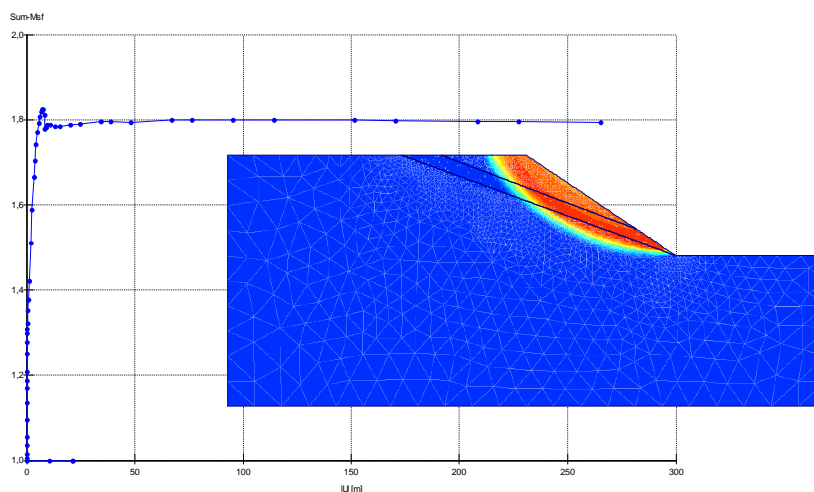




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ ΛΙΓΝΙΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ**



ΤΣΑΙΜΟΥ ΑΝΘΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής

Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής

Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

Μηχανικός Γεωλόγος

ΕΜΜ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2006

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του προβλήματος της κατολίσθησης των πρανών και η επιλύσή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού πακέτου Plaxis. Το λογισμικό πακέτο Plaxis v7.2 που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό, επιλύει γεωτεχνικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις.

Πραγματοποιήθηκε μια απλή προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας εδαφικών πρανών με την κατασκευή ενός θεωρητικού προσομοιώματος και διαδοχικών επιμέρους επιλύσεων ίδιας εξωτερικής γεωμετρίας με διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των εδαφικών υλικών, το μοντέλο συμπεριφοράς τους και την υδροφορία. Ακολουθώντας, σε μια δεύτερη ομάδα επιλύσεων, διαφοροποιήθηκε η αρχική γεωμετρία του εδαφικού προσομοιώματος καθώς και η διαδικασία επίλυσης, δεδομένου ότι το μοντέλο-πρανές (προσομοίωμα) προσομοιώθηκε ως αποτέλεσμα της ύπαρξης σταδιακών εκσκαφών σε μια τομή με αρχικά οριζόντια επιφάνεια.

Στη συγκεκριμένη εργασία οι αρχικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών βασίζονται σε στοιχεία από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή της Μαυροπηγής στο Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου και τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να μελετηθεί η επίδρασή τους στην ευστάθεια και την παραμορφωσιμότητα των πρανών.

Τέλος έγινε προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις επιμέρους επιλύσεις του λογισμικού πακέτου Plaxis, καθώς και με συμπεράσματα και προτάσεις.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση και την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους:

- **κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη**, Επιβλέποντα Καθηγητή, για την άριστη συνεργασία που είχαμε, την εμπιστοσύνη απέναντι στο πρόσωπο μου καθώς και τη βοήθειά του στην συγγραφή και ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.
- **κ. Γιώργο Εξαδάκτυλο**, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε και για το χρόνο που διέθεσε για να είναι μέλος της εξεταστικής επιτροπής.
- **κ. Μάριο Λεονάρδο**, Διπλωματούχο Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό του ΕΜΠ, που μου πρότεινε το θέμα της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με αυτή του την απόφαση, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε αλλά και για τη βοήθειά του στη συγκέντρωση δεδομένων και βιβλιογραφίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον **κ. Μανώλη Στειακάκη** για την πολύτιμη βοήθειά του στο γνωστικό αντικείμενο των κατολισθήσεων, την **Ειρήνη Καλογήρου**, για την καθημερινή και άριστη συνεργασία μας, την υπομονή της, τη βοήθειά της στην καλύτερη κατανόηση του λογισμικού πακέτου Plaxis και τις πολύ χρήσιμες συμβουλές της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, **Σπύρο** και **Χρυσάνθη**, που αν και χιλιόμετρα μακριά μου, με συμβούλευαν και εμπύχωναν καθημερινά, βοηθώντας με να φέρω εις πέρας την εργασία αυτή καθώς και όλους τους φίλους μου που στάθηκαν στο πλευρό μου.

Χανιά, 2006

Ανθή Σπ. Τσάιμου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	II
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Τύποι αστοχίας	4
2.2.1 Αστοχία Ολίσθησης	4
2.2.2 Αστοχία Κατάπτωσης	6
2.2.3 Αστοχία Ανατροπής	6
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια πρανών	6
2.3.1 Φυσικοί Παράγοντες	7
2.3.1.1 Διάβρωση	7
2.3.1.2 Υπόγεια Νερά	8
2.3.1.3 Θερμοκρασία	8
2.3.1.4 Εντατική κατάσταση	9
2.3.1.5 Σεισμοί	9
2.3.1.6 Στιγματικές τάσεις	9
2.3.1.7 Χλωρίδα - Πανίδα	9
2.3.1.8 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά πρανούς	9
2.3.2 Ανθρωπογενή Αίτια	10
2.3.2.1 Εξωτερικά αίτια	10
2.3.2.2 Κατασκευαστικές δραστηριότητες	10
2.3.2.3 Αφαίρεση υποστήριξης	11
2.3.2.4 Πρόσθετη φόρτιση	11
2.4 Τρόποι Αντιμετώπισης	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ	14
3.1 Γενικά	14
3.2 Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας	15
3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	18
3.3.1 Γενικά	18
3.3.2 Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου	20
3.3.3 Διάρθρωση μεθόδου	20
3.3.4 Χρήσιμες παρατηρήσεις κατά τη χρήση της μεθόδου	22
3.4 Βασικά στάδια μεθόδου	22
3.4.1 Διακριτοποίηση	22

3.4.2 Συναρτήσεις μορφής.....	23
3.4.3 Καταστατικές εξισώσεις.....	24
3.4.4 Συνοριακές συνθήκες.....	24
3.5 Σύγκριση Μεθόδων	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	30
4.1 Γεωλογία – Τεκτονική περιοχής	30
4.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ειδικότερα για την περιοχή της Μαυροπηγής	32
4.3 Γεωτεχνική έρευνα	33
4.4 Υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ PLAXIS	36
5.1 Γενικά	36
5.2 Εισαγωγή δεδομένων	36
5.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας	37
5.2.2 Ιδιότητες υλικών	38
5.2.2.1 Τύπος εδαφικού μοντέλου	38
5.2.2.2 Συμπεριφορά υλικών όσο αφορά την αποστράγγιση	42
Στραγγιζόμενη συμπεριφορά υλικών	42
Μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά υλικών	43
Μη πορώδη υλικά	43
5.2.2.3 Χαρακτηριστικά υλικών.....	44
5.2.3 Κριτήρια αστοχίας γεωϋλικών	48
5.2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb	48
5.2.3.2 Κριτήριο αστοχίας Von Misses	51
5.2.3.3 Κριτήριο αστοχίας Tresca	52
5.2.3.4 Κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager.....	53
5.2.4 Συνοριακές συνθήκες.....	54
5.2.5 Διακριτοποίηση	55
5.2.6 Υδρολογικές συνθήκες.....	55
5.3 Υπολογισμοί.....	56
5.4 Αποτελέσματα	58
5.5 Σχεδιασμός καμπυλών	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	60
6.1 Γενικά	60

6.2 Ιδιότητες εδαφικών υλικών	62
6.3 Τύποι συμπεριφοράς υλικών	66
6.3.1 Μοντέλο Mohr-Coulomb.....	66
6.3.2 Μοντέλο Hardening Soil.....	67
6.4 Συνοριακές συνθήκες.....	67
6.5 Διακριτοποίηση (Mesh Generation)	67
6.6 Υδρολογικές συνθήκες	68
6.7 Αρχικές τάσεις.....	70
6.8 Υπολογισμοί.....	71
6.9 Αποτελέσματα	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ευστάθεια των πρανών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην κατασκευή τεχνικών έργων. Οι μετακινήσεις των πρανών στοιχίζουν και επιβαρύνουν οικονομικά, περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο, γεωλογικό φαινόμενο.

Οι κατολισθήσεις των πρανών είναι ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα των υπαίθριων μεταλλευτικών εκμεταλλεύσεων, δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις εγκυμονούν κινδύνους για την ασφάλεια του προσωπικού, των μηχανημάτων και των εγκαταστάσεων και προκαλούν διακοπές λειτουργίας και παραγωγής και απώλειες κοιτάσματος.

Η ευστάθεια των εδαφικών πρανών αποτελεί ένα πρόβλημα που απασχολεί τους εδαφομηχανικούς εδώ και δεκάδες χρόνια.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση προβλημάτων ευστάθειας πρανών και η επίλυσή τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος είναι η εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας τους και η λήψη κάποιων μέτρων ενίσχυσης των πρανών, προκειμένου να αποφευχθεί η κατολίσθηση.

Στα κεφάλαιο 2 που ακολουθεί γίνεται μια αναφορά στην ευστάθεια των πρανών, τους τύπους αστοχίας των πρανών, στο φαινόμενο των κατολισθήσεων, στις κατηγορίες όπου κατατάσσονται, στις αιτίες που τις προκαλούν και σε κάποιους τρόπους αντιμετώπισης.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών, οι οποίες χωρίζονται σε μεθόδους οριακής ισορροπίας και σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των δύο μεθόδων και μια μεταξύ τους σύγκριση.

Επίσης, στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια περιγραφική αναφορά των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων της περιοχής που αποτέλεσε το πεδίο εφαρμογής της παρούσας έρευνας.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια παρουσίαση του λογισμικού πακέτου Plaxis και μια αναφορά στα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες του προσομοιώματος και στις διαφορετικές επιλύσεις που έγιναν. Τα αποτελέσματα των επιλύσεων της παραμετρικής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6, όπου και συγκρίθηκαν με αποτελέσματα

προσομοιωμάτων που επιλύθηκαν με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Ακόμα αναφέρονται κάποιες προτάσεις, συμπεράσματα και παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια της επίλυσης των προσομοιωμάτων.

