μορφή πινάκων ως εξής:

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

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

Η δυναμική ενέργεια κάθε στοιχείου προκύπτει σαν άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας, καθώς και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο στοιχείο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Δυναμική ενέργεια} = \text{Εσωτερική ενέργεια} - \text{Έργο δυνάμεων}$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις ανήκουν σε τρεις κατηγορίες:

- ✓ Δυνάμεις πεδίου (π.χ. βαρυτικές)
- ✓ Τάσεις (π.χ. υδροστατική)
- ✓ Σημειακές δυνάμεις

Επομένως, η δυναμική ενέργεια ενός στοιχείου μπορεί να εκφραστεί από μια σχέση της μορφής:

$$\begin{aligned}\Pi_p &= \iiint \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dx dy dz - \iiint \{F\} dx dy dz - \iint \{T\} dx dy - \sum_i F_i u_i \Rightarrow \\ \Pi_p &= \int_V \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dV - \int_V \{F\} dV - \int_A \{T\} dS - \sum_i F_i u_i\end{aligned}\quad (5.14)$$

όπου ο πρώτος όρος περιγράφει τη δυναμική ενέργεια, ο δεύτερος το έργο λόγω δυνάμεων πεδίου, ο τρίτος το έργο λόγω τάσεων ή κατανεμημένων δυνάμεων που ασκούνται σε ακμές ή επιφάνειες, και ο τελευταίος όρος περιγράφει το έργο λόγω κομβικών δυνάμεων (Αγιουτάντης, 2002).

Η ελαχιστοποίηση της δυναμικής ενέργειας που υποδηλώνει ισορροπία προκύπτει από το διαφορικό της (5.14), ή καλύτερα:

$$\delta \Pi_p = 0 \Rightarrow \frac{\partial \Pi_p}{\partial \{q\}} = 0 \quad (5.15)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις τελικά προκύπτει ότι:

$$U = \frac{1}{2} \{q\}^T [K] \{q\} \quad (5.16)$$

όπου:

$$K = h \iint_A [B]^T [C] [B] dx dy \quad (5.17)$$

και: $\{q\}$ = το διάνυσμα των μετατοπίσεων στους κόμβους

$[K]$ = ο πίνακας ακαμψίας του κάθε στοιχείου

h = το πάχος του στοιχείου

A = η επιφάνεια του στοιχείου

$[B]$ = ο πίνακας συσχετισμού που εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του υλικού.

Η εφαρμογή της σχέσης (5.15) απαιτεί τη διαφορίση της δυναμικής ενέργειας Π_p ως προς κάθε συνιστώσα του διανύσματος $\{q\}$. Εφαρμόζοντας την παραπάνω λογική για μια από τις n αυτές εξισώσεις και για τον όρο U προκύπτει (Αγιουτάντης, 2002):

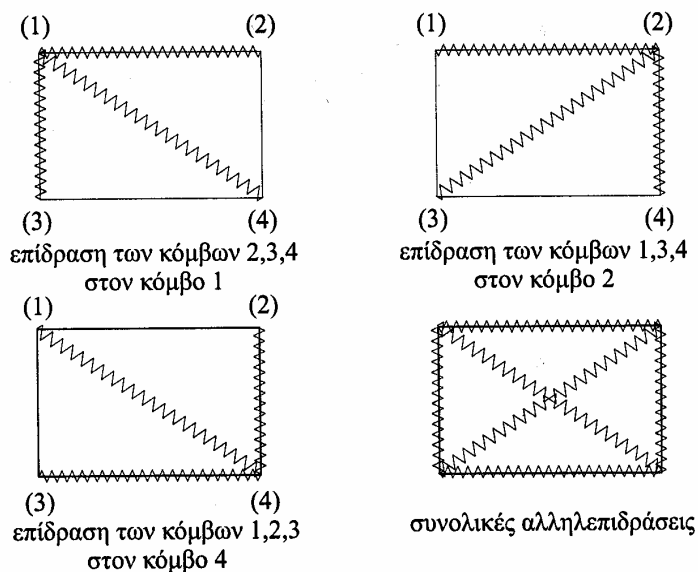
$$\frac{\partial U}{\partial q_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial U}{\partial q_1} = 2q_1 K_{11} + \dots + 2q_n K_{n1} = 0 \quad (5.18)$$

με την παρατήρηση ότι $K_{ij} = K_{ji}$.

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία για όλους τους βαθμούς ελευθερίας, που ουσιαστικά αποτελείτο κριτήριο της ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας κάθε στοιχείου (χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σώματος σε ισορροπία), προκύπτει η ακόλουθη σχέση η οποία συνδέει τη δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος και τη μετατόπιση $\{q\}$ που υφίσταται, δηλαδή το αίτιο και το αποτέλεσμα:

$$\{F\} = [K]\{q\} \quad (5.19)$$

Η φυσική σημασία του μητρώου $[K]$ δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 5.7, όπου οι συντελεστές του μητρώου K_{ij} αποτελούν ισοδύναμες σταθερές ιδεατών ελατηρίων τα οποία συνδέουν τους κόμβους (βαθμούς ελευθερίας) μεταξύ τους (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.7 Φυσική σημασία μητρώου ακαμψίας τετραπλευρικού στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002).

5.7 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες

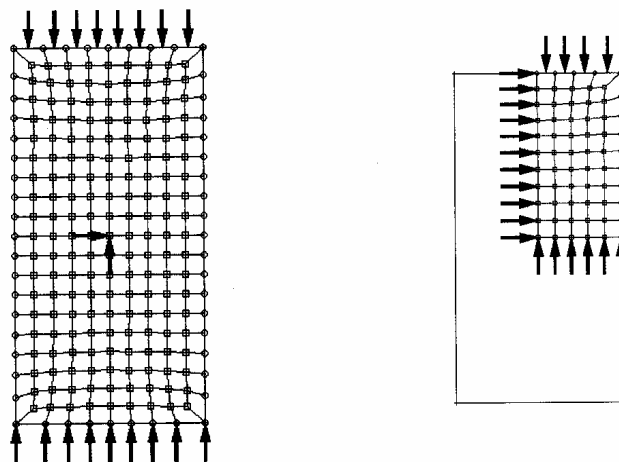
Μετά την δημιουργία των καταστατικών εξισώσεων για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να ενσωματωθούν και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Πρέπει δηλαδή να εφαρμοστούν περιοριστικές δυνάμεις ώστε να κρατούν το μοντέλο σε ισορροπία.

Η φόρτιση των υλικών ή αντίστοιχα η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου (π.χ. βαρυτικές)
- ✓ Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις)
- ✓ Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις)
- ✓ Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

Όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν κατάλληλα σε κομβικές, οι οποίες συμμετέχουν στην επίλυση κάθε προβλήματος. Στο Σχήμα 5.8 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται κατά την προσομοίωση φόρτισης

κυλινδρικού δοκιμίου σε δύο διαστάσεις, όπου με την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, μπορεί να αξιοποιηθεί η συμμετρία του ορθογωνικού μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.8 Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- ✓ Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές και ως συνθήκες Neumann.
- ✓ Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.

Στην περίπτωση των προβλημάτων ελαστικότητας, οι γεωμετρικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής (Αγιουτάντης, 2002):

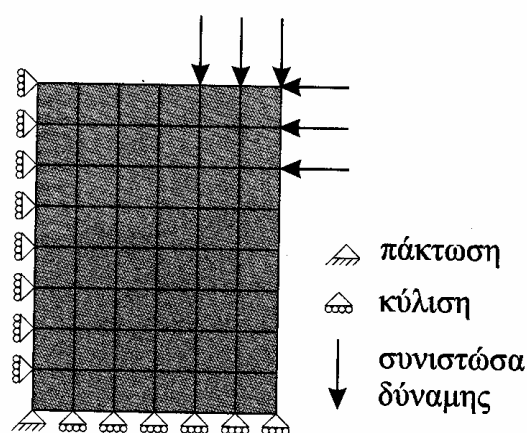
$$\begin{aligned} u_x &= u_0 \\ u_y &= v_0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

όπου u_x και u_y οι μετατοπίσεις στους κόμβους και u_0 , v_0 οι αντίστοιχες συνιστώσες μετατοπίσεων που επιβάλλονται στον κόμβο. Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} f_x &= f_0 \\ f_y &= w_0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

όπου f_x και f_y οι κομβικές δυνάμεις και f_o , w_o οι αντίστοιχες συνιστώσες δυνάμεων που επιβάλλονται στον κόμβο.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ο τυπικός συμβολισμός των συνοριακών συνθηκών στις περιπτώσεις προβλημάτων φορτίσεων - παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης.



Σχήμα 5.9 Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002).

5.8 Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών (Αγιουτάντης, 2002).

Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο (παρόλο που το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών) σε μια, ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad (5.22)$$

όπου: σ_{ij} = ο τανυστής των τάσεων που υποδεικνύει την εντατική κατάσταση στο σώμα,

E = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού,

ν = ο λόγος Poisson του υλικού,

ε_{ij} = ο τανυστής των παραμορφώσεων,

ε_{kk} = το άθροισμα των κυρίων παραμορφώσεων,

δ_{ij} = ο μοναδιαίος τανυστής (δέλτα του Kronecker).

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.23)$$

όπου: σ = η τάση που επιβάλλεται στο υλικό,

E = το μέτρο ελαστικότητάς του,

ε = η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται.

Επιπλέον αυτών, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν άλλα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς, όπως μοντέλα μη ισοτροπικής (ορθοτροπικής ή ανισοτροπικής) ελαστικής συμπεριφοράς, καθώς και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης, καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή μεν, αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατόν να οριστούν διαφορετικά μοντέλα υλικού σε διάφορα σημεία του σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

5.9 Κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών

Λόγω της φόρτισης ενός υλικού, υπάρχει περίπτωση, να επέλθει αστοχία αυτού, οπότε μαζί με την καταστατική συμπεριφορά του, πρέπει να οριστεί και το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας ή διαρροής του υλικού (Αγιουτάντης, 2002).

Τα κριτήρια (μοντέλα) αστοχίας των υλικών, είναι δυνατόν να επιδράσουν με δύο τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Είτε να θεωρήσουν ότι ένα στοιχείο αστοχεί, όταν η εντατική κατάσταση που δέχεται το υλικό υπερβαίνει το όριο αντοχής του και επομένως να εμποδίσει το στοιχείο αυτό να δεχτεί μια ανώτερη εντατική κατάσταση,

- ✓ Είτε να τροποποιήσουν (μειώσουν κατάλληλα) τις ελαστικές (ή πλαστικές) σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιάσουν την αστοχία, με την θεώρηση ότι το υλικό αστόχησε στην παραπάνω εντατική κατάσταση.

Κατά την προσομοίωση, 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.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά για πετρώματα και εδαφικά υλικά είναι το κριτήριο των Mohr – Coulomb, ενώ εφαρμογή έχουν και τα κριτήρια των Tresca, Von Misses, Drucker – Prager, κλπ. Σημειώνεται ότι συχνά χρησιμοποιούνται μοντέλα πλαστικής συμπεριφοράς για τα σημεία του υλικού σε δύο ή τρεις διαστάσεις, για τα οποία αναμένεται ολίσθηση ή αστοχία, όπως για παράδειγμα κατά μήκος ενός επιπέδου ή μιας επιφάνειας αστοχίας ενός πρανού (Αγιουτάντης, 2002).

5.9.1 Κριτήριο Mohr – Coulomb

Αν σε ένα σημείο (κάποιου επιπέδου) στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους η διατμητική τάση γίνει ίση με τη διατμητική αντοχή αυτού, στο σημείο αυτό θα επέλθει αστοχία. Η διατμητική αντοχή (τ) ενός εδάφους σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο και επίπεδο, εκφράστηκε αρχικά από τον Coulomb σαν γραμμική εξίσωση της ορθής τάσης (σ) στο επίπεδο και στο δεδομένο σημείο (Craig, 1997):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5.24)$$

όπου c και ϕ είναι οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα). Σύμφωνα με την θεμελιώδη αρχή του Terzaghi που θεωρεί ότι η διατμητική τάση του εδάφους οφείλεται στα στερεά σωματίδια που αποτελούν τον εδαφικό σκελετό, η διατμητική αντοχή εκφράζεται ως συνάρτηση της ενεργής τάσης:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5.25)$$

όπου c' και ϕ' είναι οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής στην περίπτωση των ενεργών τάσεων. Έτσι, η αστοχία θα εμφανιστεί σε οποιοδήποτε σημείο αναπτυχθεί ένας κρίσιμος συνδυασμός της διατμητικής και της ενεργής τάσης (Craig, 1997).

Το κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb, λόγω κυρίως της απλότητάς του, χρησιμοποιείται ευρύτατα παρόλο που δεν είναι το μόνο πιθανό κριτήριο αστοχίας για εδάφη. Ο φάκελος αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζει μια ελαφρά καμπυλότητα, αλλά στο εύρος των τάσεων που ενδιαφέρουν μπορεί να γίνει προσέγγιση της καμπύλης με ευθεία γραμμή, και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής να προσδιοριστούν γι' αυτό το εύρος (Craig, 1997).

5.9.2 Κριτήριο Tresca

Στο κριτήριο αυτό, η αστοχία εμφανίζεται όταν η μέγιστη διατμητική τάση σε ένα σημείο ενός υλικού λάβει μια κρίσιμη τιμή k . Εκφράζοντας τα παραπάνω με βάση τις κύριες τάσεις, η τιμή του k είναι ίση με το ήμισυ της μέγιστης απόλυτης τιμής της διαφοράς μεταξύ των κυρίων τάσεων, όταν αυτές λαμβάνονται κατά ζεύγη (Chen and Han, 1988). Δηλαδή:

$$k = \text{Max} \left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right) \quad (5.26)$$

όπου η σταθερά k του υλικού μπορεί να προσδιοριστεί από μια απλή δοκιμή εφελκυσμού. Έτσι,

$$k = \frac{\sigma_o}{2} \quad (5.27)$$

όπου σ_o είναι η μέγιστη αντοχή στην απλή δοκιμή εφελκυσμού.

5.9.3 Κριτήριο von Mises

Παρόλο που το κριτήριο της μέγιστης διατμητικής τάσης (κριτήριο Tresca) είναι απλό, δεν είναι αντιπροσωπευτικό για οποιαδήποτε επιρροή της ενδιάμεσης κύριας τάσης στο υλικό. Η οκταεδρική διατμητική τάση ή η ενέργεια παραμόρφωσης είναι μια εναλλακτική επιλογή «κλειδί» έναντι της μέγιστης διατμητικής τάσης, όσον αφορά την αστοχία υλικών. Το κριτήριο αστοχίας του Von Mises, που χρονολογείται από το 1913, αποτελεί αυτή την εναλλακτική και θεωρεί ότι η αστοχία σε ένα υλικό

ξεκινά όταν η οκταεδρική διατμητική τάση αγγίζει μια κρίσιμη τιμή k . Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση (Chen and Han, 1988):

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}}k \quad (5.28)$$

ή αλλιώς, συναρτήσει των κυρίων τάσεων είναι:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (5.29)$$

όπου k είναι η τάση αστοχίας σε διάτμηση.

5.9.4 Κριτήριο Drucker – Prager

Το κριτήριο των Mohr – Coulomb θεωρείται γενίκευση του κριτηρίου του Tresca λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της υδροστατικής πίεσης. Το κριτήριο Drucker – Prager, που χρονολογείται από το 1952, είναι μια απλή τροποποίηση του κριτηρίου von Mises, όπου η επίδραση της υδροστατικής πίεσης στην αστοχία προκύπτει από προσθήκη ενός επιπλέον όρου στην έκφραση αυτού. Στο μεσημβρινό επίπεδο το κριτήριο των Drucker – Prager δίνεται από τη σχέση (Chen and Han, 1988):

$$f(\xi, \rho) = \sqrt{6}\alpha\xi + \rho - \sqrt{2}k = 0 \quad (5.30)$$

όπου α , k σταθερές του υλικού. Όταν η παράμετρος α μηδενιστεί, η σχέση (5.30) μετατρέπεται στο κριτήριο von Mises.

5.10 Ευστάθεια πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Οι συμβατικές μέθοδοι της ανάλυσης της ευστάθειας πρανών που βασίζονται στη θεωρία της οριακής ισορροπίας, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στο παρελθόν λόγω της απλότητας και της εφαρμοστικότητάς τους. Δεν λαμβάνουν όμως υπόψη τους τον τρόπο σχηματισμού του πρανούς (αν δηλαδή πρόκειται για φυσικό πρανές, πρανές που προέκυψε ύστερα από εκσκαφή ή επιχωμάτωση κλπ.), ούτε και την αρχική εντατική κατάσταση στο πεδίο πριν την εκσκαφή ή επιχωμάτωση (Kim and Lee, 1997).

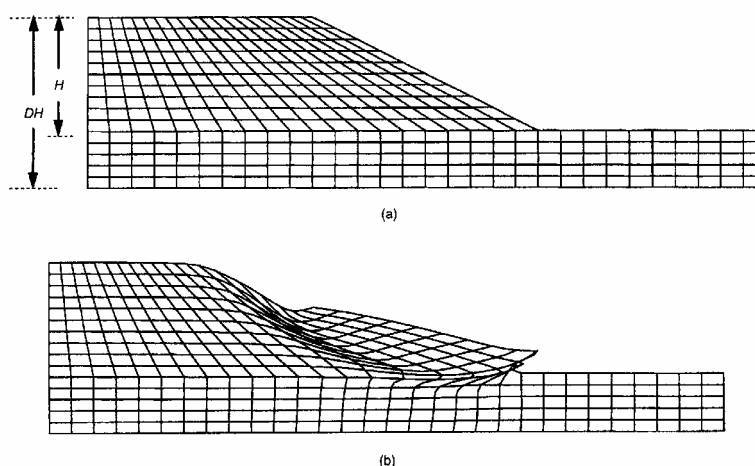
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων από την άλλη, έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της παραμόρφωσης και της κατανομής των τάσεων σε ένα υλικό. Σε

αντίθεση με τις απλουστευμένες μεθόδους, η προσέγγιση με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αντιμετωπίσει σύνθετες ακολουθίες φόρτισης υλικών καθώς και την ανάπτυξη μη ελαστικών ζωνών σε αυτά συναρτήσει του χρόνου. Τέτοια προβλήματα είναι τα προβλήματα ευστάθειας πρανών, για τα οποία δεν έχουν γίνει πολλές προσπάθειες επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Kim and Lee, 1997).

Αναφέρονται παρακάτω κάποιες εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσπάθεια ανεύρεσης κρίσιμων επιφανειών σε πρανή και εκτίμησης του αντίστοιχου συντελεστή ασφάλειας αυτών. Μέσα από αυτές τις αναφορές γίνεται και μια σύγκριση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έναντι των συμβατικών μεθόδων, όσον αφορά την ανάλυση της ευστάθειας πρανών.

5.10.1 Ανάλυση ευστάθειας ομογενούς πρανού

Οι Griffiths και Lane (1999), πραγματοποίησαν μια ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ενός ομογενούς εδαφικού πρανού. Στο Σχήμα 5.10, απεικονίζεται το πρανές αυτό, ενώ φαίνεται ο κάνναβος των στοιχείων που προέκυψε από τη διακριτοποίησή του. Είναι εμφανές ότι ο τύπος παραμόρφωσης του πρανού ακολουθεί το μηχανισμό της αστοχίας στη βάση αυτού.



Σχήμα 5.10 Ομογενές πρανές κλίσης. (α) αρχικός κάνναβος (β) παραμορφωμένος κάνναβος (Griffiths και Lane, 1999).

Το παράδειγμα αυτό επιδεικνύει ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έναντι των συμβατικών μεθόδων, όσον αφορά την ανάλυση της ευστάθειας πρανών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν απαιτεί την εκ

των προτέρων θεώρηση της θέσης και του σχήματος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Η αστοχία εμφανίζεται «φυσικά» μέσα στις ζώνες της εδαφικής μάζας στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι ανεπαρκής να αντισταθεί στη διατμητική τάση που εφαρμόζεται σε αυτό (Griffiths and Lane, 1999).

5.10.2 Ανάλυση ευστάθειας αργιλικού πρανούς που εδράζεται σε ασθενές εδαφικό στρώμα

Στην περίπτωση αυτή, οι Griffiths και Lane χρησιμοποίησαν την ίδια γεωμετρία με την παραπάνω περίπτωση, αλλά μια διαφορετικού τύπου ανομοιογένεια.

Η διατμητική αντοχή του υλικού του πρανούς διατηρήθηκε σταθερά στην τιμή $\frac{c_{u1}}{\gamma H} = 0.25$, ενώ η διατμητική αντοχή του υλικού έδρασης του πρανούς μεταβλήθηκε, παίρνοντας διάφορες τιμές. Η σχετική τιμή των δύο διατμητικών αντοχών εκφράζεται με την αναλογία $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$.

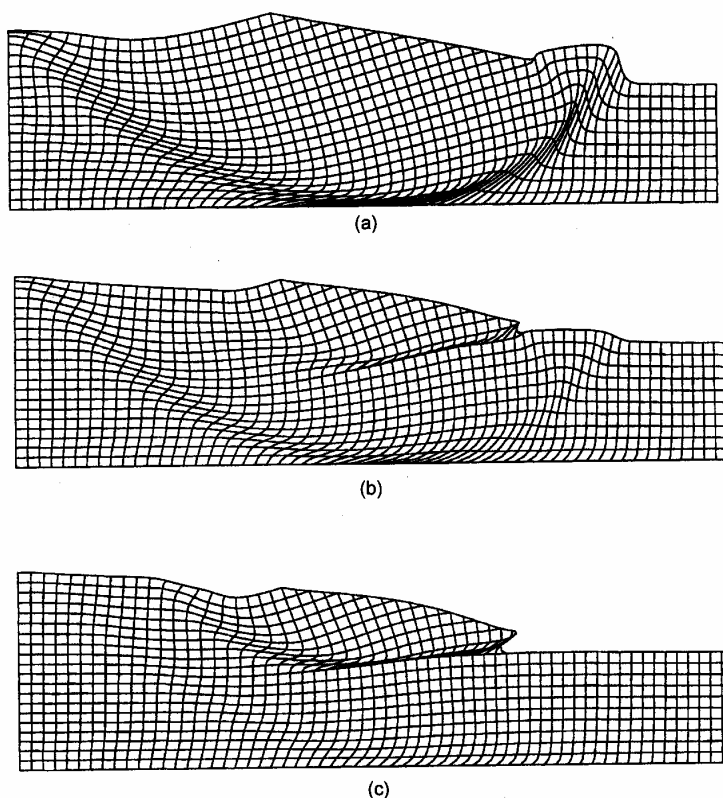
Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζονται οι παραμορφωμένοι κάρναβοι για τρεις διαφορετικές αναλογίες $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$ όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων

στοιχείων. Όταν $c_{u1} \gg c_{u2}$ (Σχήμα 5.11(a)), παρατηρείται ένας μηχανισμός αστοχίας σε μεγάλο βάθος, ενώ στην περίπτωση που $c_{u1} \ll c_{u2}$ (Σχήμα 5.11(c)), η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται σε μικρό βάθος και διέρχεται από το πόδι του πρανούς. Η λύση που αντιστοιχεί στην αναλογία $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} \approx 1,5$ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11(b), και

υποδεικνύει μια κατάσταση στην οποία και οι δύο μηχανισμοί εμφανίζονται ταυτόχρονα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το υποκείμενο εδαφικό στρώμα πρέπει να έχει αντοχή περίπου 50% πιο υψηλή από το υπερκείμενο για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αστοχίας στο πόδι του πρανούς (Griffiths and Lane, 1999).