Στο 7^ο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις και συμπεράσματα που αφορούν στην ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων των προσομοιωμάτων.

Για την προσομοίωση του προβλήματος της ευστάθειας πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευστάθειας με την επίλυση κάποιων εναλλακτικών περιπτώσεων εδαφικού προσομοιώματος.

Στην πραγματικότητα, έγινε μια απλή προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας των πρηνών με τη δημιουργία ενός αριθμού θεωρητικών επιλύσεων ίδιας εξωτερικής γεωμετρίας, με κάποιες όμως αλλαγές, στα χαρακτηριστικά των υλικών, στις ιδιότητες τους, την υδροφορία των στρωμάτων, στην εσωτερική τους γεωμετρία και τέλος στην ύπαρξη ή όχι σταδιακών εκσκαφών. Η προσομοίωση έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Plaxis, το οποίο επιλύει γεωτεχνικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

2.1 Γενικά

Η ευστάθεια των εδαφικών πρανών είναι ένα καίριο πρόβλημα που απασχολεί τους εδαφομηχανικούς εδώ και πολλά χρόνια. Η εμφάνιση αστοχίας σε φυσικά ή σε τεχνητά πρανή μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα.

Η αστοχία των πρανών εκδηλώνεται με τη μορφή “κατολίσθησης” η οποία μπορεί να επιφέρει οικονομικά προβλήματα σε τομείς λειτουργικότητας και παραγωγής, αλλά και τομείς ασφάλειας, προσωπικού και μηχανολογικού εξοπλισμού (Λεονάρδος, 2004).

Η εμφάνιση του φαινομένου της μετακίνησης πρανών και μεγάλων βραχομαζών, ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή, σε τέτοιο βαθμό που είναι ικανή να διαμορφώσει και το ανάγλυφο της περιοχής.

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης που απειλεί τεχνικά έργα αναγκάζει αυτούς που καλούνται να αντιμετωπίσουν την κατάσταση, να εργαστούν σε συνθήκες εξαιρετικής πίεσης και έντασης. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει ο απαραίτητος χρόνος αλλά ούτε και οι προϋποθέσεις για άμεση εκτέλεση των αναγκαίων εργασιών που θα βοηθήσουν στην αντιμετώπιση της κατάστασης.

Στην αντιμετώπιση των κατολισθήσεων πρωταγωνιστικό ρόλο παίζει η κλίμακα του φαινομένου. Το βάθος προσχώρησης και ο όγκος των γεωυλικών ή πετρωμάτων που μετακινείται, διαφοροποιούν τις κατολισθήσεις σε μεγάλες και μικρές, καθώς και τον τρόπο αντιμετώπισής τους. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, οι κατολισθήσεις αποτελούν φαινόμενα που δύσκολα μελετώνται και αντιμετωπίζονται (Εξαδάκτυλος, 2001).

Όπως προαναφέρθηκε τα εδαφικά πρανή χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα φυσικά και τα τεχνητά πρανή.

Τα φυσικά πρανή παρουσιάζονται στη φύση με τη μορφή μιας κεκλιμένης εδαφικής μάζας, η οποία είναι συνήθως κάποια πλαγιά λόφου ή όχθη ποταμού ή λίμνης. Τα τεχνητά πρανή δημιουργούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες και συνήθως προέρχονται είτε από εκσκαφές, είτε από επιχωματώσεις.

Ως κατολισθήσεις αναφέρονται οι ταχείες μετακινήσεις γεωυλικών με την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων που ολισθαίνουν σε σχέση με την υποκείμενη

σταθερή επιφάνεια του πρανούς κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης. Υπάρχουν όμως και φαινόμενα ολίσθησης που αφορούν αργές παραμορφώσεις και μετακινήσεις πρανών που συμπεριλαμβάνονται στις κατολισθήσεις (Zaruba and Menci, 1982).

Έτσι, ανεξάρτητα από το είδος των αιτιών, είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση με στόχο την παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου, με την διαμόρφωση νέων εντατικών καταστάσεων και τη δημιουργία μιας νέας κατάστασης ισορροπίας.

2.2 Τύποι αστοχίας

Αστοχίες μπορεί να εμφανιστούν σε βραχώδη ή εδαφικά πρανή. Λόγω της γεωμετρίας τους, τα πρανή έχουν δύο ή τρεις ελεύθερες επιφάνειες. Έτσι, ετερογενείς όγκοι που περιέχονται μέσα στην κύρια μάζα του υλικού, δημιουργούν σχετικά υψηλή πιθανότητα αστάθειας.

Ο τύπος της αστοχίας ελέγχεται κατά κύριο λόγο από τον προσανατολισμό και τη θέση των ετερογενών όγκων. Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης και οι πιθανές ασυνέχειες, και ειδικά η πυκνότητα και το άνοιγμα των παρειών τους. Τέλος, όσον αφορά τον τύπο της αστοχίας, αυτός επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από τον προσανατολισμό της εκσκαφής, όταν πρόκειται για τεχνητά πρανή, καθώς και από την κλίση του πρανούς (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

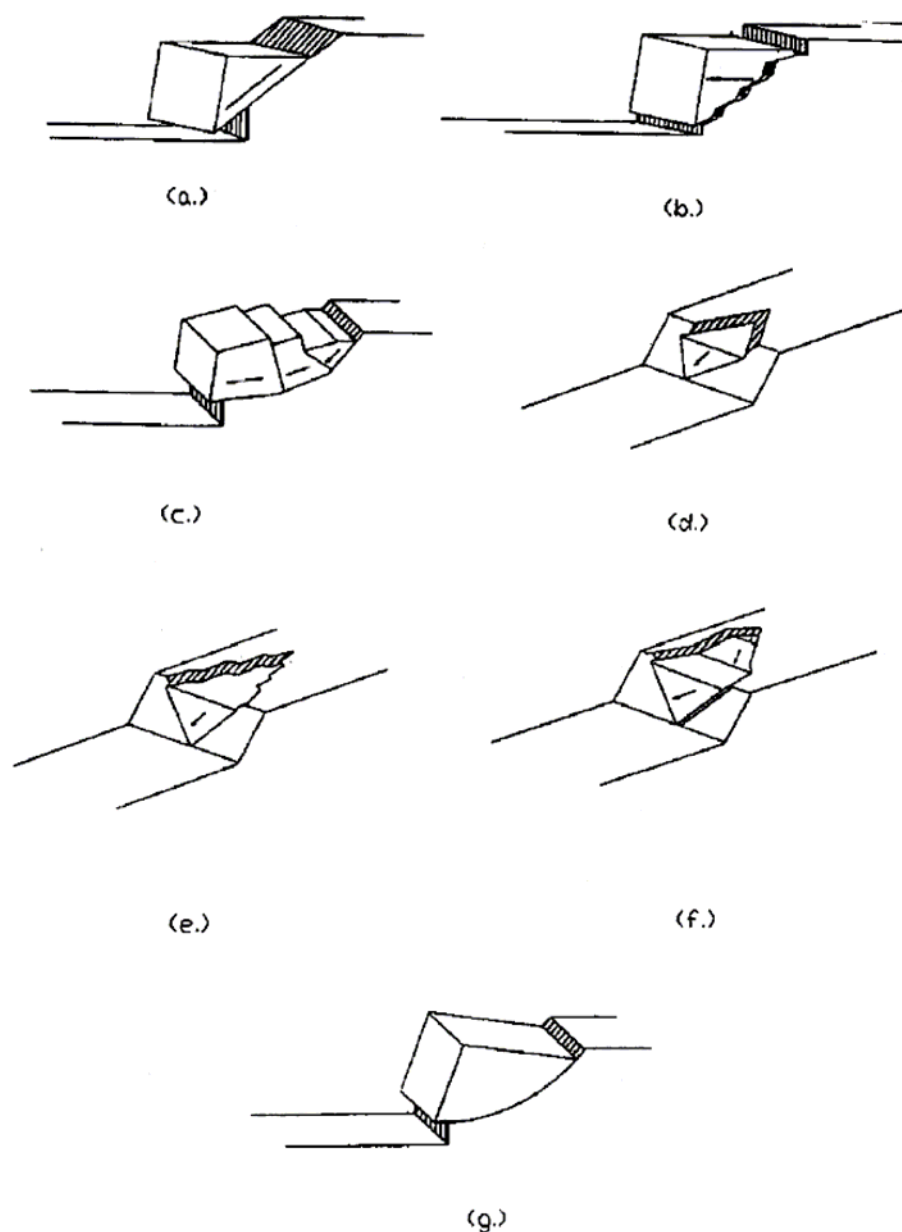
Οι τύποι της αστοχίας πρανών που ελέγχονται από τους παραπάνω παράγοντες μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες: αστοχίες ολίσθησης, κατάπτωσης και ανατροπής. Καθένας από τους τύπους αυτούς μπορεί να προκύψει με έναν ή παραπάνω μηχανισμό αστοχίας (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.2.1 Αστοχία Ολίσθησης

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται 7 διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που μπορούν να χαρακτηριστούν σαν αστοχίες ολίσθησης (U.S. Army Corps of Engineers, 1994). Οι τύποι αστοχίας αυτοί είναι:

- Ένας όγκος ολίσθησης - Ένα επίπεδο ολίσθησης (Σχήμα 2.1.a).
- Ένας όγκος ολίσθησης - Κλιμακωτά επίπεδα κατολίσθησης (Σχήμα 2.1.b).
- Πολλαπλοί όγκοι - Πολλαπλά επίπεδα κατολίσθησης (Σχήμα 2.1.c).

- Απλή σφήνα - Δύο τεμνόμενα επίπεδα κατολίσθησης (Σχήμα 2.1.d).
- Απλή σφήνα - Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα κατολίσθησης (Σχήμα 2.1.e).
- Πολλαπλές σφήνες - Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα κατολίσθησης (Σχήμα 2.1.f).
- Ένας όγκος - Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 2.1.g).



Σχήμα 2.1: Τύποι αστοχίας για την περίπτωση της αστοχίας ολίσθησης: a) ένας όγκος-ένα επίπεδο ολίσθησης, b) ένας όγκος-κλιμακωτά επίπεδα ολίσθησης, c) πολλαπλοί όγκοι-πολλαπλά επίπεδα ολίσθησης, d) απλή σφήνα-δύο τεμνόμενα επίπεδα, e) απλή σφήνα-πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα, f) πολλαπλές σφήνες-πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα, g) ένας όγκος-κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.2.2 Αστοχία Κατάπτωσης

Στην κατηγορία αυτή περιγράφονται φαινόμενα ολίσθησης και ανατροπής μεγάλων βραχωδών τμημάτων πάνω σε κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Οι πιο συχνές περιπτώσεις της αστοχίας αυτής, εμφανίζονται σε πολλαπλά και με απότομη κλίση συστήματα ασυνεχειών που κλίνουν μακριά από την επιφάνεια του πρανούς. Κάθε στρώμα του πρανούς τείνει να στραφεί προς τα κάτω, εξαιτίας του ίδιου του του βάρους. Σαν αρχικό στάδιο της αστοχίας παρουσιάζεται ο στιγμιαίος (λόγω του ίδιου του του βάρους ή και της ανακούφισης των τάσεων) ή ο σταδιακός (λόγω περιβαλλοντικών διαδικασιών π.χ κύκλων θέρμανσης και ψύξης) διαχωρισμός των στρωμάτων και η ταυτόχρονη κίνησή τους προς την κατεύθυνση της εκσκαφής (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.2.3 Αστοχία Ανατροπής

Αστοχίες αυτής της κατηγορίας συνδέονται συνήθως με αίτια που οφείλονται σε περιστροφικές κινήσεις. Η ανατροπή προκύπτει από περιστροφική κίνηση ενός ή περισσοτέρων τεμάχων, γύρω από ένα άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμάχους. Προκαλείται με τη βαρύτητα και τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχη ή από το νερό το οποίο βρίσκεται μέσα στις ρωγμές (Στειακάκης, 2005).

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια πρανών

Η σταθερότητα του γήινου ανάγλυφου οφείλεται στο γεγονός ότι η διατμητική αντοχή των εδαφών είναι μεγαλύτερη από τις διατμητικές τάσεις που ασκεί σε αυτά το βάρος τους ή άλλες εξωτερικές φορτίσεις. Όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρανές λόγω βαρύτητας υπερβούν τη διατμητική αντοχή του υλικού, τότε παρουσιάζονται φαινόμενα αστάθειας. Στην περίπτωση των εκσκαφών, η απομάκρυνση υλικού προκαλεί απελευθέρωση των “παραμενουσών” τάσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία.

Για την εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου συνήθως απαιτείται η συνύπαρξη πολλών παραγόντων, που έχουν σχέση με τις γεωλογικές, γεωτεχνικές, γεωμορφολογικές και περιβαλλοντολογικές συνθήκες καθώς και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις και δραστηριότητες. Ανάλογα με τον τρόπο

λειτουργίας τους ταξινομούνται σε παράγοντες που επηρεάζουν θετικά την διατμητική αντοχή του πρανούς, αυξάνοντάς την και σε αυτούς που την επηρεάζουν αρνητικά, μειώνοντάς την (Λέκκας, 1996).

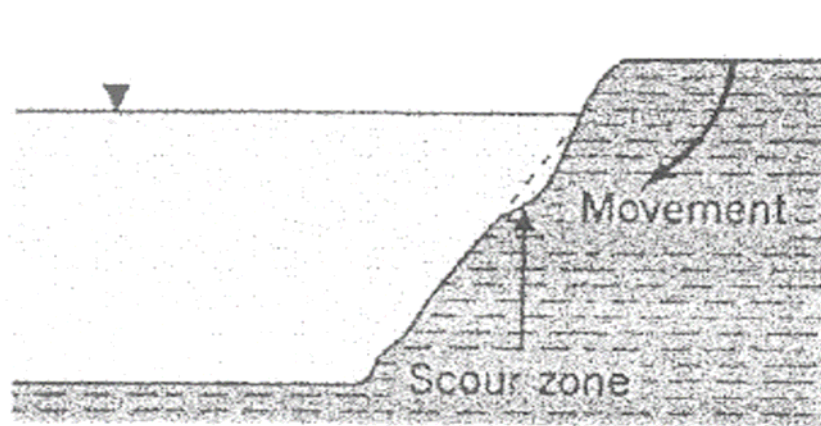
Κάθε πιθανός τύπος αστοχίας καθορίζεται από τα γεωμετρικά όρια (διεύθυνση, συνέχεια, απόσταση διακλαδώσεων) και τα όρια των ελεύθερων επιφανειών των εκσκαφών.

Η αστοχία όμως, μπορεί να καθοριστεί και από άλλους παράγοντες πέραν της γεωμετρίας. Οι παράγοντες αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους φυσικούς και τους τεχνητούς. Οι πρώτοι οφείλονται στην επίδραση φυσικών διαδικασιών, ενώ οι δεύτεροι σε ανθρώπινη παρέμβαση.

2.3.1 Φυσικοί Παράγοντες

2.3.1.1 Διάβρωση

Το νερό και η κίνησή του, ευθύνεται για τη διάβρωση των πρανών. Τα φυσικά και τεχνητά πρανά επηρεάζονται από την κίνηση του νερού που έρχεται σε επαφή με το πρανές, όπως όταν αυτό βρίσκεται σε όρια ποταμών ή λιμνών, ή από την κίνηση υπόγειου νερού. Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται διάβρωση μεγάλης κλίμακας, που συνοδεύεται από αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς (Σχήμα 2.2, U.S. Army Corps of Engineers, 1994).



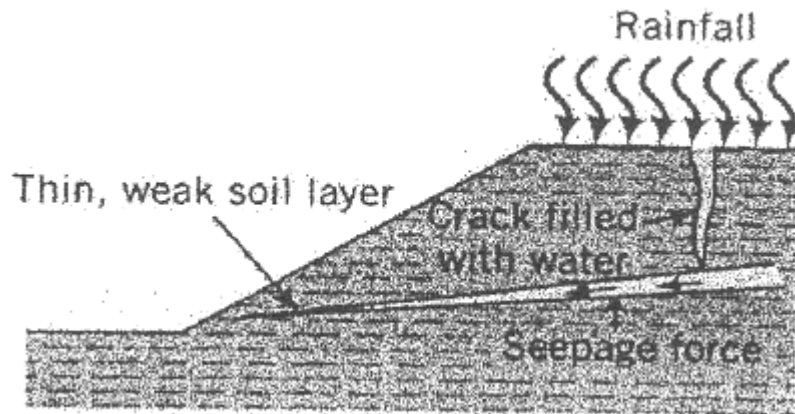
Σχήμα 2.2: Διάβρωση παραλίμνιων και παραποτάμιων πρανών (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται εσωτερική διάβρωση που οφείλεται σε κίνηση υπογείων υδάτων ή σε διείσδυση νερού από την επιφάνεια μέσω ρωγμών, με αποτέλεσμα τη μείωση συνάφειας γειτονικών όγκων πετρώματος (Σχήμα 2.3). Το αποτέλεσμα αυτής της μείωσης είναι η μείωση της διατμητικής

αντοχής του υλικού, που σταδιακά παρουσιάζει κίνηση.

Η εσωτερική διάβρωση μπορεί να επιφέρει αύξηση της διαπερατότητας του πετρώματος (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Το νερό επηρεάζει τα φυσικά, χημικά, ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τη γεωμετρία του. Διάβρωση όμως μπορεί να επέλθει και από τον αέρα.



Σχήμα 2.3: Εισροή νερού βροχής μέσω επιφανειακών ρωγμών στη μάζα του πρανούς προκαλώντας εσωτερική διάβρωση (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.1.2 Υπόγεια Νερά

Το νερό εκτός από τη διαβρωτική του ικανότητα, όταν διέρχεται από ρωγμές του πετρώματος, μειώνει σημαντικά την ευστάθεια του πρανούς και με άλλον τρόπο. Η πίεση των πόρων που δρα μέσα στην ασυνέχεια ελαττώνει την ενεργή τάση που εφαρμόζεται σε ένα επίπεδο, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται και η διατμητική αντοχή του υλικού κατά μήκος του επιπέδου αυτού. Η πίεση των πόρων στο εσωτερικό των ασυνεχειών που έχουν διεύθυνση παράλληλη με το μέτωπο του πρανούς, αυξάνει τις κινητήριες δυνάμεις που δρουν στη μάζα του πετρώματος (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.1.3 Θερμοκρασία

Υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν θρυμματισμό του πετρώματος λόγω συστολής - διαστολής. Το νερό που παγώνει στο εσωτερικό των ασυνεχειών προκαλεί ρήξη της μάζας του πετρώματος.

Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης – θέρμανσης έχουν σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της αντοχής. Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι κυρίως επιφανειακό φαινόμενο και δεν απειλούν τα πρανή (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.1.4 Εντατική κατάσταση

Μέσα στη μάζα του πετρώματος πολλές φορές αναπτύσσονται υψηλές τάσεις. Οι υψηλές οριζόντιες τάσεις που δρουν στο πρηνές, είναι πιθανό να προκαλέσουν κίνηση όγκων εδαφικού υλικού λόγω εκτόνωσης τάσεων που εμφανίζονται κατά την εκσκαφή. Ακόμη, μπορεί να προκαλέσουν θρυμματισμό της επιφάνειας του μετώπου του πρηνούς. Οι τάσεις είναι πιθανό να εκτονωθούν σε κάποιο βαθμό κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος για μεγάλου βάθους εκσκαφές είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η εντατική κατάσταση στη μάζα του πετρώματος και τι επίδραση έχει αυτή στην ανοιχτή εκσκαφή (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.1.5 Σεισμοί

Οι σεισμοί επιφέρουν δυναμικές φορτίσεις στα πρηνή. Από αυτές τις φορτίσεις ιδιαίτερη επικινδυνότητα παρουσιάζει η διατμητική, η οποία ελαττώνει τη διατμητική αντοχή και το μέτρο δυστροπίας του εδάφους. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου σε αδρομερή κορεσμένα εδάφη (άμμος), η πίεση των πόρων λόγω της σεισμικής δράσης μπορεί να φτάσει σε τιμές ίσες με την ολική τάση του εδάφους και να το οδηγήσει σε βισκοειδή συμπεριφορά (δυναμική ρευστοποίηση) (Παπαζάχος, 1989).

2.3.1.6 Στιγμαίεις τάσεις

Μπορεί να οφείλονται σε σεισμικές κινήσεις ή σε εκρήξεις που λαμβάνουν χώρα σε μεταλλεία και λατομεία κλπ, επιφέροντας δυναμικές φορτίσεις στα πρηνή και επηρεάζοντας τη διατμητική αντοχή του πρηνούς (Κανάρης, 2006).