Τα προηγούμενα παραδείγματα έδειξαν ότι ακόμη και σε αρκετά απλές καταστάσεις, μπορεί να εμφανιστούν σύνθετοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης στο εσωτερικό ανομοιογενών πρανών, οι οποίοι μπορούν να εντοπιστούν με προσέγγιση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για ακόμη πιο σύνθετα προβλήματα που

αφορούν περισσότερες ομάδες εδαφικών υλικών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί εύλογα τη μόνη λογική μέθοδο επίλυσης, η οποία θα αποδώσει τον συντελεστή ασφάλειας εντοπίζοντας τη θέση και τη γεωμετρία (σχήμα) της επιφάνειας ολίσθησης (Griffiths and Lane, 1999).



Σχήμα 5.11 Παραμορφωμένοι κάρναβοι του πρανούς που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές αναλογίες αντοχής των εδαφικών υλικών: (a) $c_{u2}/c_{u1}=0,6$, (b) $c_{u2}/c_{u1}=1,5$ και (c) $c_{u2}/c_{u1}=2,0$ (Griffiths and Lane, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PLAXIS

Το Plaxis¹ είναι ένα πακέτο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται συγκεκριμένα για την ανάλυση της παραμόρφωσης και της ευστάθειας στα γεωτεχνικά προβλήματα. Οι γεωτεχνικές εφαρμογές απαιτούν προηγμένα μοντέλα για την προσομοίωση της μη γραμμικής και χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς των εδαφών. Επιπλέον, δεδομένου ότι το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό απαιτούνται ειδικές διαδικασίες για να εξεταστούν οι υδροστατικές και μη υδροστατικές πιέσεις πόρων. Αν και η διαμόρφωση του ίδιου του εδάφους είναι ένα σημαντικό ζήτημα, πολλά γεωτεχνικά προβλήματα περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση των κατασκευαστικών δομών και την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δομών και του εδάφους. Το Plaxis είναι εξοπλισμένο με ειδικά χαρακτηριστικά στοιχεία για να εξετάσει τις πολυάριθμες πτυχές των σύνθετων γεωτεχνικών δομών.

Το Plaxis αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα:

1. Εισαγωγή δεδομένων (Input)
2. Υπολογισμοί (Calculations)
3. Αποτελέσματα (Output)
4. Σχεδιασμός καμπύλων (Curves)

¹ Σημειώνεται ότι το κεφάλαιο αυτό βασίζεται στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού πακέτου Plaxis καθώς επίσης και στη Μεταπτυχιακή Διατριβή της κ. Καλογήρου Ειρήνης με τίτλο «Παραμετρική Ανάλυση Ευστάθειας Εδαφικών Πιρανών με τη Χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων».

6.1 Εισαγωγή δεδομένων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το Plaxis, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και να ορίσει τις ιδιότητες υλικών και τις συνοριακές συνθήκες. Αυτό γίνεται στο πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input). Για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα δισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο που αποτελείται από τα σημεία και τις γραμμές που σχηματίζουν κλειστά γεωμετρικά σχήματα. Αρχικά εισάγονται ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες στο γεωμετρικό μοντέλο ενώ η δημιουργία ενός κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε ένα επίπεδο στοιχείων εκτελούνται αυτόματα από το Plaxis βασισμένα στην εισαγωγή του μοντέλου γεωμετρίας. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη για τις ανάγκες του προβλήματος διακριτοποίηση, οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Το τελικό μέρος της εισαγωγής δεδομένων περιλαμβάνει το σχεδιασμό του υδροφόρου και την δημιουργία των πιέσεων πόρων και των αρχικών τάσεων έτσι ώστε να δημιουργηθεί το αρχικό στάδιο.

6.1.1 Πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων



Το πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων περιέχει όλες τις επιλογές για να δημιουργηθεί και να τροποποιηθεί ένα γεωμετρικό μοντέλο, να δημιουργηθεί ένα αντίστοιχο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και τις αρχικές συνθήκες

Στην έναρξη του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων εμφανίζεται ένα παράθυρο (Σχήμα 6.1) στο οποίο πρέπει να γίνει μια επιλογή μεταξύ ενός υπάρχοντος σχεδίου ή της δημιουργίας ενός νέου. Κατ' επιλογή του νέου προγράμματος εμφανίζεται το παράθυρο των γενικών ρυθμίσεων στο οποίο τοποθετούνται οι βασικές παράμετροι του νέου σχεδίου.

6.1.2 Γενικές ρυθμίσεις

Το παράθυρο των γενικών ρυθμίσεων (Σχήμα 6.2) εμφανίζεται στην έναρξη του νέου προβλήματος και μπορεί αργότερα να επιλεγεί από το μενού Αρχείο (File). Το παράθυρο αυτό περιέχει το όνομα του έργου, την περιγραφή του, το είδος του

μοντέλου και το είδος των στοιχείων. Το υποπαράθυρο των διαστάσεων περιέχει τις βασικές μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου, τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης και την πυκνότητα του καννάβου.

Τύπος μοντέλου:

Το Plaxis Version 7.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναλύσεις επίπεδων ανηγμένων παραμορφώσεων και αξονοσυμμετρικών παραμορφώσεων.

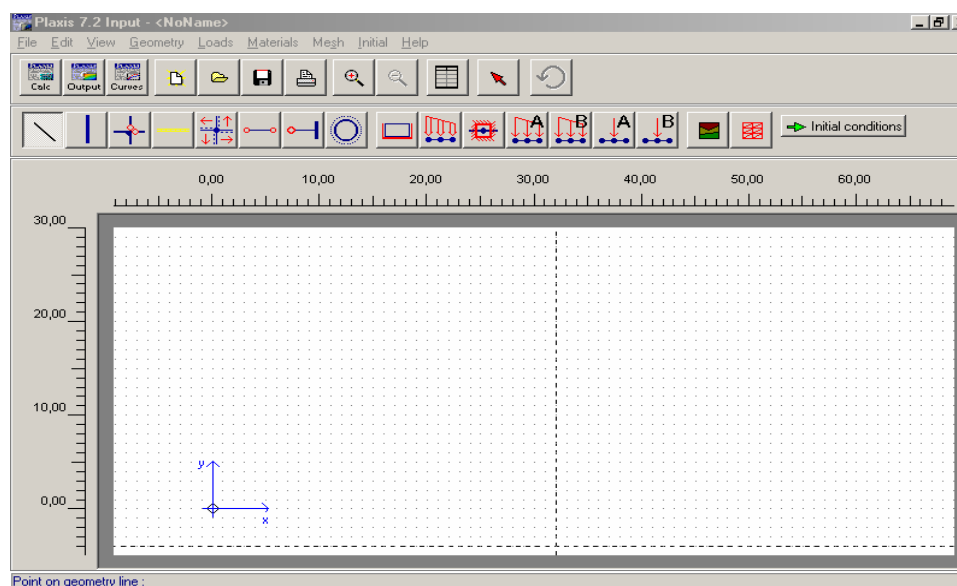
- ✓ **Επίπεδης ανηγμένης παραμόρφωσης:** Στην περίπτωση που η τρίτη διάσταση (z) του σώματος δεν είναι μικρή, σε σύγκριση με τις άλλες δύο (x, y) και τα φορτία που δέχεται το σώμα είναι πάνω στο επίπεδο (x, y), τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων (u) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση ($u_z = 0$ και επομένως $\varepsilon_z = 0$).
- ✓ **Αξονοσυμμετρικό μοντέλο:** Ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο (Axisymmetric model) χρησιμοποιείται για τις γεωμετρίες που περιέχουν κυκλικές διατομές με ομοιόμορφη ακτίνα γύρω από τον κεντρικό άξονα. Οι παραμορφώσεις και οι τάσεις θεωρούνται ίδιες σε οποιαδήποτε ακτίνα γύρω από τον κεντρικό άξονα.

Στοιχεία:

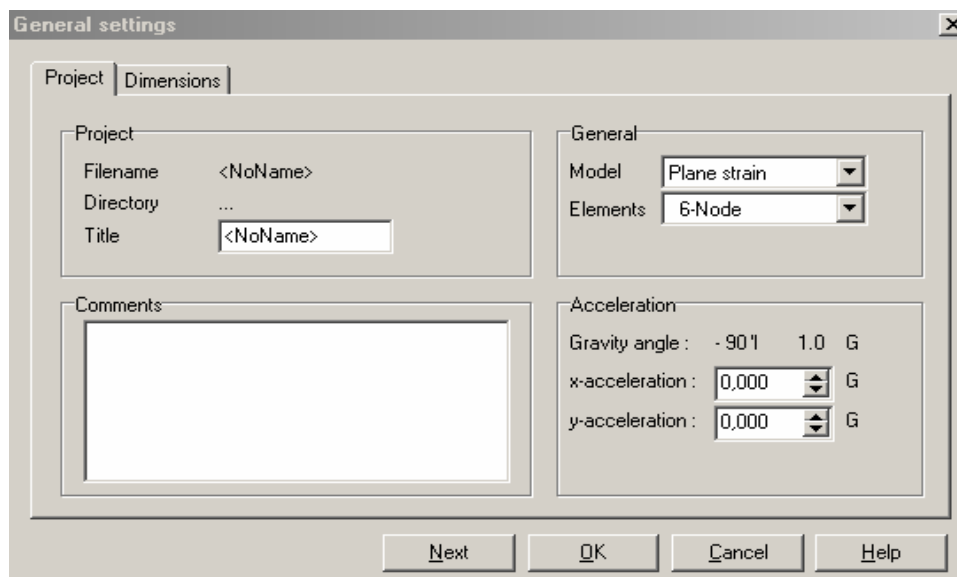
Για μια δισδιάστατη ανάλυση (επίπεδη ανηγμένη παραμόρφωση ή αξονοσυμμετρική) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει είτε 6-κομβικά ή τα 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία (Σχήμα 6.3).

6.1.3 Γεωμετρία προσομοιώματος

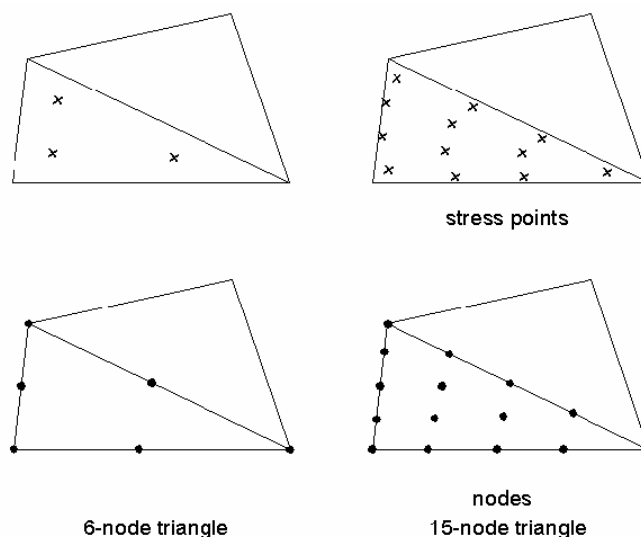
Η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων αρχίζει με τη δημιουργία ενός γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο απεικονίζει το πρόβλημα που εξετάζεται. Ένα γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Τα σημεία και οι γραμμές εισάγονται από το χρήστη, ενώ οι επιφάνειες προκύπτουν σαν κλειστά γεωμετρικά σχήματα στο πρόγραμμα. Εκτός από αυτά τα βασικά συστατικά, μπορούν να οριστούν στο γεωμετρικό μοντέλο κατασκευαστικές δομές ή ειδικές συνθήκες.



Σχήμα 6.1 Κύριο παράθυρο προγράμματος εισαγωγής δεδομένων (Plaxis Manual, 1998).



Σχήμα 6.2 Παράθυρο γενικών ρυθμίσεων (Plaxis Manual, 1998).



Σχήμα 6.3 Δισδιάστατη αξονοσυμμετρική ανάλυση (Plaxis Manual, 1998).

Συστήνεται η δημιουργία ενός γεωμετρικού μοντέλου να ξεκινά με το σχεδιασμό του πλήρους περιγράμματος της γεωμετρίας. Έπειτα, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα στρώματα των υλικών, τις κατασκευαστικές δομές, τα όρια των φάσεων κατασκευής, τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες. Το γεωμετρικό μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο την αρχική κατάσταση, αλλά και τα ενδεχόμενα διαδοχικά στάδια κατασκευής που εξετάζονται σε μεταγενέστερες φάσεις. Αφότου έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, ο χρήστης θέτει τις παραμέτρους των υλικών και ορίζει τα αντίστοιχα τμήματα γεωμετρίας στα οποία αυτές εφαρμόζονται. Όταν πλέον έχει καθοριστεί η πλήρης γεωμετρία και όλα τα γεωμετρικά τμήματα έχουν τις ιδιότητές τους, το γεωμετρικό πρότυπο είναι πλήρες και μπορεί να δημιουργηθεί το πλέγμα.



Σημεία και γραμμές:

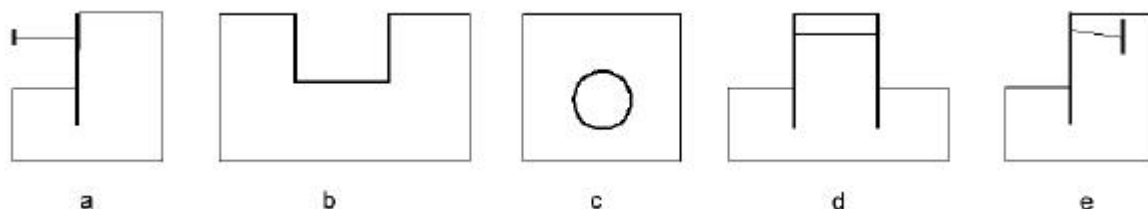
Το βασικό στοιχείο για την δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου είναι η γεωμετρική γραμμή (Geometry line). Έτσι ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει με αυτήν την επιλογή σημεία και γραμμές, άρα και το μοντέλο το οποίο επιθυμεί.



Πάσσαλοι:

Οι πάσσαλοι (Beams) χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό των τοίχων αντιστήριξης, των εσωτερικών επενδύσεων των σηράγγων και άλλων δομών. Η συμπεριφορά

αυτών των στοιχείων καθορίζεται με τη χρήση της ακαμψίας, της κανονικής δυσκαμψίας και της μέγιστης ροπής στρέψης. Οι πάσσалоι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις διεπιφάνειες για την ανάλυση μιας μεγάλης σειράς γεωτεχνικών προβλημάτων (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4 Παραδείγματα χρήσης πασσάλων και αγκυρίων (*Plaxis Manual, 1998*).



Άρθρώσεις πασσάλων:

Μια άρθρωση πασσάλων (Beam hinge) είναι μια σύνδεση πασσάλων που επιτρέπει μια ασυνεχή περιστροφή γύρω από το σημείο της σύνδεσης (άρθρωση). Όταν στο μοντέλο που εξετάζεται οι άκρες των πασσάλων μπορούν να περιστραφούν ελεύθερα εισάγονται οι αρθρώσεις πασσάλων για να δημιουργήσουν τις ενώσεις.



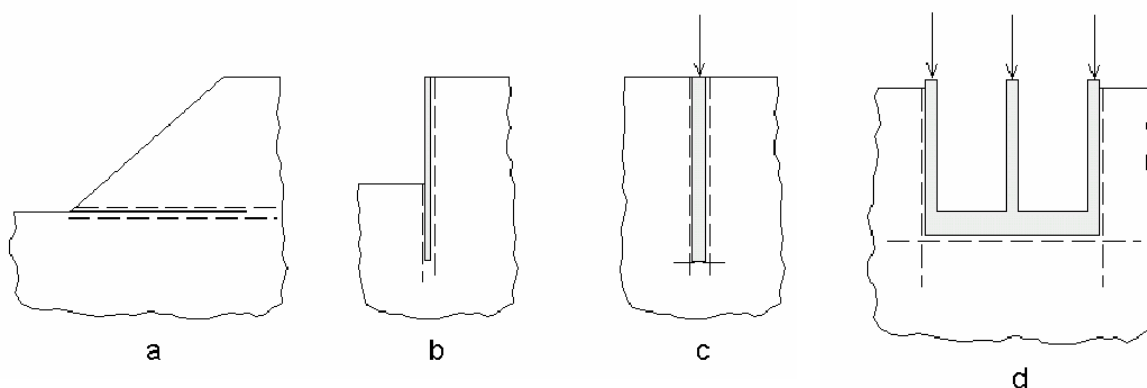
Διεπιφάνειες:

Τα στοιχεία διεπιφανειών (Interfaces) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και κάποιας κατασκευαστικής δομής. Παραδείγματα γεωτεχνικών δομών φαίνονται στο Σχήμα 6.5. Αυτά τα στοιχεία είναι μηδενικού πάχους. Οι παράμετροι αντοχής των διεπιφανειών εξαρτώνται άμεσα από αυτές του εδαφικού στρώματος του οποίου σχετίζονται. Όλες οι παράμετροι αντοχής των εδαφών πολλαπλασιάζονται με έναν παράγοντα μείωσης της αντοχής R_{inter} , όπως προκύπτει και από τις σχέσεις:

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad (6.1)$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \tan \phi_{soil} \leq \tan \phi_{soil} \quad (6.2)$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ για } R_{inter} < 1 \text{ αλλιώς } \psi_i = \psi_{soil} \quad (6.3)$$



Σχήμα 6.5 Στοιχεία διεπιφάνειας (Plaxis Manual, 1998).



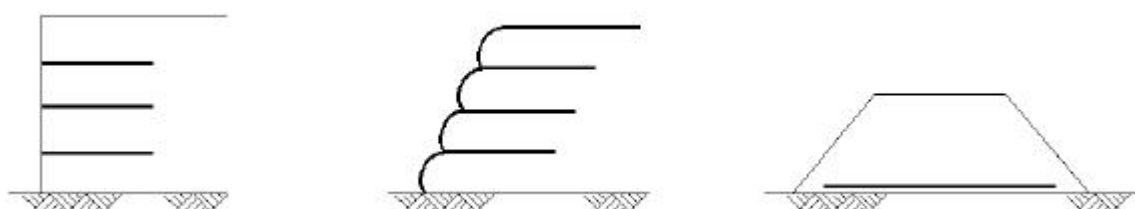
Αγκύρια:

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των αγκυρίων (Anchors) και των δοκών θεωρούνται ελαστοπλαστικά. Η συμπεριφορά αυτών των στοιχείων καθορίζεται χρησιμοποιώντας το αξονικό μέτρο ακαμψίας του και την μέγιστη δύναμη η οποία μπορεί να του επιβληθεί. Επίσης υπάρχει μια ειδική επιλογή για τις αναλύσεις των προεντεταμένων (επίγειων) αγκυρίων και των υποστηρίξεων ανασκαφής.



Γεωφάσματα:

Συχνά χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ενίσχυση αναχωμάτων ή για την αντιστήριξη των εδαφολογικών δομών. Σχεδιάζονται σαν γραμμές και αντέχουν στον εφελκυσμό και όχι στην θλίψη. Συχνά τα στοιχεία αυτά συνδυάζονται με τις διεπιφάνειες για να δημιουργηθεί η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος.



Σχήμα 6.6 Χρήσεις γεωφασμάτων (Plaxis Manual, 1998).

**Σήραγγες:**

Στο Plaxis υπάρχει μια επιλογή για τη δημιουργία κυκλικών και μη σηράγγων. Οι πάσσαλοι και οι διεπαφές μπορούν να προστεθούν για να διαμορφώσουν την επένδυση σηράγγων και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος. Τέλος εφαρμόζονται διαφορετικές πρακτικές μέθοδοι για την ανάλυση των παραμορφώσεων που εμφανίζονται λόγω της κατασκευής της σήραγγας.

6.1.4 Φορτία και συνοριακές συνθήκες

Το υπο-μενού των φορτίων περιέχει τις επιλογές έτσι ώστε να εισαχθούν τα κατανεμημένα φορτία, οι σημειακές δυνάμεις και οι προκαθορισμένες μετατοπίσεις στο γεωμετρικό μοντέλο.

Κυλίσεις και πακτώσεις:

Οι κυλίσεις και πακτώσεις (Fixities), όπου οι πακτώσεις είναι συνδυασμός κυλίσεων, είναι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις ίσες με μηδέν. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν στις γεωμετρικές γραμμές καθώς επίσης και στα γεωμετρικά σημεία στις κατευθύνσεις x και y.

**Προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις:**

Οι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις είναι ειδικές συνθήκες που μπορούν να επιβληθούν στις γεωμετρικές γραμμές για να ελέγξουν τις μετατοπίσεις αυτών των γραμμών.

**Τυποποιημένες συνοριακές συνθήκες:**

Υπάρχει μια κατάλληλη επιλογή για να εφαρμοστούν οι συνοριακές συνθήκες που ισχύουν στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτές οι συνοριακές συνθήκες παράγονται σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες:

- ✓ Το κατακόρυφο δεξί και αριστερό όριο του μοντέλου σχεδιάζονται με κύλιση ως προς τον y-άξονα ($u_x=0$).

- ✓ Το κάτω οριζόντιο όριο σχεδιάζεται με πάκτωση ($u_x=u_y=0$) στο μοντέλο.
- ✓ Οι πάσσαλοι που επεκτείνονται στο όριο του γεωμετρικού μοντέλου λαμβάνουν μια σταθερή περιστροφή στο σημείο αυτό ($\varphi_z=0$).

Φορτία:

Δύο ανεξάρτητα συστήματα φόρτισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των σημειακών δυνάμεων και ελκτικών φορτίων.



Σημειακές Δυνάμεις:

Οι σημειακές δυνάμεις (Point forces) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε γεωμετρικό σημείο. Οι μονάδες των σημειακών δυνάμεων είναι δύναμη ανά μήκος (π.χ. kN/m).



Φορτία επιφάνειας:

Τα φορτία επιφάνειας (Traction) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε γεωμετρική γραμμή, όχι μόνο σε αυτές του περιγράμματος της γεωμετρίας. Οι μονάδες στις οποίες δίνονται είναι δύναμη ανά επιφάνεια (π.χ. kN/m²).

6.1.5 Ιδιότητες υλικών

Στο Plaxis οι ιδιότητες των εδαφών και των κατασκευαστικών δομών εισάγονται στα ειδικά παράθυρα (Σχήμα 6.7). Υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι υλικών:

1. Εδαφικά υλικά
2. Διεπιφάνειες
3. Πάσσαλοι
4. Γεωφάσματα
5. Αγκύρια.

Όλα τα στοιχεία για τα ανωτέρω σύνολα υλικών αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων. Από τη βάση δεδομένων μπορούν να ορίζονται τα στοιχεία του γεωμετρικού μοντέλου στα οποία εφαρμόζονται οι συγκεκριμένες ιδιότητες.



Βάση δεδομένων υλικών:

Οι ιδιότητες των υλικών για το έδαφος, καθώς επίσης και για τα δομικά στοιχεία εισάγονται σε μια βάση δεδομένων. Τα σύνολα των υλικών στοιχείων μπορούν να αντιγραφούν από τη βάση δεδομένων του μοντέλου στη σφαιρική βάση δεδομένων έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν και σε άλλα προβλήματα.

Σχήμα 6.7 Παράθυρο ιδιοτήτων εδαφικών υλικών και διεπιφανειών (Plaxis Manual, 1998).

Μοντέλα υλικών

Το Plaxis υποστηρίζει διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους και των άλλων στοιχείων του μοντέλου. Μια σύντομη παρουσίαση των διαθέσιμων μοντέλων δίνεται στη συνέχεια:

Μοντέλο Mohr-Coulomb:

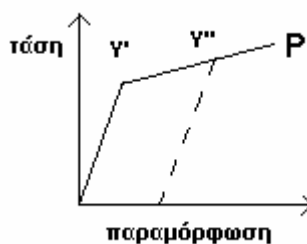
Αυτό το απλό μη γραμμικό μοντέλο είναι βασισμένο στις εδαφολογικές παραμέτρους που απαντώνται στις περισσότερες καταστάσεις στην πράξη. Παρ' όλα αυτά σε αυτό το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνονται όλα τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της συμπεριφοράς του εδάφους. Το μοντέλο Mohr-Coulomb μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει φορτία κυκλικών θεμελίων, μικρών πασσάλων, κ.λ.π. Χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας των εδαφικών πρανών με τη διαδικασία διαδοχικής μείωσης των ϕ και c των υλικών όπως θα περιγραφεί στην συνέχεια.