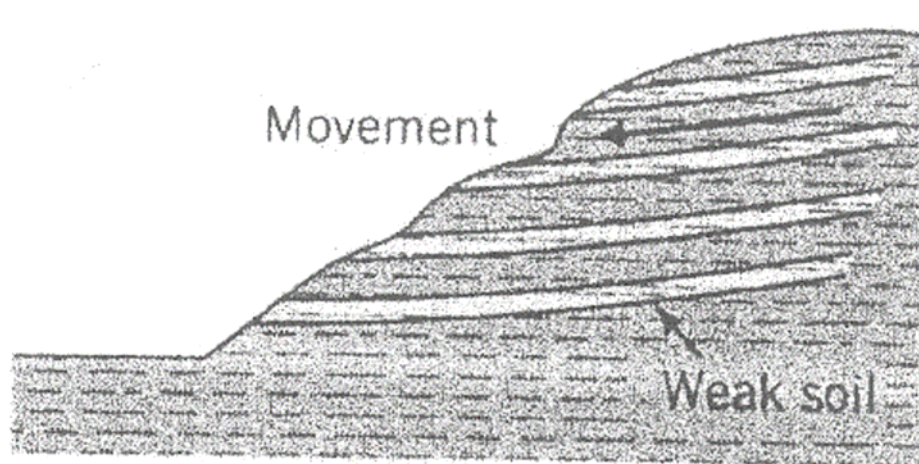
2.3.1.7 Χλωρίδα - Πανίδα

Η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος μειώνει τη διατμητική αντοχή πετρωμάτων, ενώ οι τάσεις λόγω των ανέμων μεταφέρονται δια μέσου των κορμών. Οι ζωικοί οργανισμοί επηρεάζουν λόγω δημιουργίας πυκνού επίγειου συστήματος κενών (Λέκκας, 1996).

2.3.1.8 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά πρηνούς

Πολλές κατολισθήσεις πρηνών προέρχονται από γεωλογικά χαρακτηριστικά που δεν έχουν προσδιοριστεί κατά τη γεωλογική ή τη γεωτεχνική έρευνα. Μια

λεπτή στρώση ιλύος που υπόκειται ενός στρώματος αργίλου, μπορεί να παραβλεφθεί σε μια γεωλογική ή γεωτεχνική έρευνα, με την ίδια όμως ευκολία μπορεί να προκαλέσει αστοχία του πρανούς στον αρμό επαφής, με αποτέλεσμα μετακινήσεις κατά μήκος των αδύναμων ενστρώσεων.



Σχήμα 2.4: Επίδραση της ύπαρξης ασθενών εδαφικών στρωμάτων στην ευστάθεια πρανών (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.2 Ανθρωπογενή Αίτια

2.3.2.1 Εξωτερικά αίτια

Φορτία τα οποία τοποθετούνται στην κορυφή του πρανούς αυξάνουν τις δυνάμεις που τείνουν να επιφέρουν κατολίσθηση. Αντίθετα, η εφαρμογή φορτίων στο πόδι του πρανούς βοηθά στην ευστάθειά του.

Όταν πραγματοποιούνται θεμελιώσεις και κατασκευές στην κορυφή του πρανούς και κοντά στο φρύδι πρέπει να πραγματοποιείται προσεκτική και λεπτομερής ανάλυση για να αποφεύγονται υπερβολικές αυξήσεις των φορτίων που οδηγούν σε αστάθεια και τελικά σε αστοχία του πρανούς.

2.3.2.2 Κατασκευαστικές δραστηριότητες

Κατά την ανάπτυξη κατασκευαστικών δραστηριοτήτων κοντά στο πόδι του πρανούς, υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν καταστάσεις που θα οδηγήσουν σε αστάθεια. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εκσκαφές, οι δονήσεις από βαριά μηχανήματα ή η χρήση εκρηκτικών κοντά στο πόδι του πρανούς (Κανάρης, 2006).

2.3.2.3 Αφαίρεση υποστήριξης

Μπορεί να εμφανιστεί είτε στο πόδι του πρανούς, είτε πλευρικά αυτού και επηρεάζει τη διατμητική αντοχή της μάζας του. Η εμφάνιση αυτού του φαινομένου οφείλεται κυρίως στην αφαίρεση των έργων υποστήριξης, στην υποσκαφή, στην αφαίρεση των υλικών λόγω λατομικών και μεταλλευτικών έργων, αλλά και στη δράση του νερού, των κυμάτων, της παλίρροιας, των ανέμων και την ύπαρξη ρηγμάτων.

2.3.2.4 Πρόσθετη φόρτιση

Ξαφνικές επιφορτίσεις αυξάνουν κατά πολύ την πιθανότητα κατολίσθησης. Αυτό πραγματοποιείται όταν στην περιοχή έχουν γίνει μεγάλα τεχνικά έργα, αλλά και στην απόρριψη αδρανών υλικών και στην απόθεση μεταλλευτικού υλικού, με αποτέλεσμα την αλλαγή της διατμητικής αντοχής της μάζας του πρανούς.

2.4 Τρόποι Αντιμετώπισης

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 τεχνικά και οικονομικά μέσα που υπάρχουν, η μόνη λύση είναι η εγκατάλειψη των προσπαθειών.

Τα μέτρα αντιμετώπισης που πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να βασίζονται στα αίτια που προκαλούν τις κατολισθήσεις. Όταν η κατολίσθηση οφείλεται στην επίδραση του νερού, θα πρέπει να λαμβάνονται τέτοια μέτρα ώστε να απομακρυνθεί το νερό που βρίσκεται μέσα στη ζώνη, ή για να εμποδιστεί η εισροή νέων ποσοτήτων νερού.

- Ο απλούστερος τρόπος στράγγισης του εδάφους είναι η διάνοιξη ορυγμάτων στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, που να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 5 m, και να έχουν βάθος ίσο περίπου με το βάθος του υποτιθέμενου κύκλου κατολίσθησης. Τα χαντάκια αυτά γεμίζονται με χοντρά λιθορρίματα και επιτρέπουν την απομάκρυνση

του υπόγειου νερού. Επιπλέον αυξάνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους.

- Πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι η εκτέλεση γεωτρήσεων, περίπου οριζόντιων από τη βάση του πρανούς, με διάμετρο 70 ως 100 m οι οποίες λειτουργούν ως φίλτρα.
- Ακόμη, κάτω από το πρανές μπορεί να κατασκευαστεί σήραγγα αποστράγγισης. Η μέθοδος αυτή είναι ικανοποιητική αλλά πολύ πιο δαπανηρή από τις προηγούμενες. Πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις μεγάλης ανάγκης.
- Επίσης, προτείνεται η δημιουργία περιφερειακής τάφρου. Η μέθοδος αυτή όμως μπορεί να απομακρύνει μόνο τα επιφανειακά νερά. Επίσης, μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής του εδάφους και να διευκολύνει την κατολίσθηση.
- Τέλος, προτείνεται η χρήση τσιμεντενέσεων για την αντιμετώπιση της εισροής των μετεωρικών νερών μέσω επιφανειακών ρωγμών.

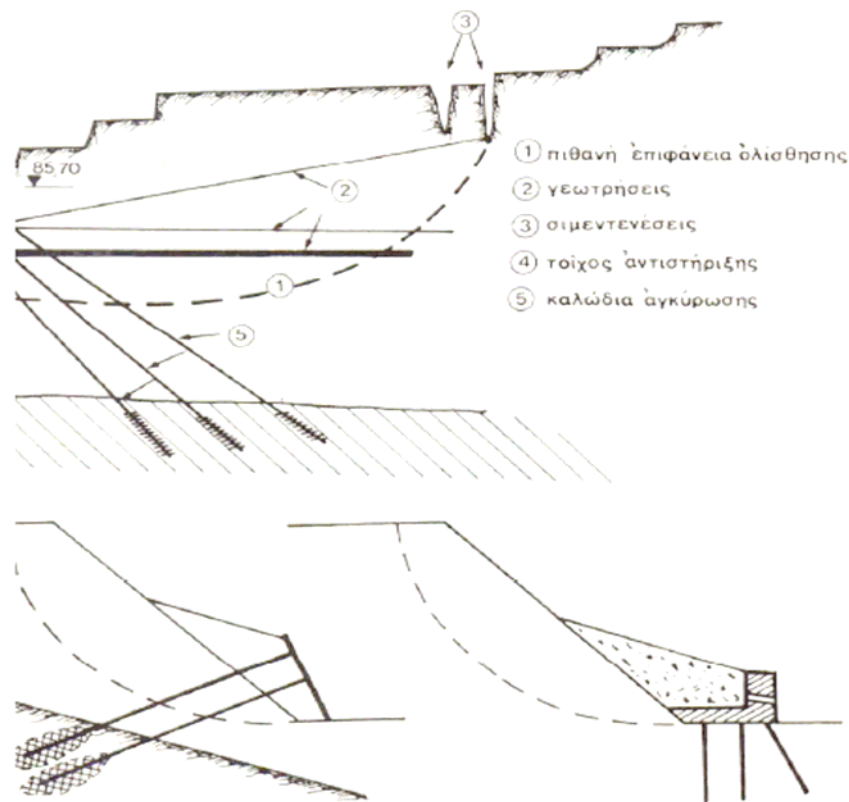
Όταν οι κατολισθήσεις οφείλονται σε μείωση της αντοχής του πρανούς, τότε η αποστράγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Σε αυτή την περίπτωση τα προτεινόμενα μέτρα αντιμετώπισης είναι τα εξής:

- Ηλεκτροχημική στερεοποίηση με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα που προκαλεί ηλεκτρόσμωση.
- Θέρμανση του εδάφους, με στόχο την αύξηση της αντοχής του και την αποφυγή κατολισθήσεων.
- Πάγωμα του εδάφους, με στόχο την συμπαγοποίηση του εδάφους κατά την μετατροπή του νερού των πόρων σε πάγο.

Επίσης, σαν μέτρο αντιμετώπισης μιας κατολίσθησης, συνηθίζεται η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης στη βάση των πρανών με ή χωρίς αγκυρώσεις στο στερεό έδαφος (Σχήμα 2.5).

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

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



Σχήμα 2.5: Τοίχοι αντιστήριξης με αγκύρια (Βαλαλάς, 1981).