Προηγμένα εδαφικά μοντέλα:

Το Plaxis προσφέρει μια ποικιλία επιπλέον μοντέλων εδαφικής συμπεριφοράς εκτός από το μοντέλο Mohr-Coulomb:

➤ Μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Hardening soil model)

Αυτός είναι ένας τύπος ελαστοπλαστικού υπερβολικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς άμμων, αμμοχάλικων και υπερστερεοποιημένων αργίλων (Σχήμα 6.8).

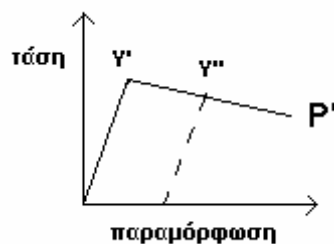


Σχήμα 6.8 Μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Craig, 1997).

➤ Μοντέλο μαλακού εδάφους (Soft soil model)

Αυτός ο τύπος μοντέλου χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μαλακών εδαφών όπως είναι οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι και η τύρφη (Σχήμα 6.9). Το μοντέλο

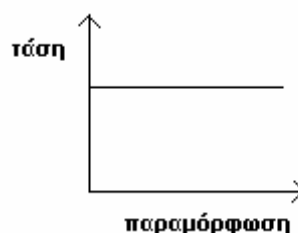
εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε καταστάσεις πρωτεύουσας συμπίεσης.



Σχήμα 6.9 Μοντέλο μαλακού εδάφους (Craig, 1997).

➤ Μοντέλο ερπυσμού μαλακών εδαφών (Soft soil creep model)

Το μοντέλο αυτό είναι βισκοπλαστικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μαλακών εδαφών σε συνάρτηση με το χρόνο (Σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10 Μοντέλο ερπυσμού μαλακών εδαφών.

Τύπος υλικού

Ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος

Το ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry} και γ_{wet}) αναφέρεται στο συνολικό βάρος συγκεκριμένου όγκου των εδαφών συμπεριλαμβάνοντας το υλικό μέσα στους πόρους. Το ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry}) χρησιμοποιείται για όλα τα υλικά που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο υδροφόρου ορίζοντα και το υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{wet}) για εκείνα που βρίσκονται κάτω από αυτό. Οι μονάδες τους είναι μάζα ανά όγκος.

Διαπερατότητες

Οι διαπερατότητες (k_x και k_y) έχουν την έννοια της ταχύτητας (μήκος ανά χρόνο). Η εισαγωγή των παραμέτρων διαπερατότητας απαιτείται μόνο για αναλύσεις στερεοποίησης και υπολογισμούς υπόγειας ροής υδάτων.

Μέτρο ελαστικότητας

Το Plaxis χρησιμοποιεί το Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus, E) ως το βασικό μέτρο ακαμψίας στα ελαστικά και στα Mohr-Coulomb μοντέλα. Το μέτρο ελαστικότητας έχει μονάδες τάσης.

Λόγος Poisson

Πολλές δοκιμές έδειξαν ότι οι τιμές του λόγου Poisson αυξάνονται στην αρχή μιας αξονικής φόρτισης συνεπώς οι αρχικές τιμές του λόγου Poisson (ν) είναι χαμηλές. Σε μερικές περιπτώσεις όπως σε προβλήματα χωρίς φορτίσεις χρησιμοποιείται χαμηλή τιμή του λόγου Poisson ενώ κατά την χρήση του μοντέλου Mohr-Coulomb χρησιμοποιείται υψηλότερη τιμή. Οι τιμές του λόγου Poisson είναι συνήθως μεταξύ 0,3 και 0,4.

Συνοχή

Η συνοχή (c) έχει μονάδες τάσης. Το Plaxis μπορεί να επεξεργαστεί άμμους χωρίς συνοχή ($c=0$), αλλά με αυτό τον τρόπο δεν γίνεται σωστή προσομοίωση κάποιων από τις παραμέτρους του προβλήματος. Για την αποφυγή τέτοιου είδους λαθών είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται μια μικρή τιμή για τη συνοχή ($c>0,2$ kPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής

Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) μετριέται σε μοίρες. Υψηλές τιμές γωνιών εσωτερικής τριβής αυξάνουν την προσπάθεια πλαστικής επίλυσης. Ο χρόνος υπολογισμού αυξάνει εκθετικά σε σχέση με τη γωνία εσωτερικής τριβής και γίνεται αρκετά μεγάλος όταν χρησιμοποιούνται τιμές άνω των 35° . Έτσι, υψηλές τιμές γωνιών εσωτερικής τριβής πρέπει να αποφεύγονται, ειδικά στα προκαταρκτικά στάδια υπολογισμών ενός προβλήματος.

6.1.6 Δημιουργία δικτυώματος στοιχείων

Στο Plaxis η δημιουργία του δικτυώματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα. Παρ' όλα αυτά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προχωρήσει στην ολική ή τοπική πύκνωση του, ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση το δικτύωμα που δημιουργείται αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία τα οποία μπορεί να ανέρχονται σε μερικές χιλιάδες στον αριθμό.

Ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων

Η δημιουργία του πλέγματος απαιτεί μια γενική παράμετρο πλέγματος που αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των στοιχείων, le . Στο Plaxis αυτή η παράμετρος υπολογίζεται με βάση τις εξωτερικές γεωμετρικές διαστάσεις (x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max}) και το n_c έναν ακέραιο συντελεστή ο οποίος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του δικτυώματος που χρησιμοποιείται για την διακριτοποίηση του εδαφικού μοντέλου που προσομοιώνεται:

$$le = \sqrt{\frac{(x_{max} - x_{min})(y_{max} - y_{min})}{n_c}} \quad (6.4)$$

Τα επίπεδα ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων είναι πέντε:

- ✓ Πολύ αραιό
- ✓ Αραιό
- ✓ Μέσης πυκνότητας
- ✓ Πυκνό
- ✓ Πολύ πυκνό.

Εξ ορισμού, η ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων τίθεται αραιή. Το μέσο μέγεθος των στοιχείων και ο αριθμός των παραγόμενων στοιχείων εξαρτώνται από αυτήν την ρύθμιση της ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων. Μια κατά προσέγγιση εκτίμηση δίνεται στον Πίνακα 6.1.

Ο ακριβής αριθμός των στοιχείων εξαρτάται από την ακριβή γεωμετρία και τις ενδεχόμενες τοπικές πυκνώσεις.

Πίνακας 6.1: Σχέση μεταξύ πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων και αριθμού στοιχείων (Plaxis Manual, 1998).

Πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων	Αριθμός Στοιχείων	n_c
Πολύ αραιό	50	25
Αραιό	100	50
Μέσης πυκνότητας	250	100
Πυκνό	500	200
Πολύ πυκνό	1000	400

6.1.7 Αρχικές συνθήκες

Μόλις δημιουργηθεί το γεωμετρικό μοντέλο και το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων έχει παραχθεί, πρέπει να οριστεί και η αρχική κατάσταση όσο αφορά την πίεση πόρων και τις τάσεις. Αυτό γίνεται στο στάδιο ορισμού των αρχικών συνθηκών που αποτελείται από δύο τμήματα:

α) Δημιουργία Υδατικών συνθηκών: Με αυτή την επιλογή παράγονται οι αρχικές πιέσεις πόρων.

β) Δημιουργία αρχικών τάσεων: Με αυτή την επιλογή δημιουργούνται οι αρχικές τάσεις σε συνάρτηση με την αρχικά διαμορφωμένη γεωμετρία.

6.1.8 Υδρολογικές συνθήκες

Το Plaxis χρησιμοποιείται γενικά για την απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στις οποίες γίνεται μια σαφής διάκριση μεταξύ των ενεργών πιέσεων πόρων, p_{active} , και των ενεργών τάσεων, σ' . Στις ενεργές πιέσεις πόρων γίνεται μια περαιτέρω διάκριση μεταξύ των πιέσεων πόρων κατάστασης, των p_{steady} , και υπερπιέσεων πόρων, p_{excess} .

$$p_{\text{active}} = p_{\text{steady}} + p_{\text{excess}}$$

Η υπερ πίεση των πόρων είναι η πίεση που εμφανίζεται λόγω της φόρτισης στο μοντέλο και ειδικότερα για εκείνα τα υλικά ο τύπος της συμπεριφοράς των οποίων (όσο αφορά την στράγγιση) θεωρείται μη στραγγιζόμενος.

Οι πιέσεις πόρων κατάστασης είναι πιέσεις πόρων που αντιπροσωπεύουν μια σταθερή υδραυλική κατάσταση. Μια τέτοια κατάσταση επικρατεί όταν οι εξωτερικές υδατικές συνθήκες παραμένουν λίγο πολύ σταθερές κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης περιόδου.

Όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της πίεσης πόρων τότε το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα σχεδιάζεται στο κατώτατο σημείο του γεωμετρικού μοντέλου και όλες οι πιέσεις πόρων λαμβάνονται ίσες με το μηδέν.



Σταθερές πιέσεις πόρων:

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις για την παραγωγή των σταθερών πιέσεων πόρων.

- **Ανάλυση υπόγειας ροής:** Οι σύνθετες κατανομές πίεσης πόρων μπορούν να παραχθούν βάσει μιας δισδιάστατης ανάλυσης ροής υπόγειων υδάτων.
- **Επίπεδο υδροφόρου ορίζοντα:** Οι πιέσεις των πόρων και οι εξωτερικές υδατικές πιέσεις δημιουργούνται με βάση το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύει εκείνα τα σημεία για τα οποία η πίεση του νερού είναι ίση με μηδέν. Κάτω από το επίπεδο αυτό, η πίεση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (υδροστατική πίεση) και με βάση το ειδικό βάρος του νερού όπως αυτό έχει οριστεί προηγουμένως.

Υπερπιέσεις πόρων:

Το Plaxis διακρίνει μεταξύ στραγγιζόμενων και μη εδαφών για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά των διαπερατών άμμων και των στεγανών αργίλων. Όταν τα μη στραγγιζόμενα εδαφικά στρώματα δέχονται φορτία, κατά τη διάρκεια των πλαστικών

υπολογισμών υπολογίζονται οι υπερβολικές πιέσεις πόρων. Οι φορτίσεις των μη στραγγιζόμενων εδαφών επηρεάζουν κατά πολύ την σταθερότητα των γεωτεχνικών δομών. Σε περιπτώσεις ανεπαρκούς ευστάθειας, πρέπει να εισαχθούν οι ενδιάμεσες περίοδοι σταθεροποίησης για να μειωθούν οι υπερπιέσεις πόρων.

6.1.9 Προσδιορισμός αρχικής γεωμετρίας

Ο προσδιορισμός της αρχικής γεωμετρίας επιτρέπει την απενεργοποίηση τμημάτων του μοντέλου, τα οποία δεν είναι ενεργά στην αρχική κατάσταση. Επιπροσθέτως, μπορούν να υπολογιστούν οι αρχικές ενεργές τάσεις, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία K_0 .

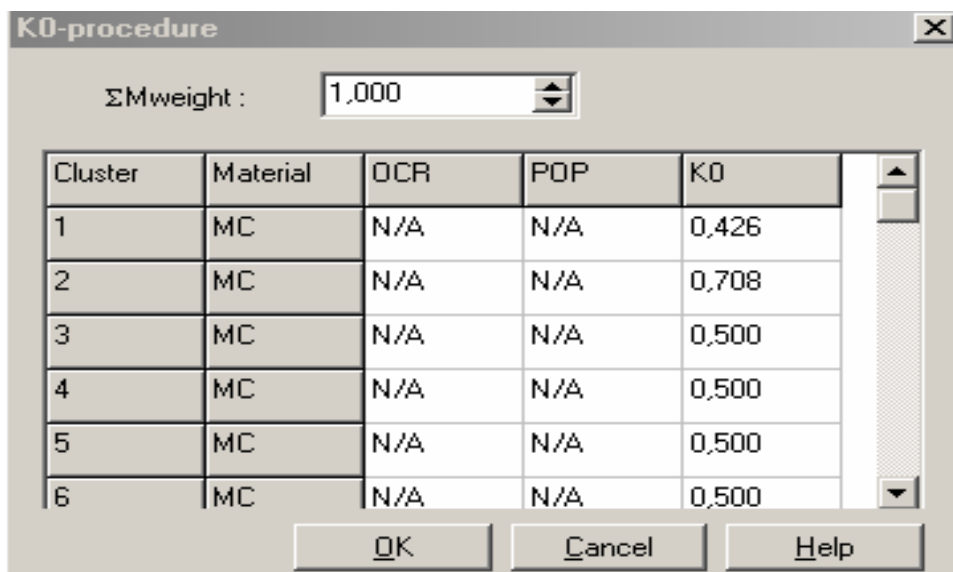


Δημιουργία αρχικών τάσεων (διαδικασία K_0)

Οι αρχικές τάσεις στη μάζα του εδάφους εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το βάρος των υλικών που αποτελούν το μοντέλο. Η τασική αυτή κατάσταση περιγράφεται από μια αρχική κατακόρυφη τάση $\sigma_{v,0}$ που σχετίζεται με το συντελεστή πλευρικής πίεσης K_0 ($\sigma_{h,0} = K_0 \sigma_{v,0}$). Στο Plaxis, οι αρχικές τάσεις δημιουργούνται με τον ορισμό του K_0 , ή με τη χρήση της επιλογής της φόρτισης λόγω του ίδιου του βάρους του μοντέλου, που γίνεται στη διαδικασία υπολογισμών. Στο Σχήμα 6.11 φαίνεται το παράθυρο αρχικών τάσεων.

Στη διαδικασία K_0 εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου που περιέχει ένα πίνακα όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις τιμές του συντελεστή αυτού. Εξ' ορισμού, οι τιμές του K_0 που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προκύπτουν από τη σχέση του Jaky ($1 - \sin \phi$), ενώ αν ο χρήστης επιθυμεί μπορεί να τις αλλάξει, με την επιφύλαξη ότι δεν πρέπει να εισάγονται πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές του K_0 .

Με τη δημιουργία των αρχικών τάσεων, η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων ολοκληρώνεται και ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμών.



Σχήμα 6.11 Παράθυρο αρχικών τάσεων (Plaxis Manual, 1998).

6.2 Υπολογισμοί



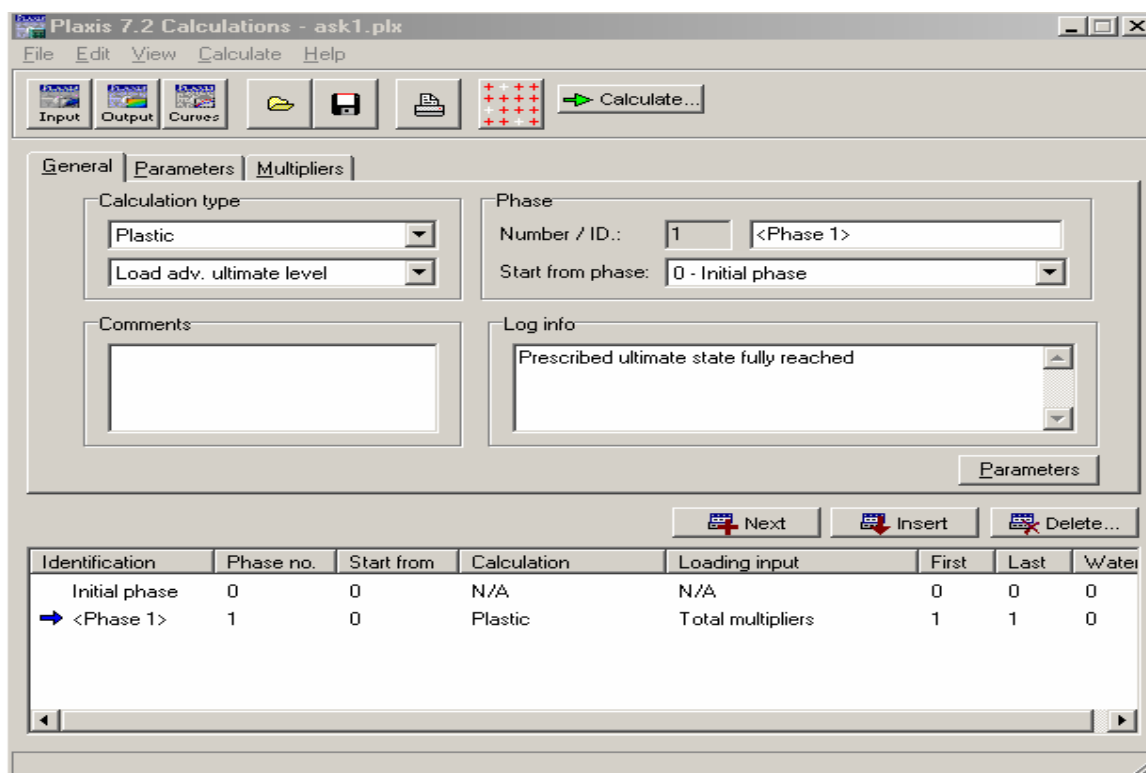
Μετά από την δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, ακολουθεί το στάδιο των υπολογισμών (Calculations). Επομένως είναι απαραίτητο να καθοριστεί ποιοι τύποι φορτίσεων πρόκειται να ενεργοποιηθούν κατά τα διάφορα στάδια των υπολογισμών. Αυτό γίνεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα. Το παράθυρο του υπολογιστικού προγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 6.12.

Το πρόγραμμα θεωρεί μόνο ανάλυση παραμόρφωσης και διαχωρίζει τους τύπους των υπολογισμών σε: α) ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου, β) ανάλυση στερεοποίησης, γ) ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis).

6.2.1 Καθορισμός υπολογιστικής φάσης

Εξετάζεται ένα νέο πρόβλημα για το οποίο δεν έχει καθοριστεί ακόμα καμία φάση υπολογισμού. Σε αυτή την περίπτωση ο υπολογιστικός κατάλογος περιέχει μόνο μια γραμμή, που υποδεικνύεται ως «Αρχική φάση». Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση του προβλήματος όπως καθορίζεται στο πρόγραμμα εισαγωγής (input program). Η «Αρχική φάση» είναι η αφετηρία για τους περαιτέρω υπολογισμούς. Προκειμένου να εισαχθεί η πρώτη υπολογιστική φάση για το τρέχον πρόβλημα πιέζεται το κουμπί <Next> ακριβώς επάνω από τον υπολογιστικό

κατάλογο. Ακολουθεί ο καθορισμός των χαρακτηριστικών καθεμιάς από τις φάσεις ξεχωριστά.



Σχήμα 6.12 Κύριο παράθυρο υπολογιστικού προγράμματος (Plaxis Manual, 1998).

6.2.2 Γενικά υπολογιστικά στοιχεία

Αυτό το φύλλο στοιχείων χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα γενικά στοιχεία της καθεμιάς από τις υπολογιστικές φάσεις και περιέχει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Υπολογιστικός τύπος
- Φάση
- Σχόλια και πληροφορίες

Τύποι υπολογισμών

Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου (Plastic)

Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με σκοπό την πραγματοποίηση μιας ελαστοπλαστικής ανάλυσης παραμόρφωσης 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 μοντέλου. Γενικά, η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές, ενώ δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του χρόνου, εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους (Soft soil creep model).

Ανάλυση στερεοποίησης (consolidation)

Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητη η ανάλυση της ανάπτυξης της υπερπίεσης των πόρων που προκύπτει σε εδάφη τύπου κορεσμένων αργίλων σε συνάρτηση του χρόνου.

Ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis)

Πρόκειται για έναν τύπο ανάλυσης στον οποίο και πάλι αναλύεται η πλαστική συμπεριφορά του προτύπου, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή συνυπολογίζονται και οι πολύ μεγάλες παραμορφώσεις που αυτό μπορεί να επιδείξει. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν οι αναμενόμενες παραμορφώσεις επηρεάζουν σημαντικά το σχήμα της γεωμετρίας του μοντέλου. Ο υπολογισμός του πίνακα ακαμψίας αυτού, βασίζεται στην παραμορφωμένη γεωμετρία του μοντέλου.

6.2.3 Παράμετροι υπολογιστικού ελέγχου

Επιπλέον βήματα

Αυτή η παράμετρος (Additional steps) δείχνει το (μέγιστο) αριθμό υπολογιστικών βημάτων που εκτελείται σε μια συγκεκριμένη υπολογιστική φάση. Εάν στον τύπο υπολογισμών ενεργοποιηθεί η επιλογή Manual control ο αριθμός πρόσθετων βημάτων είναι πάντα ίσος με 1, το οποίο σημαίνει ότι για την επίλυση μιας τέτοιας φάσης υπολογισμού πραγματοποιείται ένα μόνο υπολογιστικό βήμα.

Εάν επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης (Load advancement number of steps), τότε ορίζεται ένας ακέραιος αριθμός επιπλέον βημάτων, ο οποίος θα αντιπροσωπεύει τον απαιτούμενο αριθμό των δυναμικών βημάτων για την επίλυση αυτής της φάσης.

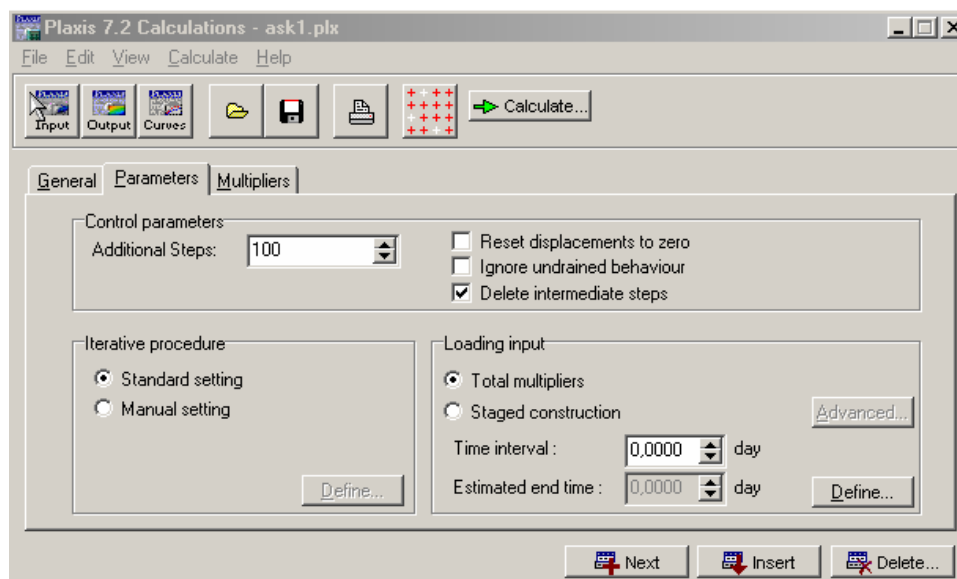
Εάν επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου (Load advancement ultimate level), τότε ο αριθμός των επιπλέον βημάτων που ορίζεται από το χρήστη αντιστοιχεί στο μέγιστο δυνατό αριθμό βημάτων υπολογισμού. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι για να επιλυθεί η συγκεκριμένη φάση θα πραγματοποιηθούν όλα τα υπολογιστικά βήματα που έχουν οριστεί.

Μηδενισμός παραμορφώσεων

Αυτή η επιλογή ενεργοποιείται όταν οι μετατοπίσεις των προηγούμενων βημάτων υπολογισμού δεν επιθυμείται να ληφθούν υπόψη στην αρχή της δεδομένης υπολογιστικής φάσης, έτσι ώστε ο νέος υπολογισμός να ξεκινά με μηδενικές αρχικές μετατοπίσεις. Για παράδειγμα, οι μετατοπίσεις που οφείλονται στη βαρύτητα δεν έχει νόημα να συνυπολογιστούν σε μια επόμενη φάση υπολογισμών. Έτσι αυτή η επιλογή επιλέγεται συνήθως μετά από το στάδιο εφαρμογής του ίδιου του βάρους των υλικών για να μηδενίσει αυτές τις μετατοπίσεις. Εάν δεν επιλεγεί, οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται στη τρέχουσα φάση υπολογισμών προστίθεται σε αυτές της προηγούμενης φάσης. Η επιλογή της επαναφοράς των μετατοπίσεων στο μηδέν δεν επηρεάζει υπολογισμό των τάσεων.

Αποκλεισμός αποτελεσμάτων μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς

Η επιλογή αυτή ενεργοποιείται όταν επιδιώκεται να αποκλειστούν τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς των μη στραγγιζόμενων υλικών. Κατά συνέπεια, όλα τα υλικά γίνονται προσωρινά μη στραγγιζόμενα. Οι υπάρχουσες υπερπιέσεις πόρων θα παραμείνουν αλλά δεν θα παραχθούν πρόσθετες πιέσεις πόρων στη συγκεκριμένη υπολογιστική φάση.



Σχήμα 6.13 Φύλλο παραμέτρων του παραθύρου υπολογισμών (Plaxis Manual, 1998).

Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων

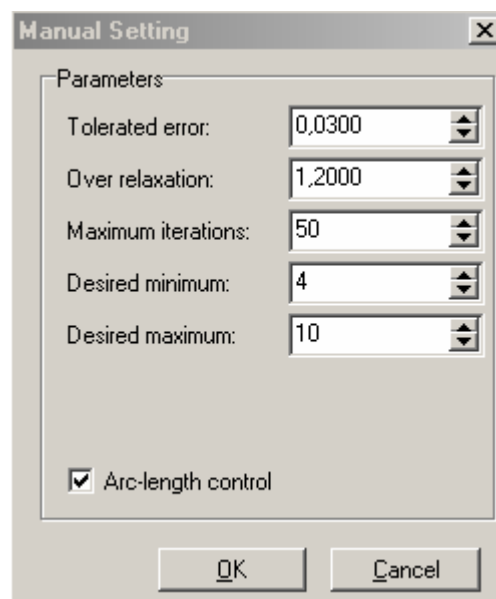
Κατά την επιλογή αυτή όταν τελειώσει επιτυχώς μια φάση υπολογισμού διαγράφονται όλα τα ενδιάμεσα βήματα και τα αποτελέσματά τους, εκτός από το τελευταίο.

Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας

Η επαναληπτική διαδικασία επηρεάζεται από μερικές παραμέτρους ελέγχου, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.. Το Plaxis διαθέτει προεπιλεγμένες τιμές για αυτές τις παραμέτρους, η οποία δίνει στις περισσότερες περιπτώσεις μια καλή εκτέλεση της επαναληπτικής διαδικασίας (Σχήμα 6.14).

Ανεκτό σφάλμα

Σε οποιαδήποτε μη γραμμική ανάλυση όπου χρησιμοποιείται ένας πεπερασμένος αριθμός υπολογιστικών βημάτων υπάρχει μια απόκλιση από την ακριβή λύση (Σχήμα 6.15). Ο σκοπός ενός αλγόριθμου επίλυσης είναι να εξασφαλίσει ότι τα σφάλματα εξισορρόπησης (τοπικά και καθολικά), παραμένουν μέσα στα αποδεκτά όρια. Γενικά, η προεπιλεγμένη τιμή 0,03 (που αντιστοιχεί σε σφάλμα 3%) είναι κατάλληλη για τους περισσότερους υπολογισμούς.



Σχήμα 6.14 Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων επαναληπτικής διαδικασίας (Plaxis Manual, 1998).

Υπέρ-χαλάρωση

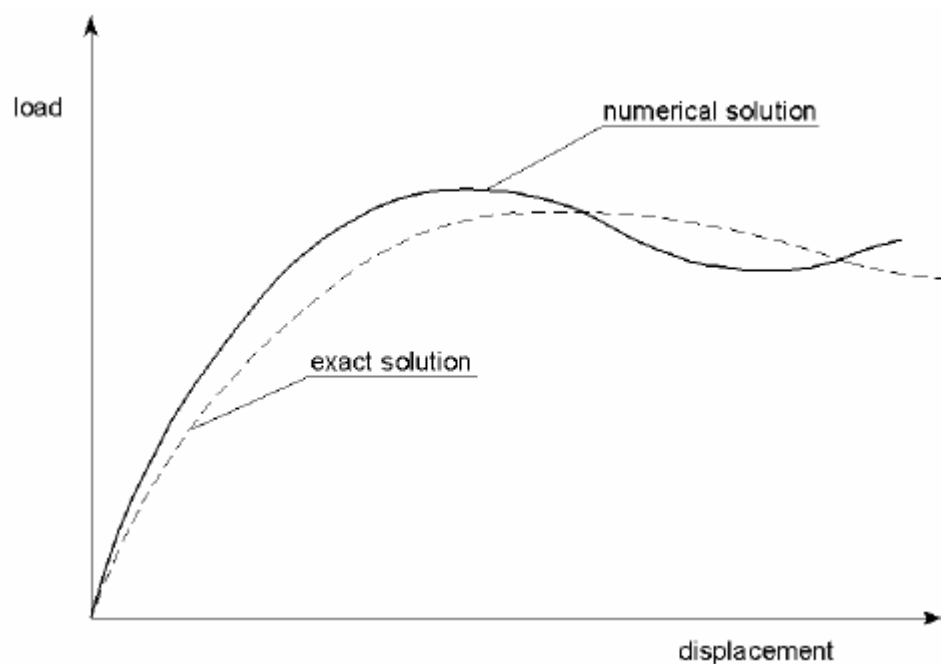
Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός επαναλήψεων που απαιτείται για τη σύγκλιση, το Plaxis χρησιμοποιεί μια διαδικασία υπέρ-χαλάρωσης (Σχήμα 6.16). Για μικρές γωνίες εσωτερικής τριβής (π.χ. $\phi < 20$) ένας συντελεστής υπέρ-χαλάρωσης περίπου 1,5 τείνει να βελτιστοποιήσει την επαναληπτική διαδικασία. Εάν το πρόβλημα περιέχει εδάφη με υψηλότερη γωνία εσωτερικής τριβής η τιμή του συντελεστή είναι μικρότερη. Η προεπιλεγμένη τιμή 1,2 είναι αποδεκτή στους περισσότερους υπολογισμούς.

Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων

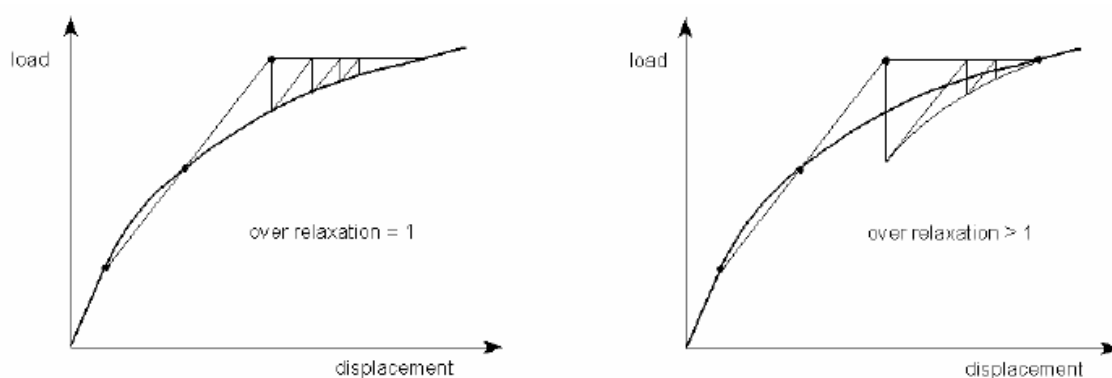
Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων μέσα σε οποιοδήποτε μεμονωμένο υπολογιστικό βήμα. Ο προεπιλεγμένος μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είναι 50.

Έλεγχος μήκους τόξου

Η διαδικασία του ελέγχου μήκους τόξου (Arc-length control) είναι μια μέθοδος που επιλέγεται από το Plaxis με σκοπό την επίτευξη φορτίων αστοχίας που θα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά.



Σχήμα 6.15 Σύγκριση αριθμητικής και ακριβούς λύσης (Plaxis Manual, 1998).



Σχήμα 6.16 Επαναληπτική διαδικασία με και χωρίς υπέρ-χαλάρωση (Plaxis Manual, 1998).

Εισαγωγή φορτίσεων

Η εισαγωγή φορτίσεων (Loading Input) χρησιμοποιείται για να διευκρινίσει ποιος τύπος φόρτισης εξετάζεται στην συγκεκριμένη υπολογιστική φάση. Στην ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών, το Plaxis διαθέτει τους ακόλουθους τύπους φορτίσεων:

1. Φορτίσεις που εφαρμόζονται με αύξηση ή μείωση εξωτερικών δυνάμεων, που ενεργοποιούνται από τους μεταβαλλόμενους πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης (Incremental multipliers) ή τους συνολικούς πολλαπλασιαστές (total multipliers).
2. Φορτίσεις που εφαρμόζονται με τη μεταβολή του βάρους, της δύναμης ή της ακαμψίας των στοιχείων και ενεργοποιούνται με την αλλαγή της γεωμετρίας ή της θέσης του επιπέδου του υδροφόρου του μοντέλου στην σταδιακή κατασκευή (Staged construction).
3. Φορτίσεις με σταδιακή των παραμέτρων αντοχής, ϕ και c για ανάλυση ευστάθειας, που ενεργοποιείται με ορισμό του πολλαπλασιαστή ΣM_{sf} .

Πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης (incremental multipliers)

Οι πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις αυξήσεις ή μειώσεις των εξωτερικών φορτίων.

Συνολικοί πολλαπλασιαστές (total multipliers)

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου, τότε ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων επιλέγοντας τη ρύθμιση των συνολικών πολλαπλασιαστών

Σταδιακή κατασκευή

Είναι δυνατό να προσομοιωθούν οι διαδικασίες κατασκευής και εκσκαφής με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση τμημάτων του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει μια ρεαλιστική αξιολόγηση των δημιουργούμενων τάσεων και παραμορφώσεων, παραδείγματος χάριν, λόγω της κατασκευής ενός χωμάτινου φράγματος ή της εκσκαφής ενός ορύγματος. Η επιλογή “*Stage Construction*” χρησιμοποιείται επίσης για τον υποβιβασμό ή την άνοδο του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα.

Μείωση των παραμέτρων αντοχής

Η μείωση των παραμέτρων αντοχής (c και ϕ) είναι μια επιλογή που διαθέτει το Plaxis για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο στην περίπτωση που έχει επιλεγεί η ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Κατά τη διαδικασία της μείωσης των παραμέτρων αντοχής, οι παράμετροι $\tan\phi$ και c του εδάφους μειώνονται διαδοχικά μέχρι την αστοχία της δομής. Εάν χρησιμοποιούνται διεπιφάνειες, οι ιδιότητες τους μειώνονται με τον ίδιο τρόπο. Η αντοχή των δομικών στοιχείων όπως των πασσάλων και των αγκυρίων δεν επηρεάζεται από την μείωση των παραμέτρων αντοχής, ϕ και c .

Ο συνολικός πολλαπλασιαστής ΣMsf χρησιμοποιείται για να καθορίσει την τιμή των παραμέτρων της εδαφικής αντοχής:

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (6.5)$$

όπου οι παράμετροι με τον συντελεστή “*input*” αναφέρονται στις ιδιότητες των υλικών που εισάγονται στην αρχή της ανάλυσης και οι παράμετροι με τον συντελεστή “*reduced*” αναφέρονται στις μειωμένες τιμές που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση. Σε αντίθεση με άλλους συνολικούς πολλαπλασιαστές, το ΣMsf τίθεται ίσο με 1,0 στην έναρξη των υπολογισμών για να θέσει όλες τις παραμέτρους των υλικών στις μη μειωμένες τιμές τους. Οι παράμετροι αντοχής μειώνονται αυτόματα και διαδοχικά μέχρι την αστοχία της δομής. Στο σημείο αυτό ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \Sigma Msf \text{ at failure} \quad (6.6)$$

Αυτή η προσέγγιση μοιάζει με τη μέθοδο υπολογισμού των συντελεστών ασφάλειας που πραγματοποιείται σε κυκλική επιφάνεια ολίσθησης. Η μείωση των ϕ και c σε συνδυασμό με τα προηγμένα εδαφικά μοντέλα έχει σαν αποτέλεσμα αυτά τα μοντέλα να συμπεριφέρονται σαν ένα τυπικό μοντέλο Mohr-Coulomb. Ο εξαρτώμενος από την τάση συντελεστής ακαμψίας, στο τέλος του προηγούμενου βήματος, χρησιμοποιείται σαν ένας σταθερός συντελεστής ακαμψίας κατά τη διάρκεια του υπολογισμού της μείωσης των παραμέτρων αντοχής.

6.2.4 Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων

Μετά από τον καθορισμό των φάσεων υπολογισμού και πριν από έναρξη της διαδικασίας υπολογισμών, μπορούν να επιλεγτούν μερικά σημεία για την δημιουργία των καμπυλών όσο αφορά τα φορτία, τις τάσεις και τις μετατοπίσεις. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, οι πληροφορίες για τα επιλεγμένα σημεία αποθηκεύονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο. Μετά από τον υπολογισμό το πρόγραμμα καμπυλών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει τις καμπύλες φορτίων-μετατοπίσεων και τάσεων. Η δημιουργία αυτών των καμπυλών είναι βασισμένη στις πληροφορίες που αποθηκεύονται στο ξεχωριστό αρχείο. Δεν είναι επομένως δυνατό να παραχθούν οι καμπύλες για σημεία τα οποία δεν έχουν επιλεγεί εκ των προτέρων.

6.3 Αποτελέσματα

Το κύριο αποτέλεσμα ενός υπολογισμού πεπερασμένων στοιχείων είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και η κατανομή των τάσεων στα σημεία τάσης.



Μέσα από το πρόγραμμα των αποτελεσμάτων ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δει και να ταξινομήσει τα αποτελέσματα της επίλυσης και των υπολογισμών.

6.3.1 Παραμορφώσεις

Το μενού των παραμορφώσεων περιέχει διάφορες επιλογές για την απεικόνιση των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Εξ ορισμού, οι επιδειχθείσες ποσότητες μπαίνουν αυτόματα σε μία κλίμακα από έναν παράγοντα $(1 \dots 2 \text{ ή } 5) \cdot 10^v$ για να δώσουν ένα διάγραμμα εύκολο στη χρήση του.



Ο παράγοντας κλίμακας για τις ανηγμένες παραμορφώσεις αναφέρεται σε μια τιμή αναφοράς της ανηγμένης παραμόρφωσης η οποία σχεδιάζεται ως ποσοστό των διαστάσεων της γεωμετρίας του μοντέλου. Προκειμένου να συγκριθούν τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων διαφορετικών φάσεων υπολογισμού, οι παράγοντες κλίμακας στα διαφορετικά διαγράμματα πρέπει να γίνουν ίσοι.

Συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις

Οι συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις αντιστοιχούν στις ανηγμένες παραμορφώσεις e_{ij} του τελικού βήματος του τρέχοντος υπολογισμού. Εξ ορισμού, οι συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις παρουσιάζονται ως κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις. Το μήκος κάθε γραμμής αντιπροσωπεύει το μέγεθος της κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης και η κατεύθυνση δείχνει την κύρια κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση λόγω συμπίεσης θεωρείται αρνητική. Όταν χρησιμοποιούνται 6 κομβικά στοιχεία, μόνο μια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης ανά στοιχείο επιδεικνύεται, η οποία αντιστοιχεί στο μέσο όρο της ανηγμένης παραμόρφωσης στα τρία φασικά σημεία του στοιχείου. Όταν χρησιμοποιούνται 15 κομβικά στοιχεία επιδεικνύονται ανά στοιχείο μόνο τρεις από τις δώδεκα τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης. Ως εναλλακτική λύση για την απεικόνιση των παραμορφώσεων, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις ισοπαραμορφωσιακές καμπύλες ή τις χρωματικές διαβαθμίσεις της συνολικής ανηγμένης παραμόρφωσης όγκου ή της συνολικής ισοδύναμης ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης.

6.3.2 Τάσεις

Το μενού των τάσεων περιέχει ποικίλες επιλογές για την απεικόνιση της κατανομής των τάσεων σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Σχετική διατμητική τάση

Η σχετική διατμητική τάση δίνει μια ένδειξη της εγγύτητας του σημείου τάσης στο φάκελο αστοχίας. Η σχετική διατμητική τάση, τ_{rel} , ορίζεται ως:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}} \quad (6.7)$$

όπου τ είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης και τ_{max} η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης για την περίπτωση όπου ο κύκλος του Mohr διογκώνεται για να αγγίξει το φάκελο αστοχίας του Coulomb, διατηρώντας την κύρια τάση σταθερή.

Σημεία αστοχίας

Τα σημεία αστοχίας είναι σημεία τα οποία υποδεικνύουν αστοχία, στο δεδομένο σημείο της γεωμετρίας. Τα σημεία αστοχίας υποδεικνύονται από τα μικρά σύμβολα που μπορούν να έχουν διαφορετικά σχήματα και χρώματα, ανάλογα με τον τύπο αστοχίας που έχει εμφανιστεί. Ένα κόκκινο ανοικτό τετράγωνο δείχνει ότι οι τάσεις στο σημείο αυτό βρίσκονται στην επιφάνεια αστοχίας Coulomb. Ένα άσπρο συμπαγές τετράγωνο υποδεικνύει ότι στο δεδομένο σημείο εμφανίζεται αστοχία λόγω εφελκυσμού.

Τα σημεία αστοχίας Coulomb είναι ενδεικτικά για το αν το μέγεθος του μοντέλου είναι ικανοποιητικό. Εάν η ζώνη της πλαστικότητας Coulomb φθάνει σε κάποιο από τα όρια του μοντέλου (εκτός από την κεντρική γραμμή σε ένα συμμετρικό μοντέλο) τότε το μέγεθος του μοντέλου είναι μικρό. Σε αυτήν την περίπτωση ο υπολογισμός πρέπει να επαναληφθεί με μοντέλο μεγαλύτερων διαστάσεων.

6.3.3 Δομές και διεπιφάνειες

Τα αποτελέσματα για αυτούς τους τύπους στοιχείων λαμβάνονται με διπλό κλικ στο επιθυμητό αντικείμενο στη γεωμετρία. Ένα νέο παράθυρο διαλόγου ανοίγει στο οποίο εμφανίζεται το επιλεγμένο αντικείμενο. Συγχρόνως το μενού αλλάζει έτσι ώστε να εξεταστούν τα αποτελέσματα για το επιλεγμένο αντικείμενο.

6.3.4 Διαγράμματα σε τομές του προτύπου



Για την απεικόνιση της κατανομής μιας δεδομένης παραμέτρου κατά μήκος τυχαίας γραμμής μέσα στη μάζα του μοντέλου, μπορούν να σχεδιαστούν τομές αυτού. Στις τομές αυτές οι ποσότητες που απεικονίζονται προκύπτουν από παρεμβολή των δεδομένων των κόμβων (όσον αφορά τις μετατοπίσεις) ή κατά προσέγγιση υπολογισμό των δεδομένων των τασικών σημείων (όσο αφορά τις τάσεις).

6.4 Καμπύλες φορτίων-μετατοπίσεων και κατανομή τάσεων



Το πρόγραμμα του σχεδιασμού καμπυλών χρησιμοποιείται για τη δημιουργία καμπυλών φορτίου και μετατοπίσεων, διαγράμματα τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων και κατανομή τάσεων σε επιλεγμένα εκ των προτέρων σημεία στη γεωμετρία. Αυτές οι καμπύλες απεικονίζουν την ανάπτυξη ορισμένων ποσοτήτων κατά τη διάρκεια των διάφορων φάσεων υπολογισμού, η οποία δίνει μια άποψη της συνολικής και τοπικής συμπεριφοράς του εδάφους. Η διάκριση γίνεται μεταξύ των κόμβων και των σημείων τάσης. Γενικά, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των καμπυλών φορτίου και μετατοπίσεων ενώ τα σημεία τάσης χρησιμοποιούνται για διαγράμματα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων και για την κατανομή των τάσεων. Ο μέγιστος αριθμός σημείων που μπορεί να επιλεγεί είναι 10 κόμβοι και 10 σημεία τάσης.

6.4.1 Δημιουργία καμπύλης

Κατά την έναρξη του προγράμματος σχεδιασμού των καμπυλών ζητείται από το χρήστη να επιλέξει από πιο αρχείο – μοντέλο επιθυμεί να χρησιμοποιήσει στοιχεία για να σχεδιάσει κάποιο διάγραμμα. Μετά από αυτή την επιλογή εμφανίζεται του παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 6.17) στο οποίο γίνονται οι επιλογές του γραφήματος το οποίο πρόκειται να σχεδιαστεί. Στο παράθυρο διαλόγου αυτό υπάρχουν δύο πλαίσια με διάφορες επιλογές για τον οριζόντιο άξονα (άξονα x) και για τον κατακόρυφο άξονα (άξονα y). Για κάθε άξονα γίνεται ένας συνδυασμός επιλογών με σκοπό των καθορισμό της παραμέτρου που θα απεικονιστεί στο διάγραμμα. Ο αριθμός των σημείων της κάθε καμπύλης αντιστοιχεί στον αριθμό των βημάτων που απαιτήθηκαν για την επίλυση της συγκεκριμένης φάσης υπολογισμών.

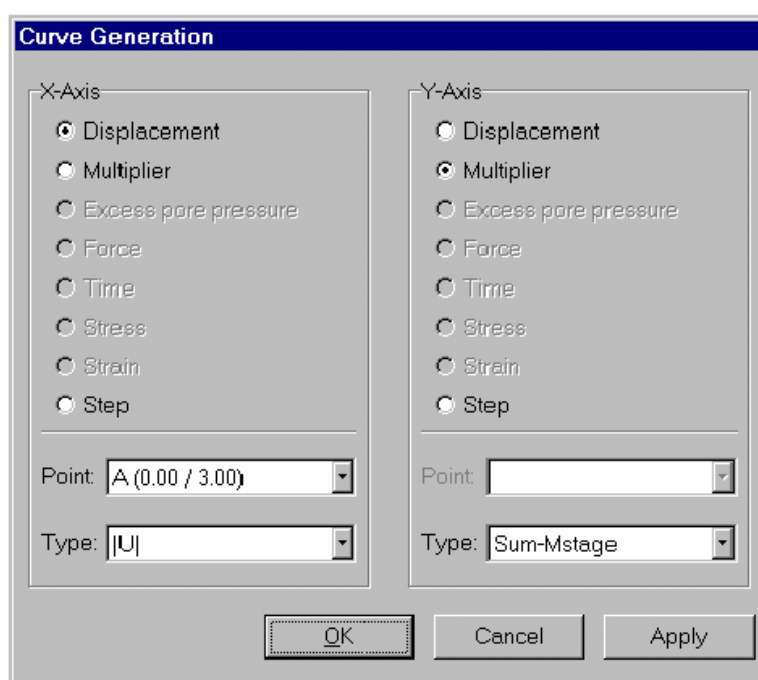
Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης

Τέτοιου είδους καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της (μη γραμμικής) σχέσης των φορτίων και των τελικών μετατοπίσεων ενός σημείου.