Όταν οι κατολισθήσεις συνοδεύονται με πτώσεις λίθων, τότε τα μέτρα που εφαρμόζονται είναι τα εξής (Βαλαλάς, 1981):

- Κατασκευή διαφράγματος στη βάση του πρανούς.
- Τοποθέτηση πλέγματος κατά μήκος του πρανούς με αγκύρωσή του στην κορυφή του πρανούς.
- Αγκυρώσεις μέσα στη μάζα των βράχων.
- Ενίσχυση του βράχου με βοηθητικά μέτρα αντιστήριξης, όπως εκτόξευση σκυροδέματος, μεταλλικά πλαίσια.
- Στεγανή επένδυση του εδάφους για την αποφυγή διείσδυσης νερών βροχής.
- Αφαίρεση επικίνδυνου τμήματος του βράχου με τη χρήση εκρηκτικών υλών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

3.1 Γενικά

Για την επίλυση του προβλήματος της ευστάθειας των εδαφικών πρανών έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής αρκετές μέθοδοι (Bishop, 1955; Morgenstern and Price, 1965), όπως αυτή της οριακής ισορροπίας, η μέθοδος των λωρίδων, των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και συνδυασμοί αυτών.

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

Η ιδέα της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη συμβατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών. Η προσέγγιση αυτή θεωρεί μια συνεχή επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα συμπαγές σώμα που ικανοποιεί το κριτήριο Mohr-Coulomb. Η μέθοδος αποδείχτηκε υψηλής πρακτικής σημασίας ειδικά σαν ένα σχεδιαστικό εργαλείο για εδαφικά πρανά που παρουσιάζουν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Όταν εφαρμόζεται σε ψαθυρά εδάφη, η ίδια μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα (Καββαδάς, 2000).

Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία νέων και πιο ικανοποιητικών μεθόδων επίλυσης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι αριθμητικές μέθοδοι.

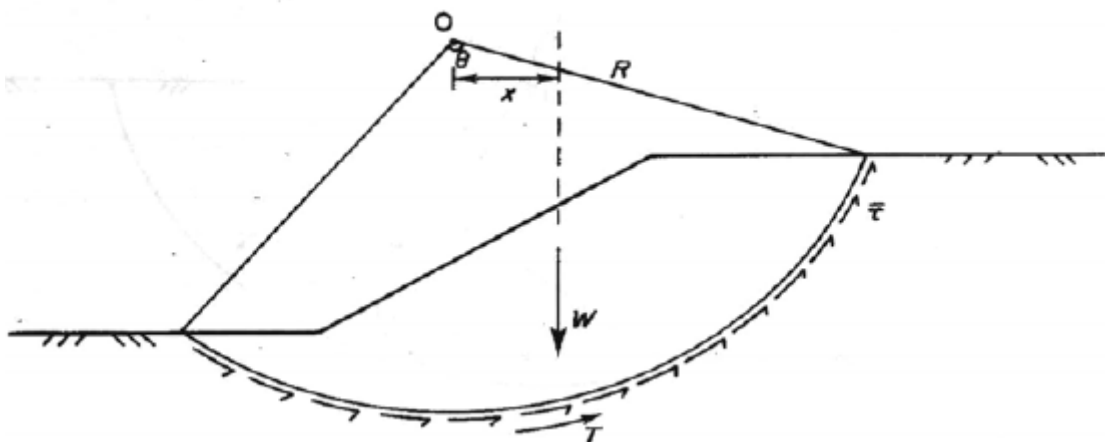
Με τις αριθμητικές μεθόδους μπορούν να αναλυθούν προβλήματα που με άλλες μεθόδους δεν είναι εύκολο ή πολλές φορές, εφικτό να επιλυθούν. Η χρήση των μεθόδων αυτών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για το μηχανικό αφενός μεν κατά τη φάση του σχεδιασμού, αφετέρου δε κατά τη φάση εκτέλεσης ενός έργου.

3.2 Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας

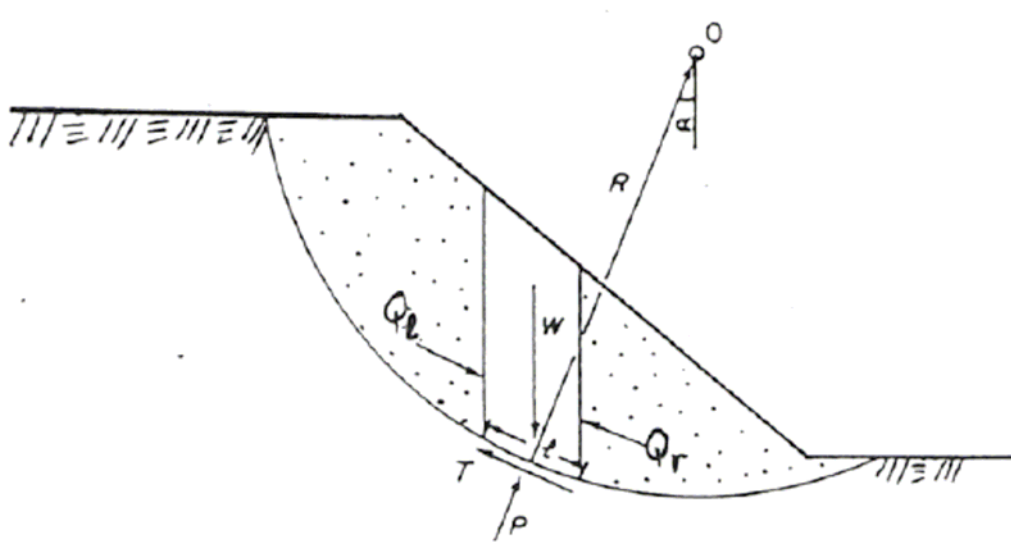
Η μέθοδος της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται στη συμβατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών. Η μέθοδος βασίζεται στην προσέγγιση μιας συνεχούς επιφάνειας ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα συμπαγές σώμα που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb. Εφαρμόζεται κυρίως σε εδαφικά πρανή που παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά. Αντιθέτως, η εφαρμογή της μεθόδου σε ψαθυρά εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή και μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας πρανών διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Τις γραμμικές μεθόδους, οι οποίες επιλύουν τα μοντέλα με εξισώσεις πρώτου βαθμού. Οι μέθοδοι ανάλυσης αυτές είναι απλές στην επίλυση και η λύση τους ορίζεται μονοσήμαντα. Για κάθε μια από αυτές υπάρχει μια γραμμική εξίσωση, από την οποία προκύπτει η τιμή του συντελεστή ασφάλειας για το εδαφικό πρανές. Για το λόγο αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμες στην πράξη (Nash, 1987). Αυτές είναι:
- η ανάλυση πρανούς μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση,
 - η ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους,
 - η μέθοδος $\Phi_u=0$ (Σχήμα 3.1) (αστράγγιστης αντοχής),
 - η μέθοδος Fellenius (Σχήμα 3.2) (Σουηδική μέθοδος).



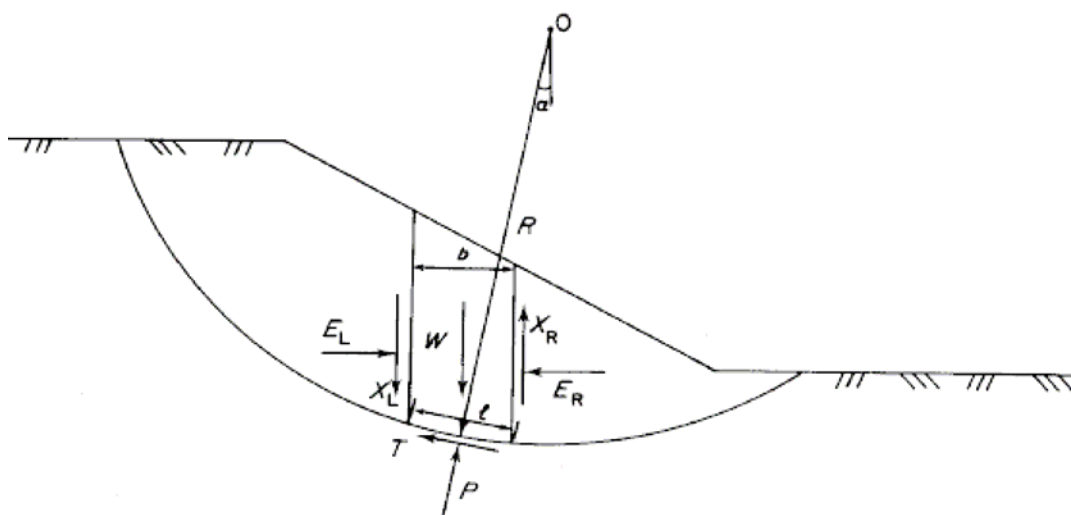
Σχήμα 3.1: Μέθοδος $\Phi_u=0$ (Nash, 1987).



Σχήμα 3.2: Μέθοδος Fellenius (Τσόγκας, 2000).

2. Τις μη γραμμικές μεθόδους, οι οποίες επιλύουν μοντέλα με εξισώσεις δύο αγνώστων με διαδοχικές επαναλήψεις για διάφορες τιμές επαλήθευσης του $2^{\text{ου}}$ αγνώστου. Στην περίπτωση που πρόκειται να γίνει ανάλυση των ενεργών τάσεων σε ένα πρανές, οι τάσεις αυτές πρέπει να οριστούν γύρω από την επιφάνεια αστοχίας. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό της εδαφικής μάζας σε κατακόρυφες λωρίδες. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας χρησιμοποιούνται μη γραμμικές εξισώσεις (όχι κλειστού τύπου δηλαδή), η επίλυση των οποίων ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία (Nash, 1987). Αυτές είναι:

- η μέθοδος Bishop (Σχήμα 3.3),
- η απλοποιημένη μέθοδος Janbu (Σχήμα 3.4),
- η μέθοδος Spencer (Σχήμα 3.5),
- η μέθοδος Morgenstern and Price.