Οι μετατοπίσεις μπορεί να αναφέρονται είτε στο μέτρο των μετατοπίσεων ($|u|$) ή στις οριζόντιες μετατοπίσεις (u_x) ή στις κατακόρυφες (u_y). Οι μετατοπίσεις έχουν μονάδες μήκους, όπως αυτές ορίστηκαν στις γενικές ρυθμίσεις του προτύπου.

Ο πολλαπλασιαστής επιλέγεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο σύστημα φόρτισης. Σημειώνεται ότι το φορτίο δεν εκφράζεται σε μονάδες τάσης ή δύναμης και για το λόγο αυτό, η τιμή που δίνεται στο διάγραμμα για καθένα από τα σημεία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το αρχικό φορτίο που ορίστηκε κατά την εισαγωγή των δεδομένων για να προσδιοριστεί το πραγματικό φορτίο στο σημείο αυτό μετά το τέλος της επίλυσης.

Τέλος, μια άλλη ποσότητα που μπορεί να απεικονιστεί σε διάγραμμα είναι η υπερπίεση των πόρων, η οποία δίνεται σε μονάδες τάσης.



Σχήμα 6.17 Παράθυρο διαλόγου για τη δημιουργία καμπύλης (Plaxis Manual, 1998)

Καμπύλες χρόνου-μετατόπισης

Τέτοιου είδους καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από επίλυση προτύπων στα οποία η εξαρτώμενη από το χρόνο συμπεριφορά των εδαφών παίζει σημαντικό ρόλο (ανάλυση στερεοποίησης, μοντέλα ερπυσμού, δυναμικές αναλύσεις κλπ). Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος χρόνος επιλέγεται για τον άξονα των x και στον άξονα των y απεικονίζεται η μετατόπιση ενός δεδομένου κόμβου. Ο χρόνος εκφράζεται στις μονάδες που έχουν οριστεί στις

αρχικές ρυθμίσεις του προτύπου και που στην συνηθέστερη περίπτωση αντιστοιχεί σε μέρες.

Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης

Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της τοπικής συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους. Στην πραγματικότητα, τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης αντιστοιχούν στην ιδανική συμπεριφορά του εδάφους, με βάση το επιλεγμένο εδαφικό πρότυπο. Για κάθε από τα σημεία που έχουν προεπιλεγεί, είναι διαθέσιμες οι παράμετροι για το σχεδιασμό καμπυλών (Πίνακας 6.2):

Πίνακας 6.2: Παράμετροι σχεδιασμού καμπυλών (Plaxis Manual, 1998).

Τάσεις	Παραμορφώσεις
σ'_{xx} = ενεργή οριζόντια τάση	ϵ_{xx} = οριζόντια παραμόρφωση
σ'_{yy} = ενεργή κατακόρυφη τάση	ϵ_{yy} = κατακόρυφη παραμόρφωση
σ_{xy} = διατμητική τάση	γ_{xy} = διατμητική παραμόρφωση
σ'_{zz} = ενεργή πλευρική τάση	ϵ_{zz} = πλευρική παραμόρφωση
σ'_1 = μέγιστη ενεργή κύρια τάση	ϵ_1 = μέγιστη κύρια παραμόρφωση
σ'_2 = ενδιάμεση κύρια τάση	ϵ_2 = δευτερεύουσα κύρια παραμόρφωση
σ'_3 = ελάχιστη ενεργή κύρια τάση	ϵ_3 = ελάχιστη κύρια παραμόρφωση
p = μέση ενεργή τάση	ϵ_v = ογκική παραμόρφωση
q = αποκλίνουσα τάση (ισοδύναμη διατμητική τάση)	ϵ_q = αποκλίνουσα παραμόρφωση (ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση)
p_{excess} = υπερπίεση πόρων	

Οι παράμετροι των τάσεων εκφράζονται σε μονάδες τάσεων ενώ οι παράμετροι των παραμορφώσεων είναι αδιάστατες. Επισημαίνεται και πάλι ότι με τον όρο παραμόρφωση εννοείται η ανηγμένη παραμόρφωση των εδαφικών υλικών.

Τασικές διαδρομές και διαδρομές παραμορφώσεων

Μια τασική διαδρομή αντιπροσωπεύει την ανάπτυξη της εντατικής κατάστασης σε ένα δεδομένο σημείο του εδαφικού προτύπου. Αυτού του είδους οι καμπύλες

χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους σε τοπικό επίπεδο.

6.4.2 Επεξεργασία καμπύλης

Ο τρόπος παρουσίασης των καμπυλών και των διαγραμμάτων μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη εφόσον το πρόγραμμα του δίνει την επιλογή να τα τροποποιήσει αρκετά από την αρχική τους εμφάνιση. Εκτός από τις αλλαγές αισθητικού χαρακτήρα που δεν χρήζουν ιδιαίτερης επεξήγησης, αξίζει να σημειωθεί ότι για τον σχεδιασμό των καμπυλών με βάση τα στοιχεία από τα σημεία χρησιμοποιούνται συνήθως πολυωνυμικές παρεμβολές (Splines) μια και φαίνεται να δίνουν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Εναλλακτικά η καμπύλη μπορεί να προσεγγιστεί και με πολώνυμο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΕ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

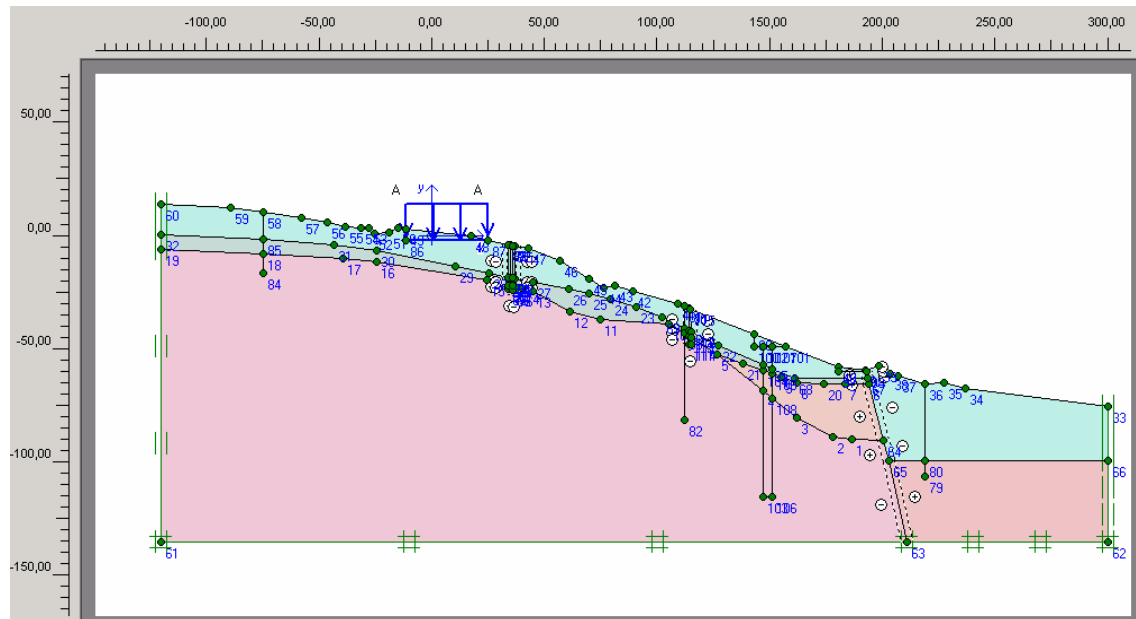
Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Plaxis (Version 7.0), το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις.

7.1 Εισαγωγή δεδομένων

Η δημιουργία του μοντέλου αρχίζει με την δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου το οποίο απεικονίζει το πρόβλημα (Σχήμα 7.1). Για την προσομοίωση του προβλήματος ως πλέον χαρακτηριστική τομή αναλύεται η τομή B-B, Σχέδιο αριθμ. ΙΚ-ΑΞ-ΚΑΤ-2 με τίτλο «Περιοχή Κατολίσθησης Λεωφ. Αιγάλεω – Τομές 1/2», το οποίο δίνεται στο Παράρτημα.

7.1.1 Γενικές ρυθμίσεις

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι γενικές ρυθμίσεις των μοντέλων. Περιέχει το όνομα του έργου, την περιγραφή του, το είδος του μοντέλου και το είδος των στοιχείων. Ο Πίνακας 7.2 περιέχει τις βασικές μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου, τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης και την πυκνότητα του καννάβου.



Σχήμα 7.1 Γεωμετρικό μοντέλου τομής B-B.

Πίνακας 7.1: Γενικές ρυθμίσεις μοντέλων.

Όνομα Αρχείου	Περιγραφή Έργου	Είδος Μοντέλου	Είδος στοιχείων
Μοντέλο 1	Ανάλυση Τομής B-B	Επίπεδης ανοιγμένης παραμόρφωσης (Plane strain)	6-κομβικά (6-Node)
Μοντέλο 2	Ανάλυση Τομής B-B		6-κομβικά (6-Node)
Μοντέλο 11	Ανάλυση Τομής B-B		6-κομβικά (6-Node)
Μοντέλο 22	Ανάλυση Τομής B-B		6-κομβικά (6-Node)

7.1.2 Γεωμετρία προσομοιώματος-Φορτία και συνοριακές συνθήκες

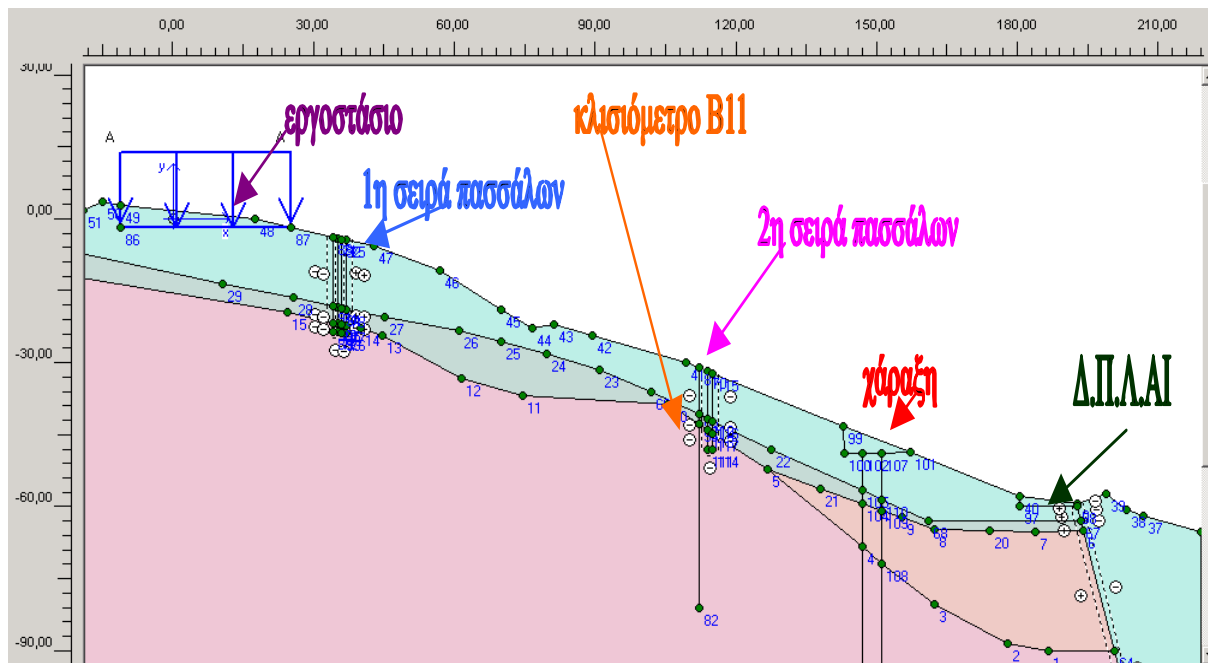
Το γεωμετρικό μοντέλο του σχήματος 7.1 αποτελείται από πέντε διαφορετικά στρώματα και τρεις πασσάλους (Σχήμα 7.2). Ακόμη φαίνονται σαν γραμμές τα τρία κλισιόμετρα που βρίσκονται στην τομή και το ρήγμα της περιοχής. Για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους και των πασσάλων, καθώς επίσης και στο ρήγμα, χρησιμοποιείται η επιλογή των διεπιφανειών (interfaces). Στην περιοχή όπου βρίσκεται το εργοστάσιο χρησιμοποιείται ελκτικό φορτίο A, του οποίου τα χαρακτηριστικά και η γεωμετρική γραμμή που εφαρμόζεται φαίνονται στο Πίνακα 7.3. Όσο αφορά τις συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιείται η επιλογή τυποποιημένων συνοριακών συνθηκών (Standard fixities), δηλαδή:

- κύλιση στο δεξί και αριστερό όριο του μοντέλου ως προς τον y-άξονα και

- πάκτωση στο κατώτερο οριζόντιο όριο.

Πίνακας 7.2: Γενικές ρυθμίσεις, Μονάδες-διαστάσεις.

	Μονάδες		Διαστάσεις Περιοχής (m)		Πυκνότητα καννάβου
Μήκος	m	Αριστερά	-96,010	Αραίωση	1
Δύναμη	kN	Δεξιά	257,600	Αριθμός	1
Χρόνος	day	Κάτω	-110,300	μέσων	
		Πάνω	13,590	διαστημάτων	



Σχήμα 7.2 Απεικόνιση στοιχείων μοντέλου.

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά φορτίου επιφάνειας περιοχής εργοστασίου.

	Φορτίο σημείου 86 kN/m ²	Φορτίο σημείου 87 kN/m ²
Άξονας X	0	0
Άξονας Y	-250	-250

7.1.3 Ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών του εδάφους καθώς επίσης και οι ιδιότητες των πασσάλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις των στρωμάτων, όπως φαίνονται στα κελιά, είναι αντίστοιχες με του μοντέλου. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους καθώς και των άλλων στοιχείων επιλέγεται το απλό μη γραμμικό μοντέλο Mohr-Coulomb ενώ ο εδαφικός τύπος επιλέγεται ως στραγγιζόμενος (drained). Τέλος, όσο αφορά τις διεπιφάνειες η διαπερατότητα τους δεν λαμβάνεται υπόψη και έτσι επιλέγεται η επιλογή “neutral” ενώ ο παράγοντας μείωσης της αντοχής R_{inter} λαμβάνεται ίσος με την μονάδα διαλέγοντας την επιλογή που μας δείχνει ακαμψία (rigid).

Πίνακας 7.4: Ιδιότητες εδαφικών υλικών και υλικών πασσάλων.

	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x 1m/day	k_y 1m/day	E_{ref} (kN/m ²)	ν (nu)	c_{ref} (kN/m ²)	ϕ^0
Ασβεστολιθικό λατυποπαγές	20	22	1	1	$1 \cdot 10^6$	0,30	200	30
Ασβεστόλιθος	21	23	1	1	$7 \cdot 10^6$	0,27	300	35
Κορήματα	18	20	1	1	$5 \cdot 10^4$	0,35	20	30
Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος	21	23	1	1	$5 \cdot 10^6$	0,27	300	30
Πάσσαλος	23,6	24,6	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^7$	0,30	$3 \cdot 10^4$	35
Σχιστόλιθος	20	22	1	1	$5 \cdot 10^5$	0,30	30	17

7.1.4 Δημιουργία δικτυώματος

Όσο αφορά την δημιουργία δικτυώματος γίνονται δύο αναλύσεις:

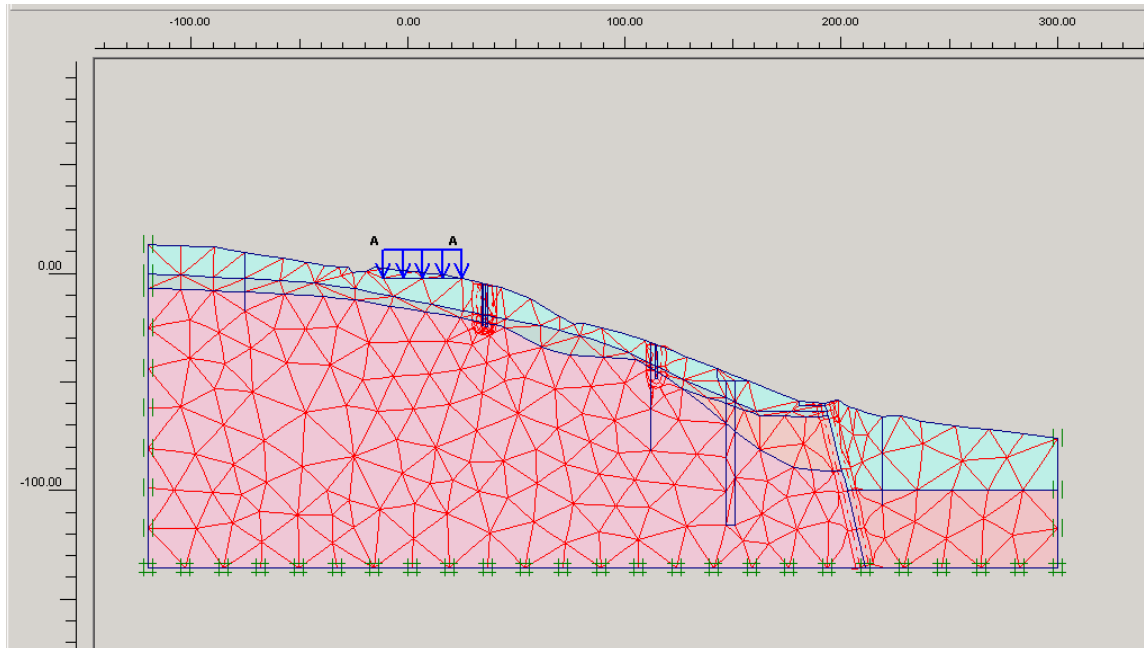
- Στην πρώτη ανάλυση στο μοντέλο (Μοντέλο 1 και Μοντέλο 2) επιλέγεται το πυκνό (fine) επίπεδο ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων
- Στη δεύτερη ανάλυση στο μοντέλο (Μοντέλο 11 και Μοντέλο 22) επιλέγεται το πολύ πυκνό (very fine) επίπεδο ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων και γίνεται τοπική πύκνωση του στις γραμμές που προσομοιώνουν τους πασσάλους και τα σημεία εκσκαφής. Αυτό γίνεται για εξομάλυνση των μεγάλων οξείων γωνιών των τριγωνικών στοιχείων οι οποίες πιθανόν να οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 7.5 φαίνονται τα επίπεδα δικτυώματος στοιχείων που χρησιμοποιούνται καθώς και ο ακριβής αριθμός στοιχείων σε κάθε περίπτωση.

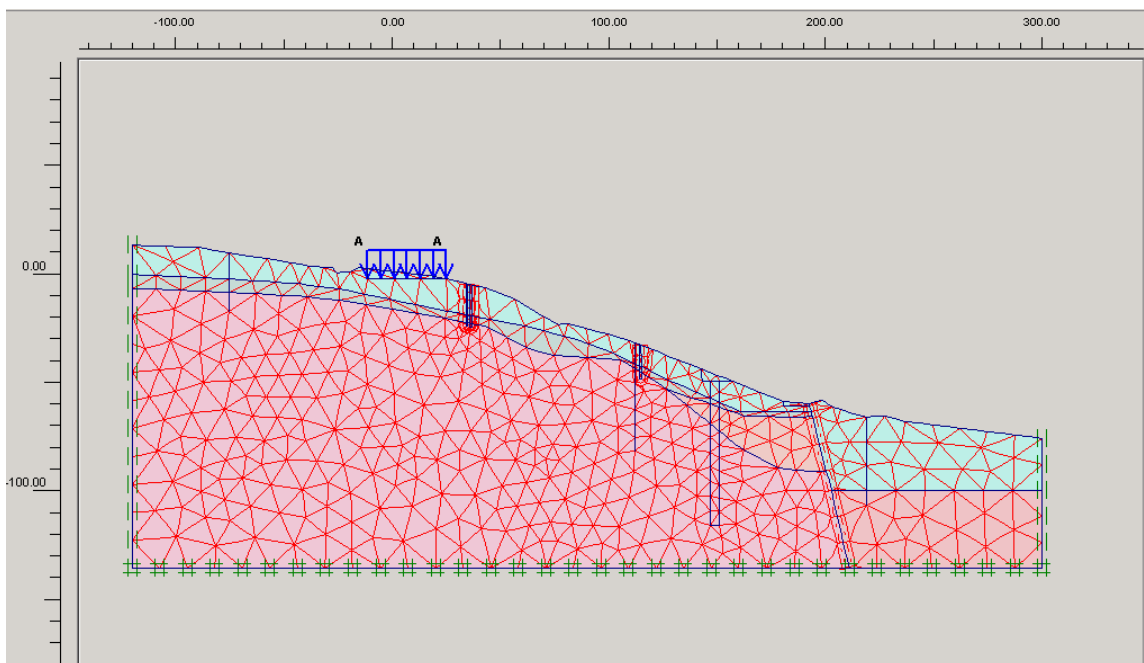
Πίνακας 7.5: Πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων και αριθμός στοιχείων.

Πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων	Αριθμός στοιχείων
Πυκνό	500
Πολύ πυκνό	896

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται το πυκνό επίπεδο ενώ στο Σχήμα 7.4 το πολύ πυκνό.



Σχήμα 7.3 Πυκνό επίπεδο δικτυώματος στοιχείων.

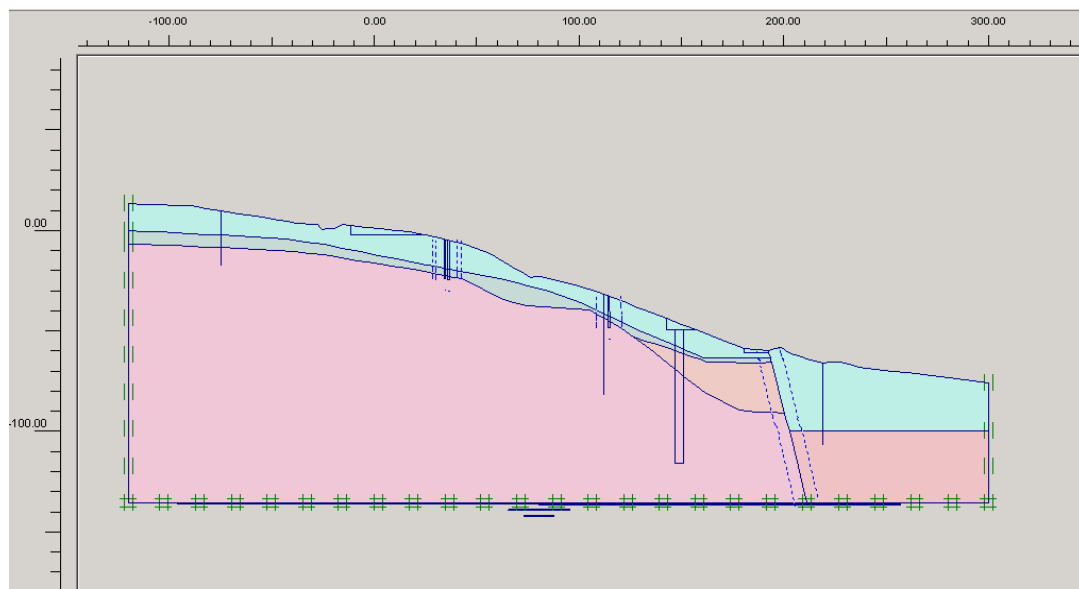


Σχήμα 7.4 Πολύ πυκνό επίπεδο δικτυώματος στοιχείων.

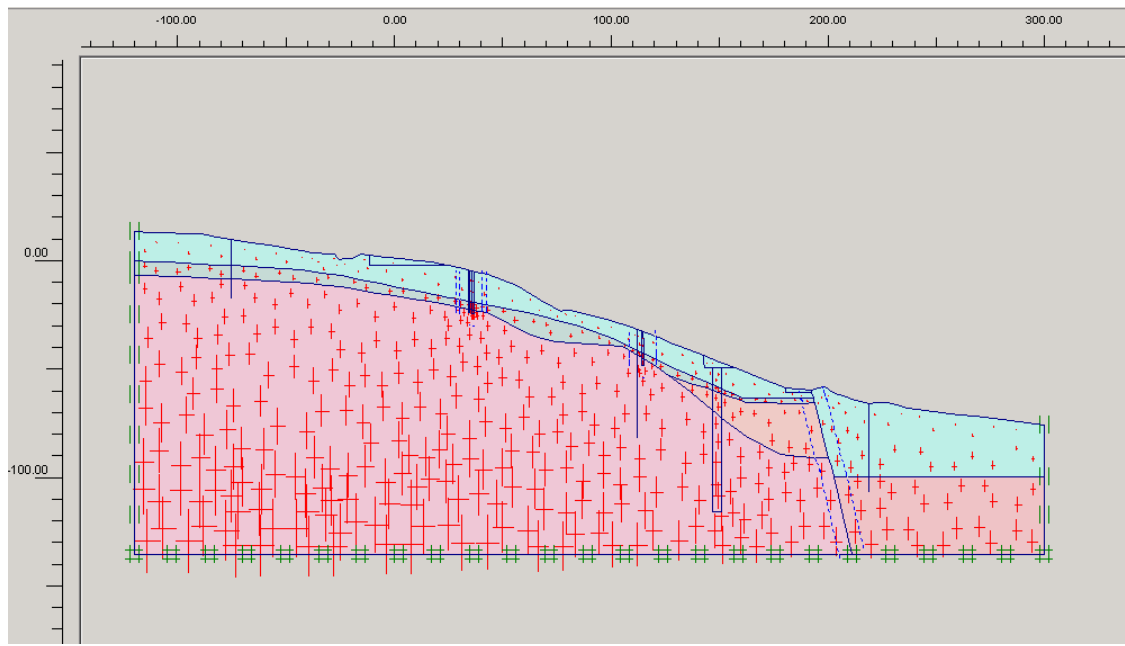
7.1.5 Αρχικές συνθήκες

Μετά την δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου και του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων ορίζεται η αρχική κατάσταση όσο αφορά την πίεση πόρων και τις τάσεις. Και για αυτήν την επιλογή γίνονται δύο αναλύσεις:

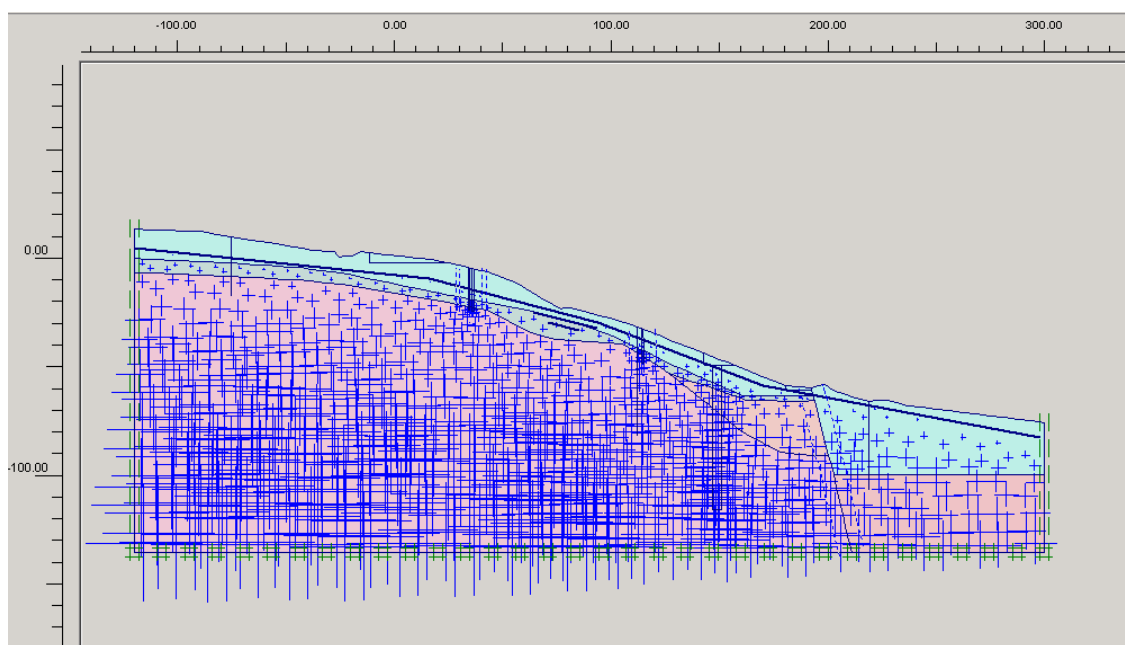
- Στην πρώτη περίπτωση, στο Μοντέλο 1 και στο Μοντέλο 11, δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της πίεσης πόρων οπότε το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα σχεδιάζεται στο κατώτερο σημείο του γεωμετρικού μοντέλου (Σχήμα 7.5) και όλες οι πιέσεις πόρων λαμβάνονται ίσες με μηδέν. Όσο αφορά τις αρχικές τάσεις δημιουργούνται με τον ορισμό του συντελεστή πλευρικής πίεσης K_0 . Στο Σχήμα 7.6 απεικονίζονται αυτές οι τάσεις.
- Στην δεύτερη περίπτωση, στο Μοντέλο 2 και στο Μοντέλο 22, εξετάζονται περιπτώσεις στις οποίες ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στην διεπιφάνεια σχιστολίθων και κορημάτων (Σχήμα 7.7). Αυτό γίνεται για να φανεί η επιρροή του νερού στο σχιστόλιθο και τα κορήματα τα οποία μπορεί να εμφανίσουν μειωμένες παραμέτρους αντοχής, αν παραμείνουν εκτεθειμένα στο νερό για σημαντικό χρονικό διάστημα, και αυτό λόγω της τοπικά αυξημένης περιεκτικότητας τους σε αργιλικό κλάσμα. Τέλος, και σ' αυτήν την περίπτωση οι αρχικές τάσεις δημιουργούνται με τον ορισμό του συντελεστή πλευρικής πίεσης K_0 (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.5 Μοντέλο 1 στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της πίεσης πόρων.



Σχήμα 7.6 Αρχικές τάσεις Μοντέλου 1.



Σχήμα 7.7 Μοντέλο 22, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στην διεπιφάνεια σχιστολίθων και κορημάτων.



Σχήμα 7.8 Αρχικές τάσεις Μοντέλου 22.

7.2 Υπολογισμοί

Σε όλες τις αναλύσεις επιλέγεται ο υπολογιστικός τύπος “plastic” ο οποίος πραγματοποιεί ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Επίσης επιλέγεται ο αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου (load advancement ultimate level).

7.2.1 Υπολογιστικές φάσεις

Παρακάτω αναλύονται οι υπολογιστικές φάσεις και τα χαρακτηριστικά της καθεμίας:

Φάση 1

Στην πρώτη υπολογιστική φάση όλων των μοντέλων εφαρμόζεται το ίδιο το βάρος του υλικού επιλέγοντας την επιλογή των συνολικών πολλαπλασιαστών (total multipliers). Αυτό γίνεται θέτοντας τον συντελεστή του βάρους (Σ -Mweight) ίσο με τη μονάδα. Επίσης ενεργοποιείται η επιλογή της διαγραφής των ενδιάμεσων βημάτων (delete intermediate steps), έτσι ώστε να διαγράφονται όλα τα ενδιάμεσα βήματα και τα αποτελέσματά τους, εκτός από το τελευταίο. Όσο αφορά τους παραμέτρους

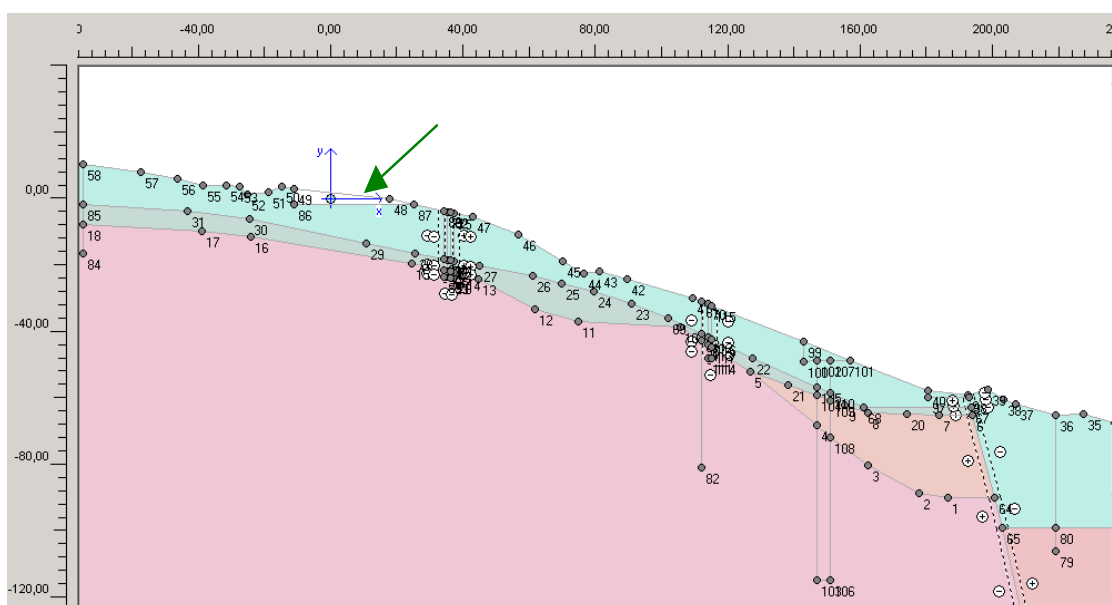
ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας στην πρώτη φάση θέτονται οι παράμετροι όπως φαίνονται στο Πίνακα 7.6 ενώ επιλέγεται και η διαδικασία του ελέγχου μήκους τόξου για την επίτευξη φορτίων αστοχίας.

Πίνακας 7.6: Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας πρώτης φάσης.

Ανεκτό σφάλμα	Υπερχαλάρωση	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	Ελάχιστη	Μέγιστη
0,045	1,2	50	4	10

Φάση 2

Στην δεύτερη υπολογιστική φάση πραγματοποιείται αφαίρεση κορημάτων (Σχήμα 7.9) για την προσομοίωση του υπάρχοντος εργοστασίου με την επιλογή “*stage construction*”. Εκτός από την διαγραφή των ενδιάμεσων βημάτων ενεργοποιείται και η επιλογή του μηδενισμού παραμορφώσεων (reset displacements to zero). Με αποτέλεσμα οι μετατοπίσεις του προηγούμενου βήματος υπολογισμού να μην λαμβάνονται υπόψη στην αρχή της δεύτερης υπολογιστικής φάσης, έτσι ώστε ο νέος υπολογισμός να ξεκινά με μηδενικές αρχικές μετατοπίσεις. Σε αυτήν την φάση, όπως και σε όλες τις επόμενες, ενεργοποιείται η επιλογή “*standard setting*” όσο αφορά τους παραμέτρους ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας.



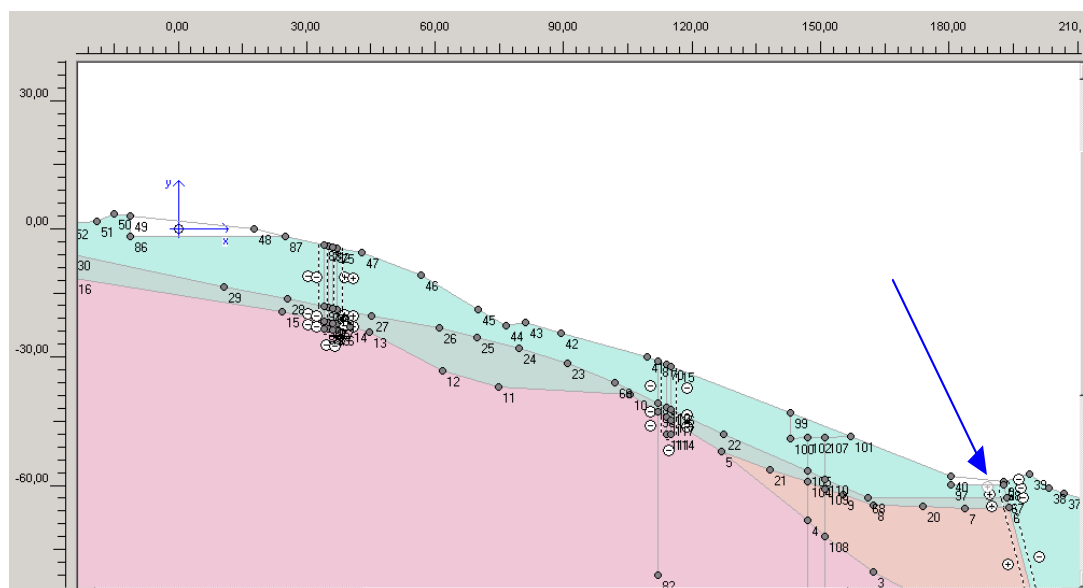
Σχήμα 7.9 Δεύτερη υπολογιστική φάση.

Φάση 3

Σε αυτή τη φάση ενεργοποιείται το φορτίο του εργοστασίου (250.000kN/m^2) θέτοντας στους συνολικούς πολλαπλασιαστές τον συντελεστή του φορτίου ($\Sigma\text{-MloadA}$) ίσο με την μονάδα.

Φάση 4

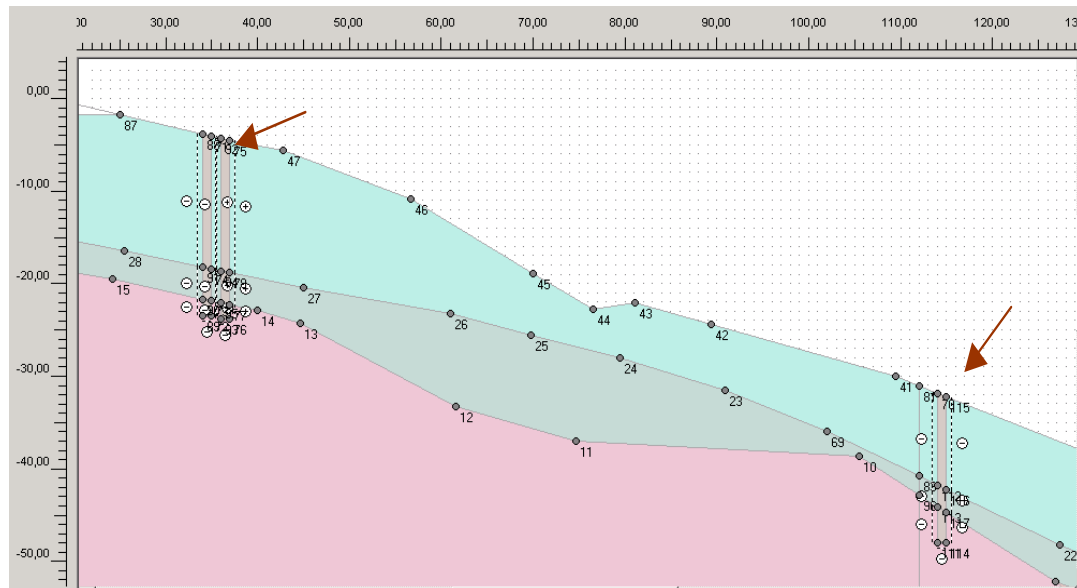
Στην τέταρτη φάση πραγματοποιείται αφαίρεση κορημάτων, έτσι ώστε να προσομοιωθεί το όρυγμα της Δ.Π.Λ.ΑΙ (Σχήμα 7.10).



Σχήμα 7.10 Τέταρτη υπολογιστική φάση.

Φάση 5

Στην πέμπτη υπολογιστική φάση πραγματοποιείται η τοποθέτηση των τριών σειρών πασσάλων (Σχήμα 7.11). Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τις ιδιότητες των υλικών που βρίσκονται σε εκείνα τα σημεία, με τις ιδιότητες των πασσάλων όπως αυτές φαίνονται στον Πίνακα 7.4. Αυτό έγινε διότι η επιλογή που διαθέτει το Plaxis για τους πασσάλους (beams), δεν είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί σε μεταγενέστερη φάση.

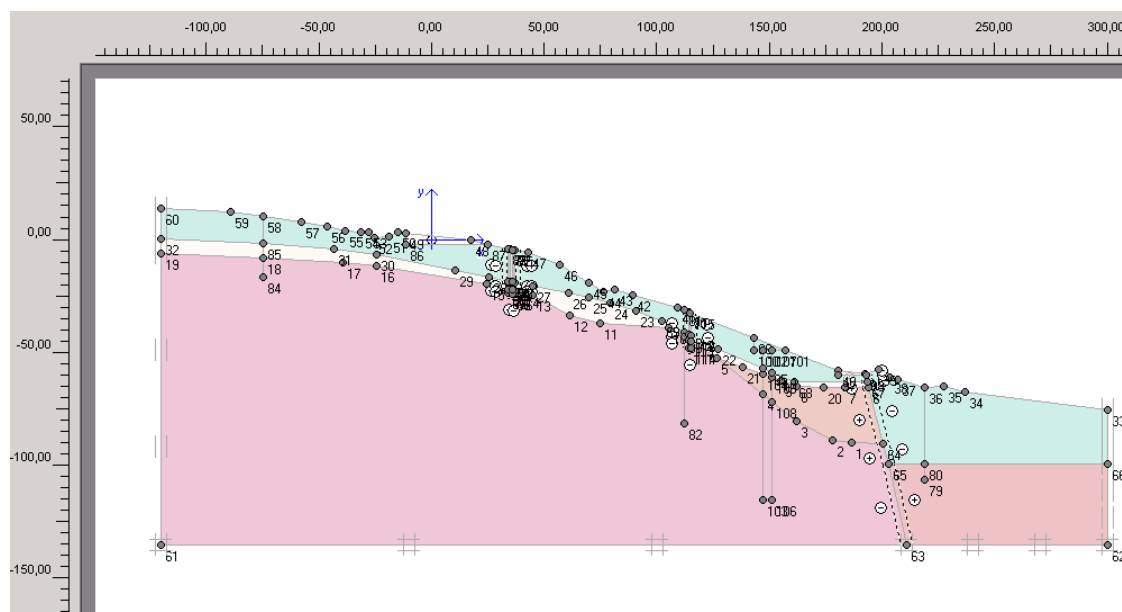


Σχήμα 7.11 Πέμπτη υπολογιστική φάση.

Φάση 6

Εδώ πραγματοποιείται ανάδρομη ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων. Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή των στρωμάτων (Σχήμα 7.12), κορημάτων και σχιστολίθων, αλλάζοντας τις γωνίες εσωτερικής τριβής. Γίνεται μια παραδοχή για τις μετακινήσεις των κλισιομέτρων οι οποίες λαμβάνονται περίπου ίσες με 50mm^1 . Αυτό γίνεται διότι τα κλισιόμετρα, B10 και B11, τα οποία περιέχονται στην τομή B-B έχουν καταστραφεί τελείως. Το B10 καταστράφηκε από τις εργασίες οδοποιίας επί της Δ.Π.Λ.ΑΙ. (οπότε δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη) ενώ το B11 έσπασε από τις 21-9-1999 σε βάθος 6,0-6,5m. Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν οι γωνίες εσωτερικής τριβής του Πίνακα 7.7 για τα κορήματα και τον σχιστόλιθο σε κάθε μοντέλο αντίστοιχα.

¹ Η μετακίνηση 50mm προέκυψε από εκτιμήσεις οι οποίες βασίζονται στην υπό δημοσίευση Διδακτορική διατριβή του κ. Ε. Στειακάκη με τίτλο «Συμπεριφορά Ανοικτών Εκσκαφών Μεγάλου βάθους-Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητας Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου».



Σχήμα 7.12 Έκτη υπολογιστική φάση.

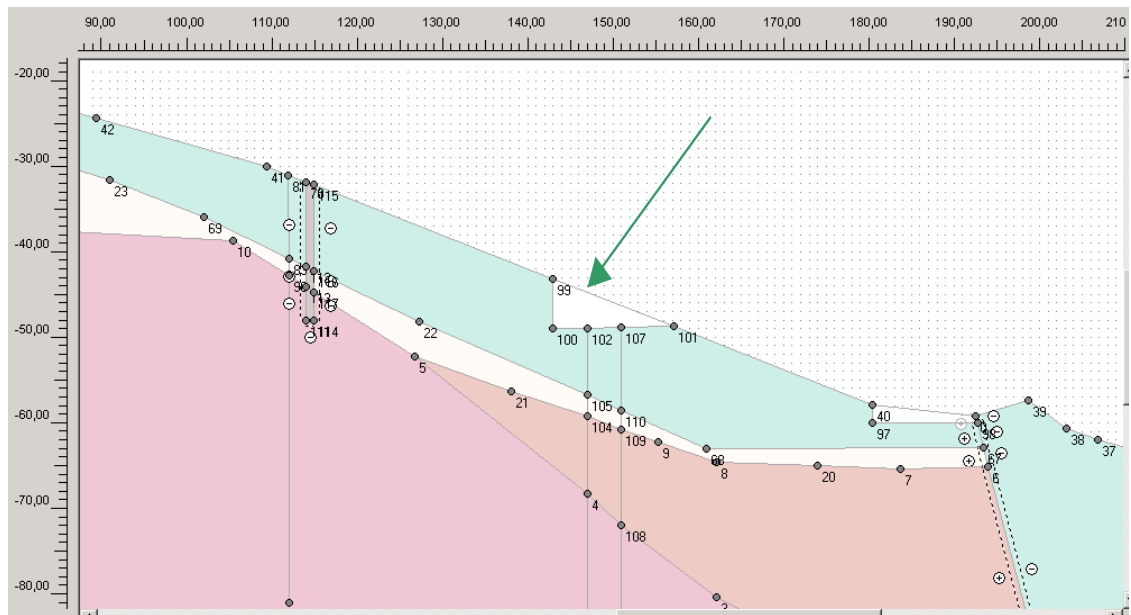
Πίνακας 7.7: Νέες γωνίες εσωτερικής τριβής.

	ϕ^0 (Κορήματα)	ϕ^0 (Σχιστόλιθος)
Μοντέλο 1	18	10
Μοντέλο 11	22	10
Μοντέλο 2	19	13
Μοντέλο 22	22	12

Στο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι στο Μοντέλο 22 έγινε αλλαγή εκτός από την γωνία εσωτερικής τριβής και στη συνοχή των κορημάτων και του σχιστόλιθου. Στα κορήματα η νέα τιμή είναι 30kN/m^2 και στον σχιστόλιθο 40kN/m^2 .