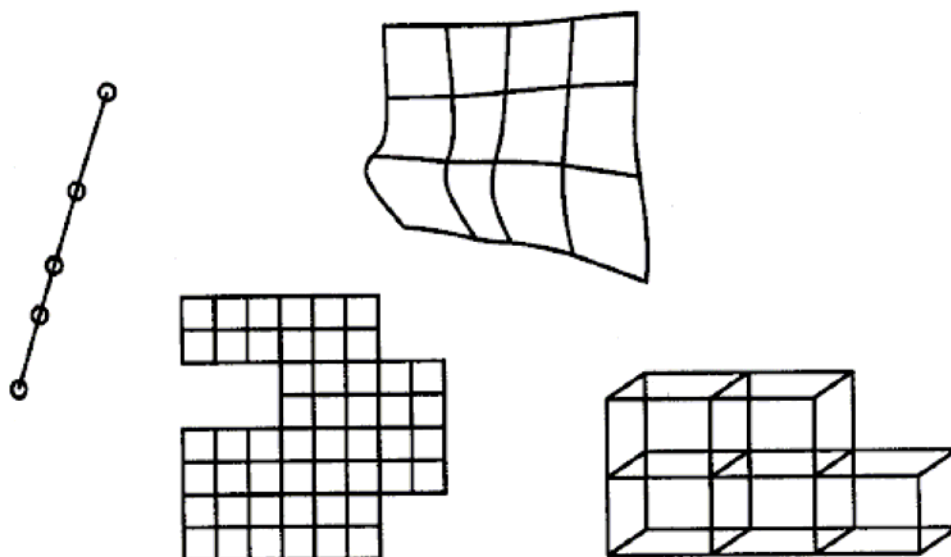


Σχήμα 3.5: Μέθοδος Spencer (Nash, 1987).

3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

3.3.1 Γενικά

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα γνωστά ως «στοιχεία» (πεπερασμένα στοιχεία). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται «κόμβοι» (nodes). Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής υπολογίζονται στα υπόλοιπα σημεία του μέσου. Έτσι είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου. Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Διακριτοποίηση σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

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

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται, σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα.
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain-displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress-strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equation).
- Υπέρθεση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και ορισμός των συνοριακών συνθηκών.
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κ.λ.π.).
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.3.2 Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Τα κύρια χαρακτηριστικά επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής (Plaxis, 1998):

- Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μία μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς.
- Το πεδίο ορισμού των εξισώσεων αυτών απαιτεί κυρίως συνεχή μέσα. Όταν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν ασυνέχειες στην περιγραφή του μέσου, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ασυνεχειών, τα οποία εξασφαλίζουν μεν μια μαθηματική συνέχεια με το υπόλοιπο μέσο, αλλά χαρακτηρίζονται από μία “χαλαρότητα” σε σχέση με τα συνήθη στοιχεία.
- Η καταστατική εξίσωση συμπεριφοράς του υλικού, η οποία επιλύεται στο συγκεκριμένο μέσο, συνδέει ουσιαστικά το αίτιο (δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση, παραμόρφωση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.

3.3.3 Διάρθρωση μεθόδου

Έστω ένα σώμα του οποίου ζητείται να βρεθεί η κατανομή μιας άγνωστης μεταβλητής όπως για παράδειγμα η μετατόπιση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών, τα στοιχεία (elements). Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται κόμβοι (nodes). Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται διακριτοποίηση. Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που έχουν επιλεγεί να περιγράψουν το

σώμα, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται ότι επιδρά σε κάθε στοιχείο με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις και καταστατικές εξισώσεις (Fagan, 1996).

Μετά από τη διακριτοποίηση υπολογίζονται οι εξισώσεις ισορροπίας που δίδουν κάθε στοιχείο, με βάση τη μέθοδο των μετατοπίσεων και σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων.

Το σύστημα έχει τη μορφή: $[K] \cdot \{U\} = \{F\}$

όπου:

$[K]$: Τετραγωνικός πίνακας που αποτελεί το μητρώο ακαμψίας του σώματος.

$\{U\}$: Το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων στους κόμβους.

$\{F\}$: Οι δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους.

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων θα αποδώσει τις τιμές των αγνώστων μεταβλητών, αφού πρώτα οριστούν οι συνοριακές συνθήκες.

Όταν βρεθούν οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε κόμβο είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων στα στοιχεία και μετά σε όλο το σώμα.

Κατά την ανάλυση ενός μοντέλου τα βασικά στάδια που ακολουθούνται είναι τα εξής (Σπυράκος, 1996):

- Η προεπεξεργασία. Στο στάδιο αυτό γίνεται διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Ανάλογα με τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, εισάγονται οι εξισώσεις των κόμβων, τα χαρακτηριστικά των υλικών και οι συνοριακές συνθήκες.
- Η επεξεργασία. Αυτό το στάδιο είναι και το μαθηματικό κομμάτι της επίλυσης του μοντέλου και διεξάγεται κυρίως από τον υπολογιστή. Πραγματοποιείται υπολογισμός των διανυσμάτων κάθε στοιχείου και στη συνέχεια γίνεται σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων, ώστε να δημιουργηθούν οι τελικές εξισώσεις που περιγράφουν το προς μελέτη μοντέλο.
- Η μετα-επεξεργασία. Εδώ παρουσιάζεται η επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων, με στόχο την παράσταση των παραμορφώσεων και των τάσεων στο μοντέλο. Επίσης μπορεί να γίνει και γραφική παράσταση αυτών των αποτελεσμάτων.

3.3.4 Χρήσιμες παρατηρήσεις για τη χρήση της μεθόδου

Κατά τη χρήση της μεθόδου θα ήταν θετικό να είναι γνωστές οι παρακάτω χρήσιμες παρατηρήσεις (IGE, 2003):

- Ανάλογα με το σχήμα του πεδίου, αυτό μπορεί να διακριτοποιηθεί σε κάνναβο που να περιέχει πάνω από ένα τύπο στοιχείων. Έτσι όταν χρησιμοποιούνται παραπάνω του ενός τύποι στοιχείων, ο κάθε τύπος απομονώνεται και αναπτύσσονται οι συναρτήσεις μορφής του. Συνήθως τα προγράμματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν αυτή τη δυνατότητα και δεν υπάρχει πρόβλημα να εισάγονται διαφορετικοί τύποι στοιχείων κατά την ανάλυση.
- Οι κυρίαρχες συνεχείς συναρτήσεις είναι γενικά πολύ περίπλοκες. Είναι συνήθως μερικές διαφορικές εξισώσεις και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν να δώσουν λύση για ένα στοιχείο. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, δεν επιτρέπουν ακριβή λύση και δεύτερον οι διακριτές συναρτήσεις που απορρέουν δεν μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα από τα εναπομείναντα στοιχεία διότι η σύνδεση των στοιχείων, στηρίζεται σε συγκεκριμένες συνεχόμενες συνοριακές ή και σε αρχικές συνθήκες.
- Ο αριθμός και η θέση των κόμβων σε ένα στοιχείο, εξαρτώνται από τη γεωμετρία του στοιχείου, το βαθμό πολυωνυμικών συναρτήσεων και από την ολοκλήρωση των συναρτήσεων.

3.4 Βασικά στάδια μεθόδου

3.4.1 Διακριτοποίηση

Το υπό μελέτη μοντέλο διαιρείται σε ένα σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών, τα στοιχεία (elements).

Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται κόμβοι (nodes). Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται διακριτοποίηση. Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που έχουν επιλεγεί να περιγράψουν το πεδίο, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται

ότι επιδρά σε κάθε στοιχείο με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις και καταστατικές εξισώσεις.

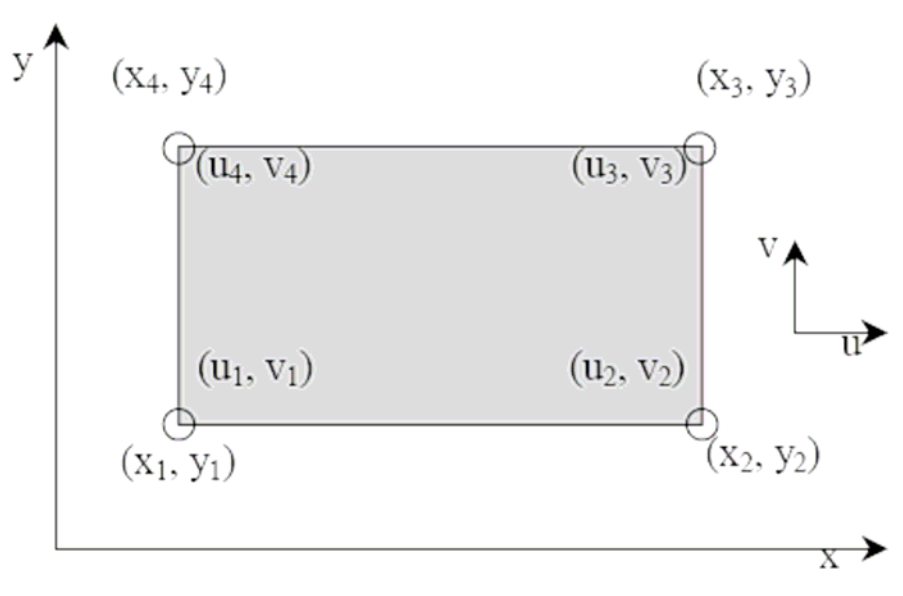
Επίσης πρέπει να επιλεγεί σωστά ο αριθμός των κόμβων, η κατάλληλη γεωμετρική μορφή των στοιχείων και οι κατάλληλες εξισώσεις μορφής των στοιχείων και η πυκνότητα του καννάβου.

3.4.2 Συναρτήσεις μορφής

Οι συναρτήσεις που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους ονομάζονται συναρτήσεις μορφής.

Οι συναρτήσεις μορφής ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων στη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Η επιλογή τους συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και με το χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Οι συναρτήσεις μορφής μπορούν να παρομοιαστούν με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του.

Στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τριγωνικά τρικομβικά και επομένως η ανάλυση έγινε σε δύο διαστάσεις.



Σχήμα 3.7: Συντεταγμένες κόμβων και άγνωστες μεταβλητές δισδιάστατου στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002).

3.4.3 Καταστατικές εξισώσεις

Το Plaxis έχει δύο μεγάλες κατηγορίες καταστατικών εξισώσεων, τις εξισώσεις που συνδέουν τις παραμορφώσεις με τις μετατοπίσεις και αυτές που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα.

Η εξίσωση $\{\epsilon\} = [B] * \{q\}$, είναι η εξίσωση που συνδέει τις παραμορφώσεις με τις μετατοπίσεις. Η εξίσωση αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του αριθμητικού κομματιού της επίλυσης των μοντέλων, όπου:

$\{\epsilon\}$: πίνακας παραμορφώσεων με διάσταση $[3 \times 1]$,

$\{q\}$: μοναδιαίο διάνυσμα των μετατοπίσεων στους κόμβους με διάσταση $[n \times 1]$,

$[B]$: πίνακας συσχετισμού με τη διάσταση $[3 \times n]$, και n οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου.