Φάση 7

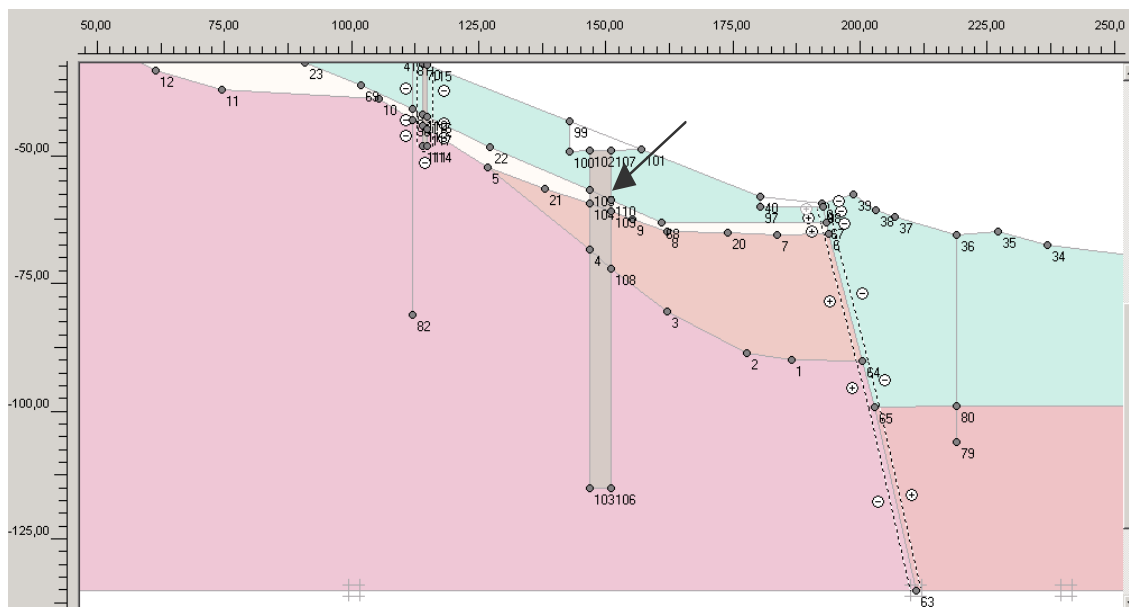
Στην έβδομη φάση των αναλύσεων πραγματοποιείται αφαίρεση των κορημάτων (Σχήμα 7.13) για την τοποθέτηση του πασσάλου στην τελευταία φάση, στον οποίο θα στηριχθεί η γέφυρα της σιδηροδρομικής γραμμής.



Σχήμα 7.13 Έβδομη υπολογιστική φάση.

Φάση 8

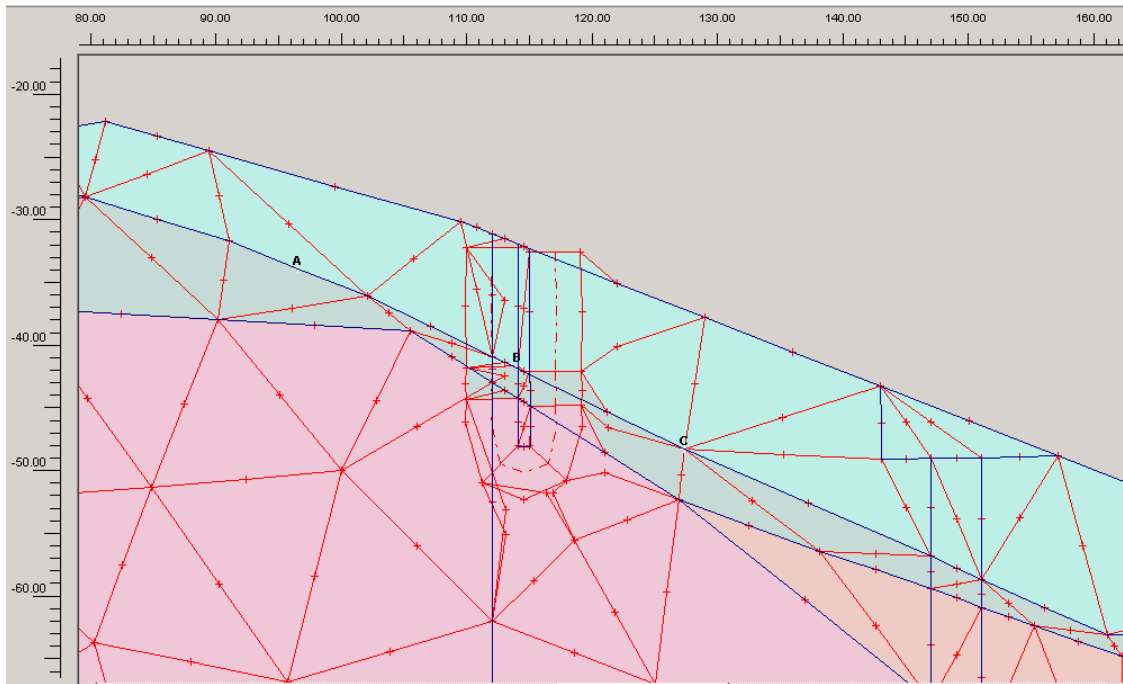
Στην τελευταία φάση των αναλύσεων πραγματοποιείται αλλαγή των ιδιοτήτων των υλικών που βρίσκονται στα σημεία χάραξης της γραμμής, με τις ιδιότητες των πασσάλων (Σχήμα 7.14).



Σχήμα 7.14 Όγδοη υπολογιστική φάση.

7.2.2 Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων

Για την δημιουργία των καμπυλών όσο αφορά τις μετατοπίσεις επιλέγονται τα παρακάτω σημεία A, B, C όπως φαίνονται στο Σχήμα 7.15. Τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Στο υποκεφάλαιο 7.4 απεικονίζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για την ερμηνεία της (μη γραμμικής) σχέσης του φορτίου και των τελικών μετατοπίσεων των σημείων.



Σχήμα 7.15 Επιλογή σημείων A,B για την δημιουργία των καμπυλών.

7.3 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε μοντέλο ξεχωριστά. Στο Πίνακα 7.9 φαίνονται οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις σε κάθε φάση, στη περιοχή του B11 κλισιομέτρο.

7.3.1 Διαγράμματα σε τομές του μοντέλου

Για την απεικόνιση της κατανομής των μετατοπίσεων κατά μήκος του κλισιομέτρου B11 μέσα στη μάζα του μοντέλου σχεδιάζονται τομές αυτού. Στις τομές αυτές οι ποσότητες που απεικονίζονται προκύπτουν από παρεμβολή των δεδομένων των

κόμβων. Στο Σχήμα 7.16 φαίνεται τομή κατά μήκος του κλισιομέτρου B11, στο Μοντέλο 22, στη φάση 8.

Πίνακας 7.9: Μέγιστες μετατοπίσεις B11 κλισιομέτρου.

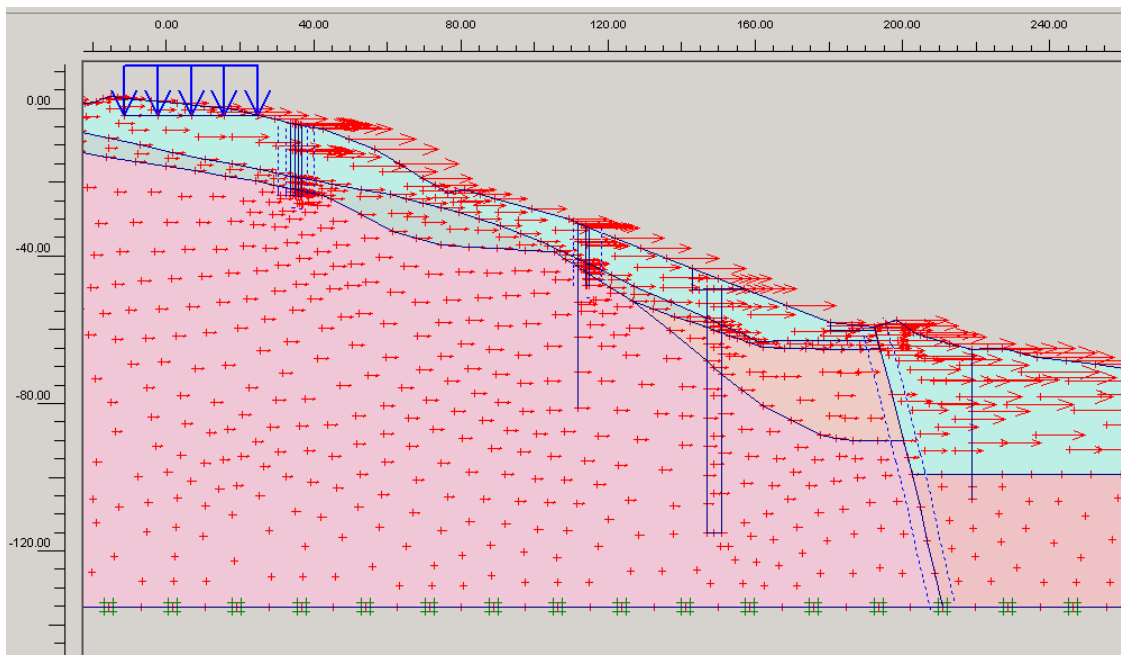
Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις B11 κλισιομέτρου (mm)				
Φάση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 11	Μοντέλο 2	Μοντέλο 22
Φάση 1	11,08	11,21	14,98	17,08
Φάση 2	0,15	0,05	0,69	1,22
Φάση 3	0,41	0,31	1,45	15,69
Φάση 4	0,44	0,39	1,49	15,55
Φάση 5	0,47	0,35	1,55	15,68
Φάση 6	52,76	50,39	47,36	51,32
Φάση 7	53,49	49,41	48,61	53,41
Φάση 8	53,64	49,64	48,23	52,20



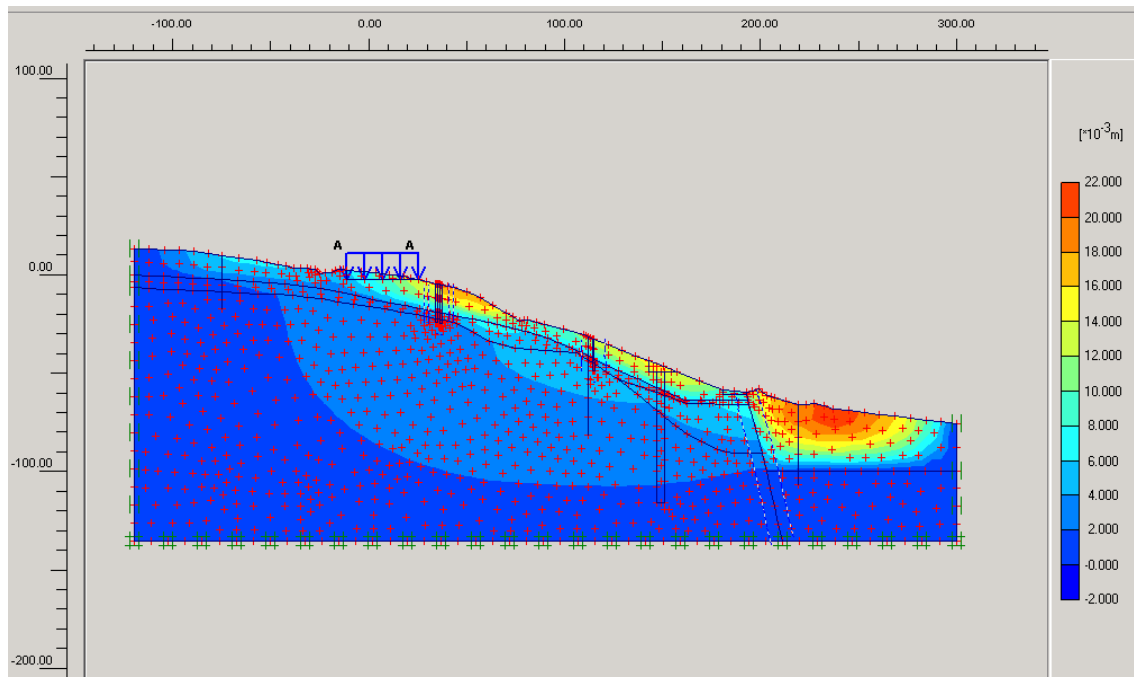
Σχήμα 7.16 Τομή κατά μήκος του κλισιομέτρου B11, στο Μοντέλο 22.

Στα σχήματα 7.17 – 7.24 απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις. Επιλέγονται ενδεικτικά η πρώτη και η τελευταία φάση των Μοντέλων 1 και 22. Στο Σχήμα 7.17 απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις της πρώτης φάσης του Μοντέλου 1, κοντά στο κλισιόμετρο B11 ενώ στο Σχήμα 7.19 της όγδοης φάσης. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις της οριζόντιας παραμόρφωσης του Μοντέλου 1, στην πρώτη φάση, φαίνονται στο Σχήμα 7.18 και της όγδοης στο Σχήμα 7.20.

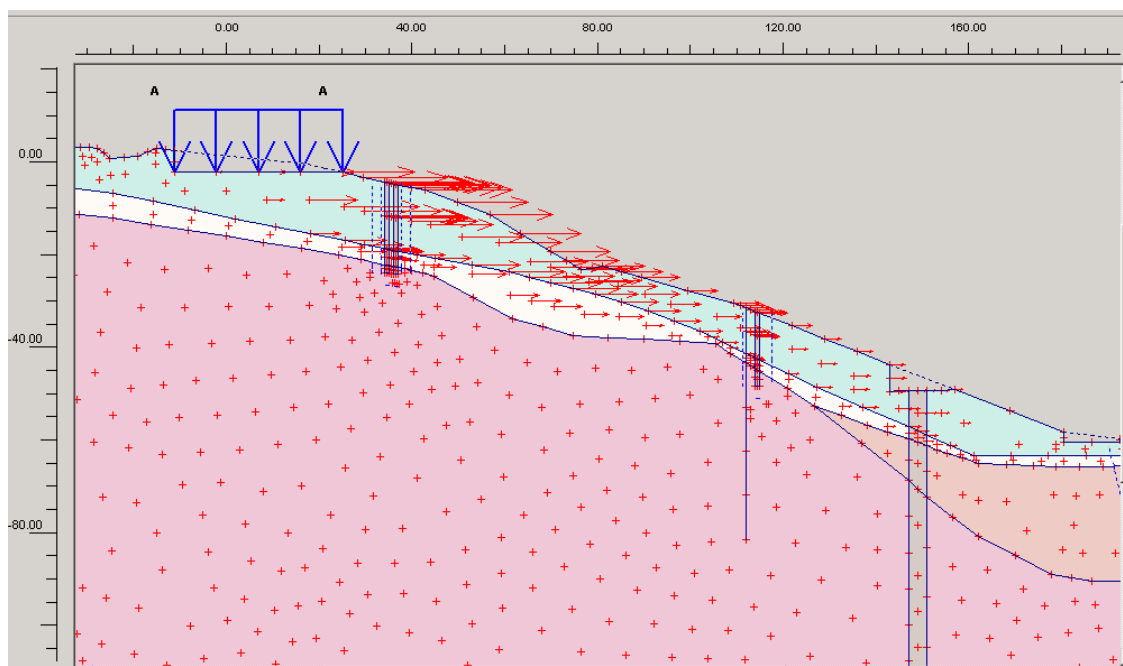
Αντίστοιχα για το Μοντέλο 22 οι οριζόντιες μετατοπίσεις του φαίνονται στα Σχήματα 7.21, 7.22, 7.23, 7.24.



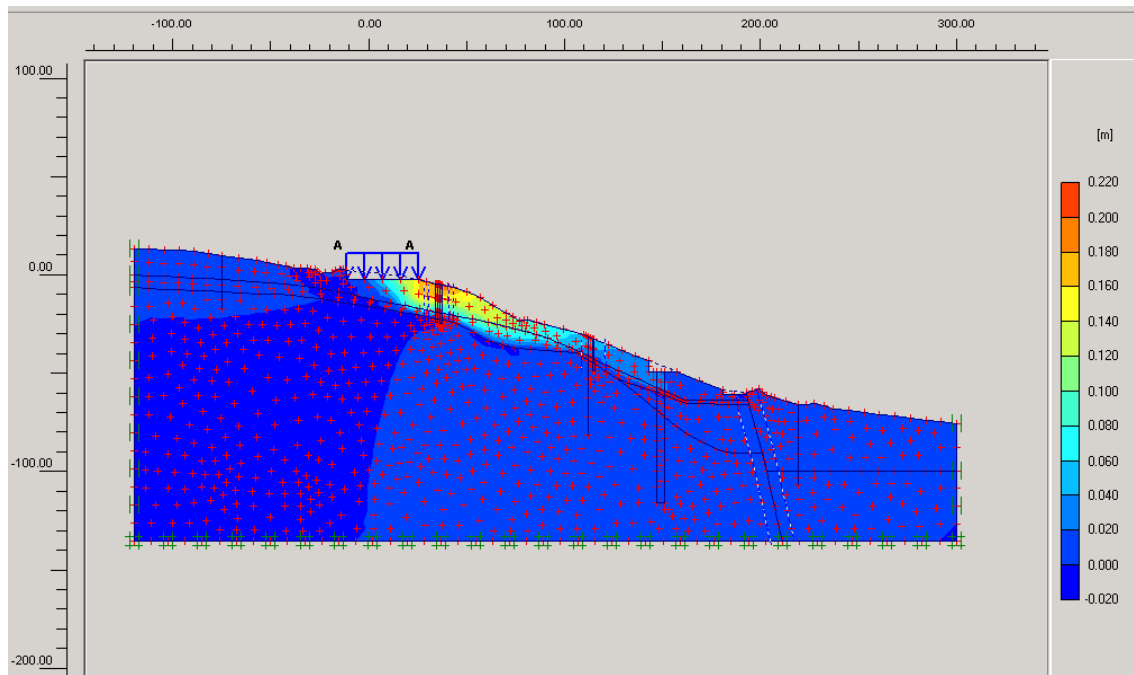
Σχήμα 7.17 Οριζόντιες μετατοπίσεις της πρώτης φάσης του Μοντέλου 1.



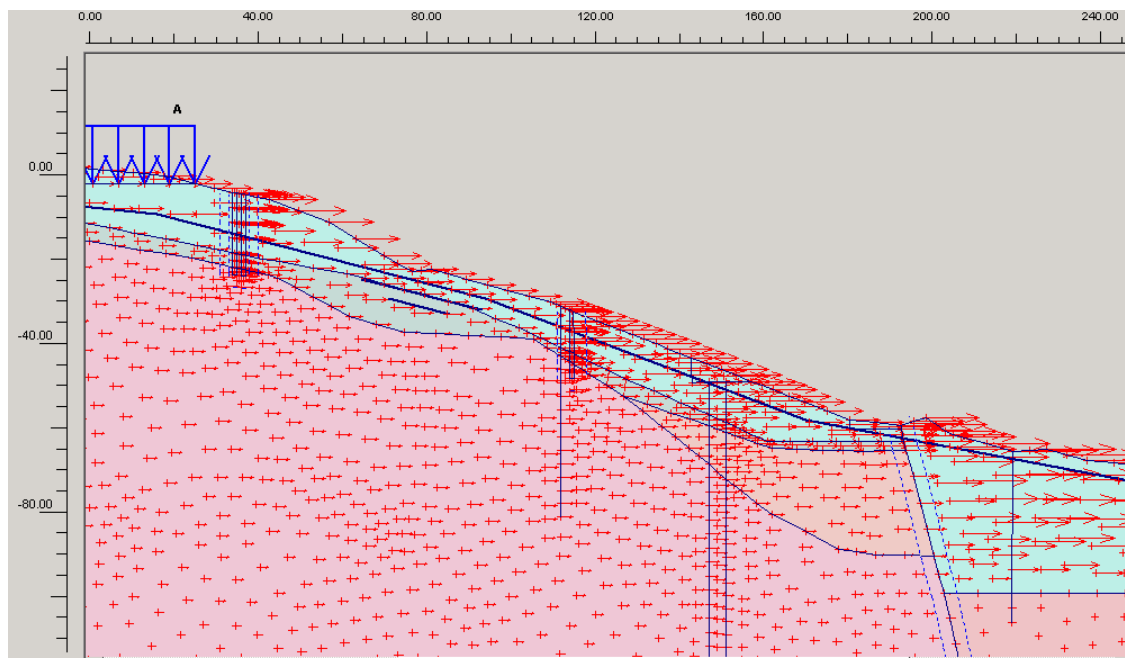
Σχήμα 7.18 Χρωματικές διαβαθμίσεις της οριζόντιας παραμόρφωσης του Μοντέλου 1, στην πρώτη φάση.



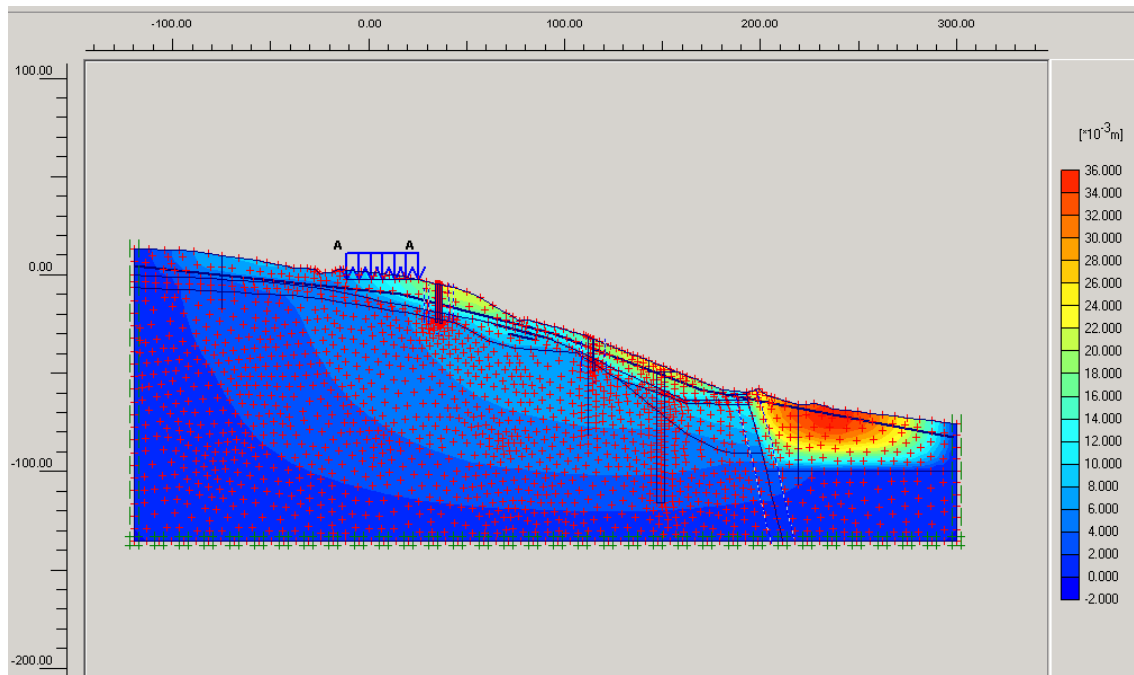
Σχήμα 7.19 Οριζόντιες μετατοπίσεις της όγδοης φάσης του Μοντέλου 1.



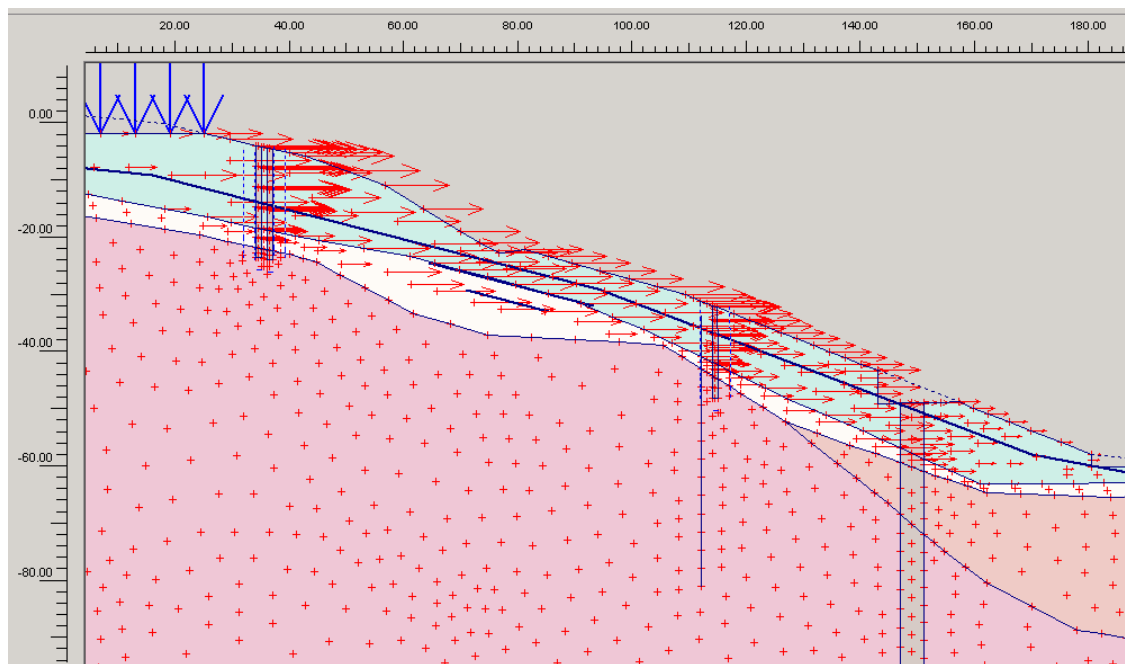
Σχήμα 7.20 Χρωματικές διαβαθμίσεις της οριζόντιας παραμόρφωσης του Μοντέλου 1, στην όγδοη φάση.



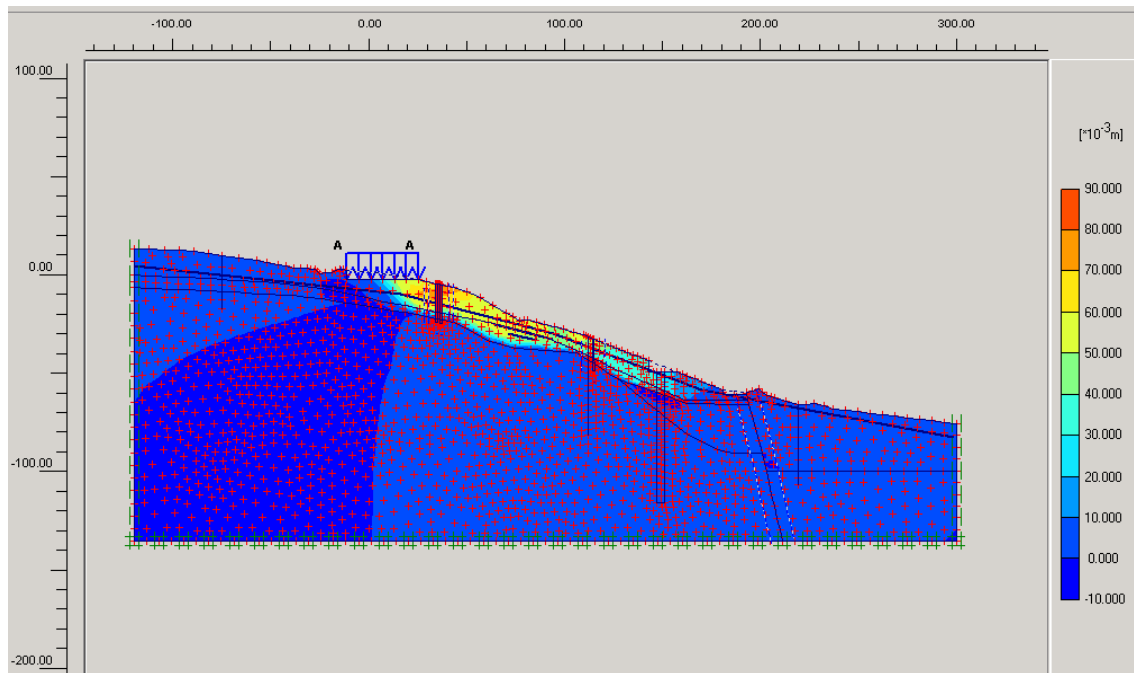
Σχήμα 7.21 Οριζόντιες μετατοπίσεις της πρώτης φάσης του Μοντέλου 22.



Σχήμα 7.22 Χρωματικές διαβαθμίσεις της οριζόντιας παραμόρφωσης του Μοντέλου 22, στην πρώτη φάση.



Σχήμα 7.23 Οριζόντιες μετατοπίσεις της όγδοης φάσης του Μοντέλου 22.



Σχήμα 7.24 Χρωματικές διαβαθμίσεις της οριζόντιας παραμόρφωσης του Μοντέλου 22, στην όγδοη φάση.

Στο Μοντέλο 1 και 11 όπου επιλέγεται το πυκνό επίπεδο πύκνωσης και το πολύ πυκνό αντίστοιχα και επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη η πίεση πόρων, παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις των πέντε πρώτων φάσεων είναι σχεδόν ίδιες. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.7 οι γωνίες εσωτερικής τριβής του σχιστολίθου παραμένουν ίδιες ενώ των κορημάτων αλλάζουν. Αυτό δείχνει ότι το Μοντέλο 11 με το πυκνότερο επίπεδο πύκνωσης προσομοιώνει το πρόβλημα καλύτερα αφού τα κορήματα παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη ϕ ως πιο ασταθή υλικά. Στις πρώτες φάσεις αυτών των μοντέλων οι μετατοπίσεις είναι ελάχιστες. Στην έκτη φάση με το σπάσιμο των κλισιομέτρων εκτιμάται η επιφάνεια ολίσθησης, που όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.20 βρίσκεται στα πάνω στρώματα του σχιστολίθου και στην διεπιφάνεια σχιστολίθου – κορημάτων.

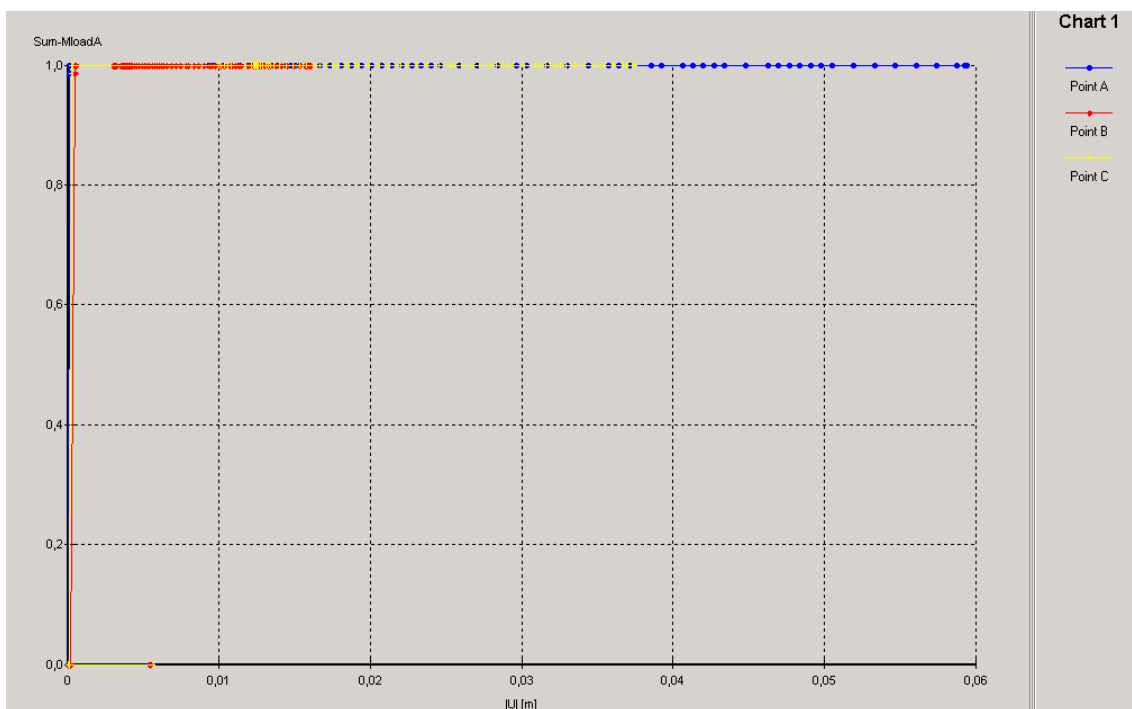
Στα Μοντέλα 2 και 22, στα οποία ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κοντά στην διεπιφάνεια κορημάτων – σχιστολίθου παρατηρούνται πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις στα πρώτα στάδια σε σχέση με τα Μοντέλα 1 και 11. Αυτό δείχνει την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα και βοηθά στην κατανόηση της αναγκαιότητας των αποστραγγιστικών έργων. Οι νέες γωνίες εσωτερικής τριβής ϕ είναι μεγαλύτερες των προηγούμενων μοντέλων. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα μιας και ο υδροφόρος ορίζοντας δημιουργεί μεγαλύτερη αστάθεια στα υλικά. Στο Σχήμα 7.24

εκτιμάται η επιφάνεια ολίσθησης στα άνω στρώματα του σχιστολίθου και στην διεπιφάνεια σχιστολίθου – κορημάτων.

7.4 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης

Μετά την επιλογή των σημείων A, B και C κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης δημιουργούνται καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για την ερμηνεία της (μη γραμμικής) σχέσης του φορτίου και των τελικών μετατοπίσεων των σημείων αυτών. Ως αντιπροσωπευτικά μοντέλα επιλέγονται τα Μοντέλα 1 και 22.

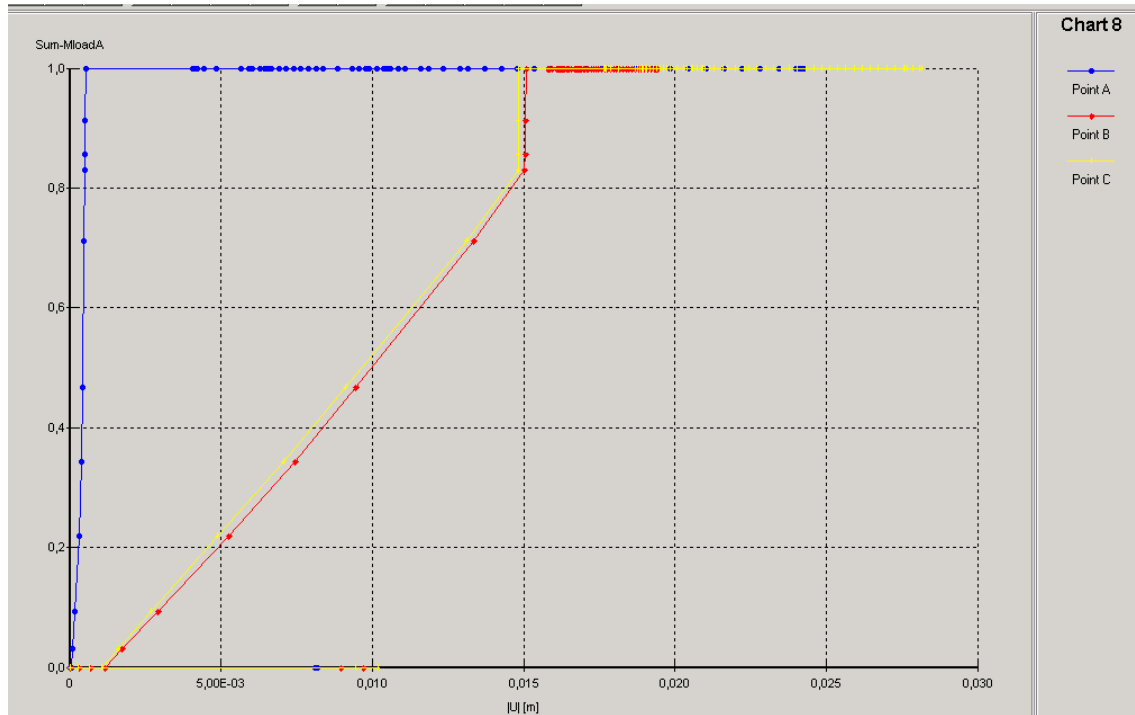
Στο Σχήμα 7.25 παρατηρούνται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης του Μοντέλου 1 και για τα τρία σημεία μαζί. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι καμπύλες είναι σχεδόν ίδιες αλλά διαφέρουν στο μέγεθος των μετατοπίσεων. Δηλαδή στο σημείο B το οποίο είναι κοντά στον πάσσαλο οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες ενώ στο σημείο A, το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια ολίσθησης οι μετατοπίσεις είναι σχεδόν τριπλάσιες.



Σχήμα 7.25 Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης Μοντέλου 1.

Στο Σχήμα 7.26 παρατηρούνται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης του Μοντέλου 22 και για τα τρία σημεία μαζί. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι καμπύλες διαφέρουν και αυτό οφείλεται διότι η λύση στο Μοντέλο 22 επιτυγχάνεται σε περισσότερα βήματα

στην τρίτη και τέταρτη φάση. Αυτό οφείλεται στο πολύ πυκνό επίπεδο πύκνωσης. Στο σημείο B το οποίο είναι κοντά στον πάσσαλο οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες ενώ στα σημεία A και C, τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια ολίσθησης, οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες.



Σχήμα 7.26 Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης Μοντέλου 22.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Ευστάθεια δυτικού πρανούς

Από την μελέτη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τα προβλήματα ευστάθειας του Δυτικού πρανούς του όρους Αιγάλεω εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η επιφάνεια ολίσθησης εμφανίζεται μέσα στον σχιστόλιθο και στην διεπιφάνεια σχιστολίθου – κορημάτων. Η κατολίσθηση (η ασθενής μάζα) φαίνεται να ξεκινά από την περιοχή του εργοστασίου και να φτάνει ως την περιοχή όπου έχει οριστεί η γραμμή της σιδηροδρομικής γραμμής.
- Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στην διεπιφάνεια σχιστολίθου – κορημάτων η ασθενής μάζα προεκτείνεται προς τα κάτω φτάνοντας σχεδόν μέχρι την Δ.Π.Λ.ΑΙ. Οι μέγιστες μετακινήσεις σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγαλύτερες. Αυτό γίνεται κατανοητό αφού για να αποκτηθούν οι επιθυμητές μετατοπίσεις στο κλισιόμετρο B11, στη φάση 6, η μείωση των γωνιών εσωτερικής τριβής είναι μικρότερη. Αυτό δείχνει μεγαλύτερη αστάθεια διότι με μικρότερη ελάττωση των ϕ αποκτήθηκαν οι επιθυμητές μετατοπίσεις.
- Το πρανές κατάντη της σιδηροδρομικής γραμμής και η Δ.Π.Λ.ΑΙ φαίνεται να είναι ευσταθές. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη η πίεση πόρων. Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στην διεπιφάνεια σχιστολίθου – κορημάτων στο ύψος της σιδηροδρομικής γραμμής οι μετακινήσεις είναι αρκετά μεγάλες ενώ η Δ.Π.Λ.ΑΙ. παρουσιάζει αρκετά μικρότερες μετατοπίσεις με αποτέλεσμα να εμφανίζεται πιο ευσταθής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μειονέκτημα της παρούσας εργασίας αποτελεί η έλλειψη πραγματικών τιμών μετατοπίσεων των κλισιομέτρων. Υπάρχουν μόνο μετρήσεις

κοντά στη χρονολογία τοποθέτησης και μετά υπάρχει η παρατήρηση ότι αυτά έσπασαν.

Έτσι υπάρχει η ανάγκη να γίνει μια παραδοχή ως προς την οριζόντια μετατόπιση, η οποία αποτέλεσε την αιτία αστοχίας των κλισιομέτρων. Με βάση αυτήν την παραδοχή γίνεται η ανάδρομη ανάλυση από την οποία προκύπτουν τα παραπάνω συμπεράσματα.

8.2 Περιορισμοί κατά την εφαρμογή της αριθμητικής επίλυσης

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου στο λογισμικό Plaxis παρουσιάστηκαν τα εξής προβλήματα:

Το γεγονός ότι επιθυμείται η προσομοίωση του μοντέλου με αρχική φάση την επίδραση του ίδιου του βάρους του υλικού θέτει τους παρακάτω περιορισμούς όσο αφορά την τοποθέτηση των στοιχείων που αφορούν το πρόβλημα.

- Για την τοποθέτηση των πασσάλων δεν χρησιμοποιείται η επιλογή του Plaxis για τους πασσάλους (beams) διότι δεν είναι δυνατή η ενεργοποίηση τους σε μεταγενέστερο στάδιο, όπως είναι επιθυμητό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων των υλικών με άλλα τα οποία αντιπροσώπευαν τα υλικά των πασσάλων.
- Η προσομοίωση της γέφυρας δεν είναι δυνατή διότι δεν είναι δυνατόν να τεθούν οι πάσσαλοι ως αμετακίνητα υλικά σε μεταγενέστερο στάδιο.
- Όταν γίνεται μεγάλη πύκνωση του καννάβου, το οποίο πιθανόν προσομοιώνει το πρόβλημα με μεγαλύτερη ακρίβεια, το μοντέλο παρουσιάζεται ασταθές, δηλαδή απαιτείται αύξηση του μέγιστου σφάλματος για την επίλυση του.

Από τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων στο κλισιόμετρο ως καλύτερη διαδικασία μοντελοποίησης εμφανίζεται αυτή με το πολύ πυκνό επίπεδο πύκνωσης και χωρίς την επίδραση της πίεσης πόρων.

8.3 Προτάσεις

- Θα ήταν επιθυμητό να υπάρχει καλύτερο ιστορικό μετακινήσεων του πρανούς, δηλαδή πυκνότερος κάρναβος κλισιομέτρων και τακτικότερες μετρήσεις.
- Το επόμενο βήμα μετά την οριστικοποίηση της ανάδρομης ανάλυσης και των προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων και εδαφικών επιφανειών που επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς είναι να γίνει η διαστασιολόγηση των πασσάλων απάνω στους οποίους θα κατασκευαστεί η γέφυρα, η οποία προτείνεται από τον μελετητή, από την ΕΡΓΟΣΕ, ώστε να μην υποστεί διαταραχή η χάραξη της γραμμής του τρένου σε πιθανή μετακίνηση της επιφάνειας του πρανούς. Η διαστασιολόγηση των πασσάλων εξαρτάται άμεσα από τις οριζόντιες δυνάμεις, με την υπόθεση ότι οι πάσσαλοι θα φτάσουν και θα θεμελιωθούν σε υγιές έδαφος. Οι διαστάσεις τους εξαρτούνται από τις οριζόντιες μετακινήσεις στις οποίες πρέπει να αντέξουν. Οι οριζόντιες αυτές μετακινήσεις είναι συνάρτηση της ανάλυσης κινητικότητας του πρανούς, η οποία είναι με τη σειρά της συνάρτηση των ιδιοτήτων και της γεωμετρίας επίλυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις “ΙΩΝ”, Αθήνα.
2. Αναγνωστόπουλος, Χ. (1988). “Αντιμετώπιση των Κατολισθήσεων με Πασσάλους”. Διδακτορική Διατριβή Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
3. Βαλαλάς, Δ (1984). “Γεωτεχνική Μηχανική–Υποδομή των Τεχνικών Έργων”. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
4. Βασιλόπουλος, Ε. (1982). “Παράμετροι Σχεδιασμού Θεμελιώσεων”. Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων, σελ. 229-241.
5. ΕΡΓΟΣΕ (2003). “Αρχείο Φωτογραφικού Υλικού”, Αθήνα.
6. Καββαδάς, Μ. (2000). “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”. Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Καλογήρου, Ε. (2003). “Παραμετρική Ανάλυση Ευστάθειας Εδαφικών Πρανών με τη Χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Κούκης, Γ. και Κ. Ζιούρκας (1989). “Κατολισθητικές Κινήσεις στον Ελληνικό χώρο. Στατιστική Θεώρηση”. Ορυκτός Πλούτος, 58, σελ. 73-76.
9. Κουμαντάκης, Ι. (1984). “Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας”, Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Όμιλος Τεχνικών Μελετών (Ο.Τ.Μ.) (2001). “Μελέτη Μέτρων Αντιμετώπισης Κατολίσθησης Λ. Αιγιάλεω”, Δεκέμβριος 2001.

11. Όμιλος Τεχνικών Μελετών (Ο.Τ.Μ.) (1998). “Αξιολόγηση Ερευνητικών Εργασιών Περιοχής Κατολίσθησης Λ. Αιγάλεω”, Νοέμβριος 1998.
12. Παραθύρας, Α. και Η. Μιχάλης (2001). “Ένναλακτικές Λύσεις Σταθεροποίησης Κατολίσθησης”. Πρακτικά 4^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Μάιος 30 – Ιούνιος 1, σελ. 459-462.
13. Ρίτσος, Α, Α. Μπασδέκης και Σ. Παπασπύρου (2000). “Εφαρμογή των Αποκλισιομέτρων στο Σχεδιασμό Σημαντικών Γεωτεχνικών Έργων”. 4^ο Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Μάιος 30 – Ιούνιος 1, σελ. 187-194.
14. Στειακάκης, Ε. (2003). “Συμπεριφορά Ανοικτών Εκσκαφών Μεγάλου Βάθους – Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητας Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
15. Τσότσος, Σ (1991). “Εδαφομηχανική”. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Διεθνής

16. Baligh, M.M. and A.S. Azzouz (1975). “End Effects on Stability of Cohesive Slopes”, J.G.E.Div., ASCE, 101 (GT11), pp.1105-1117.
17. Bishop, A.W. (1955). “The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes”, Geotechnique, 5(1), pp.7-17.
18. Bromhead, E.N. (1986). “The Stability of Slopes”, Surrey Univ. Press.
19. Broms, B.B (1975). “Landslides”, ch.11 of Foundation Engineering Handbook, ed. Winterkorn, H. and H. Fang, Van Norstrand-Reinhold Co.
20. Cambefort, H. (1963, 1964). “Stabilité des terrains”. Revue Sol-Soils, Paris.
21. Chen, W.F. and D.J. Han (1998). “Plasticity for Structural Engineering”, Springer – Verlag, New York.

22. Craig, R.F. (1997). "Soil Mechanics", Department of Civil Engineering, University of Dundee.
23. Cruden, M.D. and D.J. Varnes (1992). "Landslide Types and Processes", Landslide: Investigation and Mitigation. Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Chapter 3.
24. Fagan, M.J. (1996). "Finite Element Analysis, Theory and Practice", Longman.
25. Fang, H.Y. (1975). "Stability of Earth Slopes", ch.10 of Foundation Engineering Handbook, ed. Winterkorn H. & Fang H., Van Norstrand Reinhold Co.
26. Griffiths, D.V. and P.A. Lane (1999). "Slope Stability Analysis by Finite Elements". *Géotechnique* 49, No.3, pp. 387-403.
27. Janbu, N. (1973). "Slope Stability Computations", Embankment & Dam Engineering, Casagrande Memorial Volume, ed. Hirschfield & Poulos, J. Wiley, New York, pp.47-86.
28. Kim, J.Y. and S.R. Lee (1997). "An Improved Search Strategy for the Critical Slip Surface using Finite Element Stress Fields". Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, pp.305-701.
29. Lowe, J. and L. Karafiath (1960). "The Stability of Earth Dams upon Drawdown", Proc. 1st Pan. Am. Conf. S.M.F.E., Mexico, 2, pp.537-560.
30. Morgenstern, N.R. and V.E. Price (1965). "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces", *Geotechnique*, 15, pp. 79-93.
31. Nash, D. (1987). "A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis", "Slope stability", chapter 2, Department of Civil Engineering University of Bristol.
32. Skempton, A. W. and J. Hutchinson (1969). "Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations", Proc. 7th Int.Conf. S.M.F.E., State-of-the-Art Volume, Mexico, pp.291-340.

33. Skempton, A. W. (1954). "The Pore Pressure coefficients A and B", *Geotechnique*, IV, pp.143-147.
33. Spencer, E.E. (1967). "A Method of the Analysis of Embankments assuming Parallel Interslice Forces", *Geotechnique*, 17, pp. 11-26.
34. Spyrakos, C.C. (1996). "Finite Element Modeling in Engineering Practice", Algor Publishing Division, Pittsburgh.
35. Zaruba, Q. and V. Mencl (1969). "Landslide and their Control", Elsevier Publ., Amsterdam.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