Οι καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα είναι της μορφής $\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij})$, οι οποίες σε μορφή πινάκων γράφονται ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E] \times \{\epsilon\}$$

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

3.4.4 Συνοριακές συνθήκες

Ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών ενός μοντέλου αποτελεί πολύ βασικό ρόλο στη σωστή παραμετρική ανάλυση. Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

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

3.5 Σύγκριση Μεθόδων

Και οι δύο μέθοδοι (Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας και Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων) ασχολούνται με την επίλυση ευστάθειας εδαφικών μοντέλων και προσδιορίζουν το συντελεστή ασφάλειας αυτών. Κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από διάφορες μελέτες, συγκρίσεις και βιβλιογραφία φαίνεται ότι από τις διαδικασίες επίλυσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.) και τη Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας (Μ.Ο.Ι.), για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας και γενικότερα των παραμορφώσεων και τάσεων, η πρώτη δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα.

Η επίλυση με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας πραγματοποιείται με διάφορες επιμέρους μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί κατά το πέρασμα των ετών (Fellenius, 1927; Bishop, 1955; Morgenstern and Price, 1965; Spencer, 1967) και προσφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αρκετές περιπτώσεις επίλυσης μοντέλων, κυρίως σε κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης και σε μοντέλα οριακής ισορροπίας.

Για παράδειγμα, η ακρίβεια των διαγραμμάτων της Μ.Ο.Ι. που προκύπτουν από τη μέθοδο αυτή εξαρτάται από την ακρίβεια των μετρήσεων όσο αφορά τα μοναδιαία βάρη, τη γεωμετρία και τη διατμητική αντοχή των εδαφικών σχηματισμών. Βασικός περιορισμός των διαγραμμάτων αυτών είναι η εφαρμογή τους μόνο σε απλές περιπτώσεις, αλλά τιμές που προσεγγίζουν πολύ καλά την πραγματικότητα. Έτσι, αν οι παραπάνω μετρήσεις είναι ικανοποιητικές επιλύονται πολύ πιο γρήγορα από τον Η/Υ και γι'αυτό το λόγο καλό θα ήταν οι επιλύσεις να γίνονται πρώτα γραφικά και μετά σε Η/Υ (Duncan, 1996).

Η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων (μέθοδος επιμήκους λωρίδας) δεν είναι ακριβής για αναλύσεις ενεργών τάσεων πρανών με υψηλή πίεση πόρων (ο SF είναι πολύ χαμηλός), όμως είναι απόλυτα ακριβής για εδάφη με γωνία εσωτερικής τριβής ίση με μηδέν ($\phi=0^\circ$) και αρκετά ακριβής για κάθε τύπο ανάλυσης ολικών τάσεων σε κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, ενώ δεν παρουσιάζει υπολογιστικά προβλήματα (Duncan, 1996).

Η τροποποιημένη μέθοδος του Bishop, είναι ακριβής για όλες τις συνθήκες εκτός των περιπτώσεων όπου εμφανίζονται υπολογιστικά σφάλματα (λάθη μετρήσεων, υπολογισμών, πράξεων). Είναι εφαρμόσιμη μόνο σε κυκλικές

επιφάνειες ολίσθησης και εμφανίζει συχνά υπολογιστικά προβλήματα (Duncan, 1996) .

Οι μέθοδοι που ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας είναι ακριβείς για κάθε περίπτωση ανάλυσης. Ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται μέσω αυτών των μεθόδων διαφέρει το πολύ 12% από τις υπόλοιπες μεθόδους και το πολύ 6% από τον πραγματικό συντελεστή ασφαλείας του πρανούς (Duncan, 1996).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της M.O.I. είναι ότι η τρισδιάστατη ανάλυσή της, δίνει ακριβέστερες τιμές συντελεστών ασφαλείας και η χρήση δεν έχει εδραιωθεί ακόμα πάρα πολύ (Duncan, 1996).

Εν κατακλείδι, για τη σωστή χρήση της M.O.I. πρέπει να υπάρχει επαρκής γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, καλή κατανόηση και εξοικείωση του χρήστη με το υπολογιστικό πρόγραμμα και ικανότητα εκτίμησης των αποτελεσμάτων επίλυσης. Το γεγονός ότι οι M.O.I. πραγματοποιούν και χρησιμοποιούν παραδοχές και έχουν κάποιους περιορισμούς, δε σημαίνει ότι είναι άχρηστες, αλλά ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται με κατανόηση και κρίση (Καβουνίδης, 1987).

Από την άλλη, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλύσει μια μεγαλύτερη και πιο απαιτητική γκάμα προβλημάτων που αφορούν την ευστάθεια πρανών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή, λαμβάνει υπόψη της πολλά παραπάνω στοιχεία και δεδομένα από τις άλλες μεθόδους, όπως τον τρόπο σχηματισμού, κάποια πιο δευτερεύοντα χαρακτηριστικά του πρανούς (συντελεστές συμπίεσης, στερεοποίησης, διόγκωσης), την υδροφορία κ.τ.λ.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, είναι μια μέθοδος γενικής χρήσης που χρησιμοποιείται για την ανάλυση παραμορφώσεων, τη κατανομή τάσεων και μετατοπίσεων εδαφών. Είναι τόσο γενική που μπορεί να μοντελοποιήσει πολλές σύνθετες περιπτώσεις με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας και να περιλάβει στην ανάλυση και άλλες συνθήκες, όπως μη-γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, μη ομογενείς συνθήκες και διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία του πεδίου ή της εκσκαφής (Duncan, 1996). 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).

Παρά τα θετικά στοιχεία της Μ.Π.Σ. (γενικότητα, ισχύς), χρειάζεται πολύ κόπο και κόστος για να πραγματοποιηθεί. Ακόμα και σήμερα που ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή της έχει μειωθεί, ο χρόνος εξακολουθεί να είναι αρκετός χωρίς να συνυπολογίζεται ο χρόνος προσαρμογής του χρήστη στην εκμάθηση της μεθόδου (Duncan, 1996).

Σήμερα, παρόλο που η Μ.Π.Σ. μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να πραγματοποιηθεί σε προσωπικό υπολογιστή, εντούτοις σε προβλήματα που περιέχουν πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων, τρισδιάστατες αναλύσεις, ιδιαίτερες τεχνικές προσομοίωσης μη γραμμικής συμπεριφοράς και μεγάλο αριθμό υπολογισμών κρίνεται απαραίτητη η συνδεση του ενός υπολογιστή με άλλους ώστε να επιτευχθεί η επίλυση του προβλήματος (Duncan, 1996).

Το κλειδί για ρεαλιστική προσομοίωση γεωτεχνικών προβλημάτων με τη Μ.Π.Σ. είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος σαν μια σειρά γεγονότων και η ανάλυση του κάθε γεγονότος ξεχωριστά σαν ένα απλό γραμμικό πρόβλημα, π.χ μια εκσκαφή που μπορεί να μοντελοποιηθεί σε στάδια, όπου το καθένα μπορεί να θεωρηθεί σαν μια αφαίρεση στρώσης στοιχείων από το συνολικό πλέγμα (Καβουνίδης, 1987).

Είναι σαφές ότι για κάθε τύπο ανάλυσης υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί. Για παράδειγμα η σχέση προσομοίωσης τύπου τάσης-παραμόρφωσης υπερβολικής μορφής (Hardening Soil) έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μοντελοποιήσει περιπτώσεις μη γραμμικής συμπεριφοράς και ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται έχουν φυσική υπόσταση και μπορούν να εκτιμηθούν, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα μιας συμβατικής τριαξονικής δοκιμής. Αντιθέτως αυτός ο τύπος ανάλυσης υστερεί στο ότι δεν επιλύει με ακρίβεια πλαστικές παραμορφώσεις (Duncan, 1996). Μια άλλη περίπτωση τύπου ανάλυσης, είναι η γραμμική ελαστοπλαστική (Mohr-Coulomb). Στον τύπο αυτό, οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης έχουν το πλεονέκτημα ότι μοντελοποιούν και προσομοιάζουν αξιόπιστα τη συμπεριφορά του εδάφους πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την αστοχία, που όμως είναι πολύ σύνθετες και απαιτούν πολύ χρόνο (Duncan, 1996).

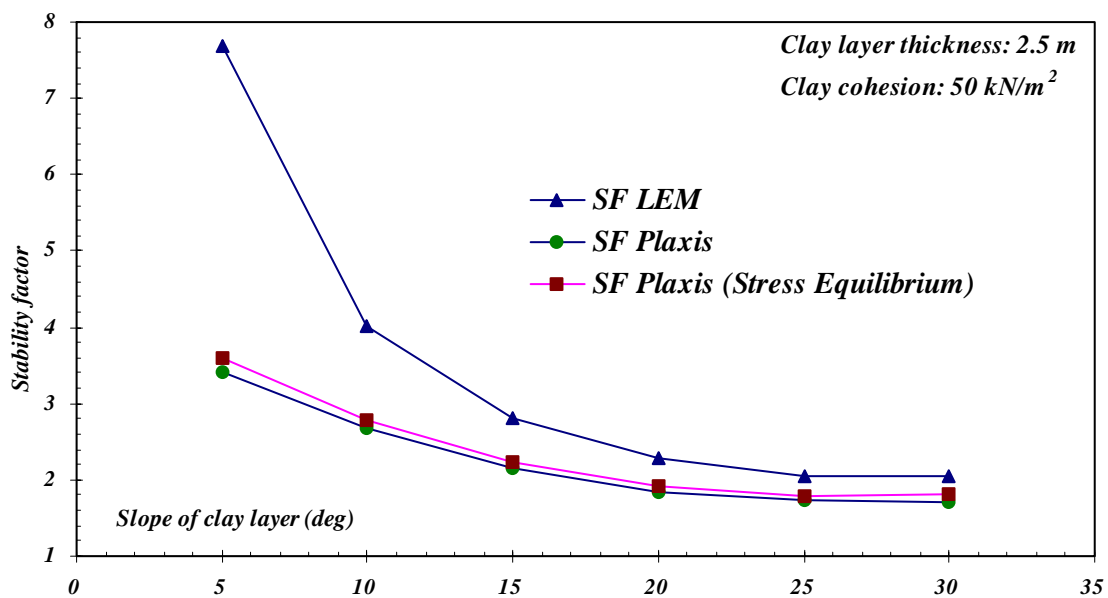
Γενικά η Μ.Π.Σ. προσομοιάζει με μεγαλύτερη και πιο ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά των εδαφών (Duncan, 1996).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της Μ.Π.Σ. με επιτόπου μετρήσεις πεδίου δείχνουν ότι οι υπολογίσιμες παραμορφώσεις τείνουν να είναι μεγαλύτερες από τις μετρήσιμες και αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι το δείγμα διαταράσσεται αρκετά κατά τη δειγματοληψία αλλά και τη μεταφορά του στο εργαστήριο. Επίσης μπορεί να οφείλεται, στο ότι οι συνθήκες στην πραγματικότητα προσεγγίζουν επίπεδη παραμόρφωση, ενώ στην πραγματικότητα τα προβλήματα είναι τριών διαστάσεων (Duncan, 1996).

Η Μ.Ο.Ι. επιλύει το δισδιάστατο εδαφικό πρότυπο με βάση τη θεωρία της ισορροπίας δυνάμεων συγκράτησης προς τις δυνάμεις ολίσθησης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς. Αντίθετα η Μ.Π.Σ. και ειδικότερα η εφαρμογή του Plaxis σε προβλήματα ευστάθειας, ακολουθεί μια διαδικασία σταδιακής μείωσης των παραμέτρων αντοχής μέχρις ότου το πρότυπο αστοχήσει. Το πηλίκο της διατμητικής αντοχής προς τη διατμητική τάση κάτω από την οποία αστόχησε το υλικό δίνει το συντελεστή ασφάλειας στο Plaxis (Plaxis, 1998).

Μια ακόμα πολύ σημαντική διαφορά των δύο μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι η Μ.Ο.Ι. εξετάζει την κατάσταση πάνω σε μια προκαθορισμένη επιφάνεια, ενώ είναι γνωστό ότι η αστοχία προκαλείται στη μάζα του υλικού και όχι πάνω σε κάποιο σαφώς καθορισμένο επίπεδο. Αντίθετα, η Μ.Π.Σ. εξετάζει την κατάσταση στο σύνολο της μάζας του πρανούς και δεν θεωρεί μια προκαθορισμένη επιφάνεια ολίσθησης.

Τέλος, όσον αναφορά στο συντελεστή ευστάθειας στην Μ.Π.Σ. από μελέτες προκύπτει (Σχήμα 3.8) ότι είναι πιο συντηρητικός από ότι αυτός της Μ.Ο.Ι. σε δοκιμές μοντέλων λεπτού στρώματος και δίνει χαμηλότερες τιμές (Αγιουτάντης κ.α, 2003). Γενικά η Μ.Π.Σ. προσεγγίζει πιο συντηρητικά τον συντελεστή ευστάθειας απ'ότι η Μ.Ο.Ι.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση συντελεστή ασφαλείας μεταξύ της μεθόδου επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων και της συμβατικής μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας πρανών για πρανές συγκεκριμένης δομής (Αγιουτάντης, 2003).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

4.1 Γεωλογία-Τεκτονική περιοχή

Η λιγνιτοφόρος λεκάνη της Πτολεμαΐδας καλύπτεται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα, τα οποία βρίσκονται σε ασυμφωνία πάνω από Αλπικά και Προαλπικά πετρώματα του υποβάθρου, τα οποία ανήκουν στο Βόρειο τμήμα της Πελαγονικής ζώνης.

Τα Νεογενή ιζήματα είναι σχεδόν αποκλειστικά λιμναίας προέλευσης μάργες, άργιλοι, άμμοι κ.α. που περικλείουν τους λιγνίτες και ποταμοχειμάρριες ή χερσαίες αποθέσεις.

Οι νεογενείς αποθέσεις της λεκάνης αποτελούνται από τις ακόλουθες σειρές (Αναστασόπουλος και Κούκουζας, 1972):

- α. Την ανώτερη σειρά (υπερκείμενη του λιγνίτη) με μέσο πάχος 70 m, στην οποία συναντώνται οι εξής σχηματισμοί:
 - Ερυθρές άργιλοι με διαστρώσεις λατυποκροκαλοπαγούς και χονδροκλαστικών αποθέσεων
 - Κιτρινόφαια λεπτομερή κλαστικά ιζήματα που συνίστανται από εναλλασσόμενες ενστρώσεις άμμων, αργίλων, αμμούχων μαργών, χαλαρών κροκκαλοπαγών και φακοειδών διαστρώσεων ψαμμιτών και μαργαϊκών ασβεστολίθων.
 - Πρασινότεφρα αργιλομαργαϊκά ιζήματα που συνίστανται από αμμούχες και ιλυώδεις έως αργιλούχες μάργες.
- β. Τη λιγνιτοφόρα σειρά πάχους 50 m ως 70 m. Μεταξύ των λιγνιτικών στρώσεων παρεμβάλλονται ενδιάμεσα στείρα μαργαϊκού τύπου και σπανιότερα άργιλοι και άμμοι.
- γ. Την κατώτερη σειρά (υποκείμενη του λιγνίτη). Κάτω από τη λιγνιτοφόρα σειρά συναντώνται μάργες λευκού έως ανοιχτού τεφρού χρώματος.

Από πλευράς τεκτονικής προκύπτει ότι η κύρια τεκτονική δομή είναι το ρήγμα F₂, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μετάπτωση του κοιτάσματος προς το Δ-ΝΔ τμήμα (Σχήμα 4.2). Επίσης στην περιοχή υπάρχουν και άλλα ρήγματα που δεν επηρεάζουν την γεωμετρία του κοιτάσματος (Τίκα, 2002).

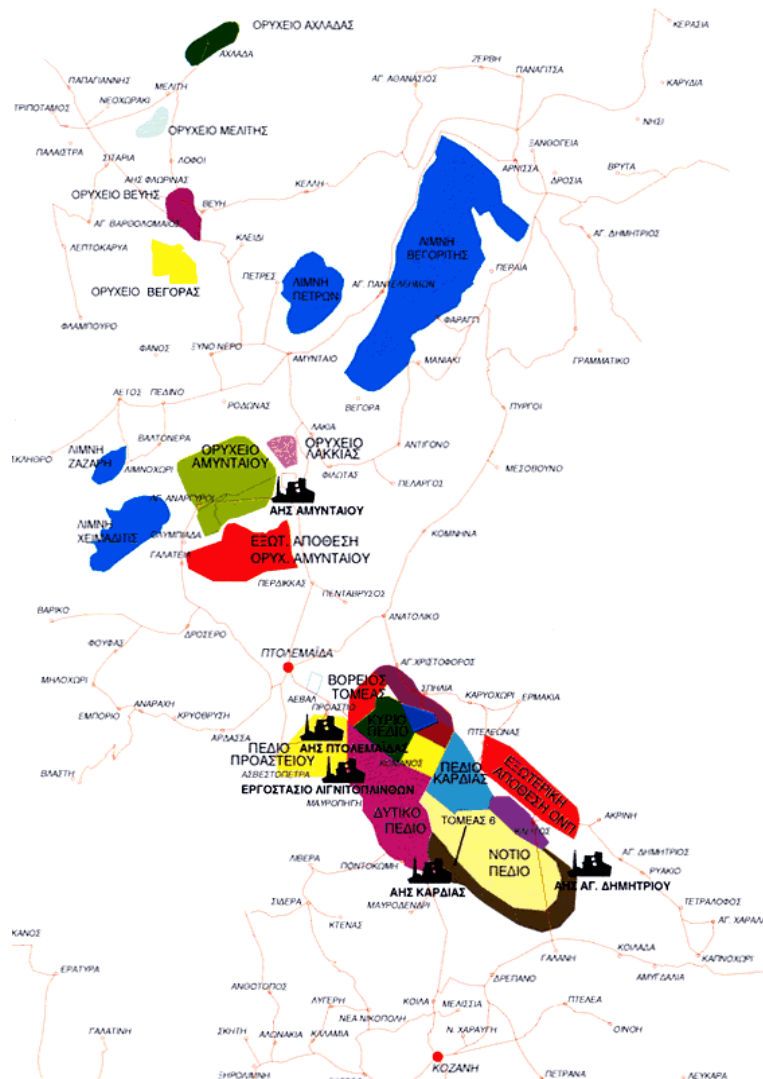
Ο τεκτονισμός της λεκάνης της Μαυροπηγής χαρακτηρίζεται από νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά ρήγματα, καθώς και ορισμένα εγκάρσια σε αυτά, που χωρίζουν σε υπολεκάνες την περιοχή.

Το χαρακτηριστικό αυτών των ρηγμάτων είναι ότι οι μετακινήσεις του εδάφους δεν παραμένουν σταθερές καθ'όλο το μήκος του ρήγματος. Αυτό οφείλεται στην πλαστικότητα των πρηνών καθώς παραμορφώνονται υπό την επίδραση των δυνάμεων του γεωυλικού. Αυτή η τεκτονική διαταραχή έχει προκαλέσει πτυχώσεις κατά μήκος των ρηγμάτων.

Το κοίτασμα λιγνίτη της περιοχής, παρουσιάζει μεταβολές στο πάχος του. Στα βόρεια του κοιτάσματος, το πάχος κυμαίνεται μεταξύ 50 και 150 m, ενώ στα σύνορα με το κοίτασμα του Προαστείου φτάνει τα 250 m. Αύξηση του πάχους του λιγνίτη, παρατηρείται κυρίως κατά την διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Οι μεταβολές του πάχους του στρώματος του λιγνίτη, οφείλονται κατά βάση στις ανωμαλίες του υποβάθρου και στις τεκτονικές δραστηριότητες της περιοχής.

Ολόκληρη η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική δράση, τόσο για τους σχηματισμούς του υποβάθρου, όσο και για τους μετέπειτα ιζηματογενείς σχηματισμούς, με αποτέλεσμα τη μεταμόρφωση και παραμόρφωση των γεωυλικών.

Οι σχηματισμοί της προ-Αλπικής και Αλπικής περιόδου (Σχήμα 4.3) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, όσον αφορά στη δομή τους. Στην κατηγορία του προ-Αλπικού Πελαγονικού υποβάθρου, η οποία περιλαμβάνει σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από αμφιβολιτικούς και λευκούς mica σχιστολόθους καθώς και λευκούς γνεύσιους και στην κατηγορία Αλμόπια, όπου παρατηρούνται μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα, όπως μάρμαρα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι που σχετίζονται άμεσα με την Τριασική – Ιουρασική περίοδο.



Σχήμα 4.1: Χάρτης περιοχής (Τίκα, 2002).

4.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ειδικότερα για την περιοχή της Μαυροπηγής

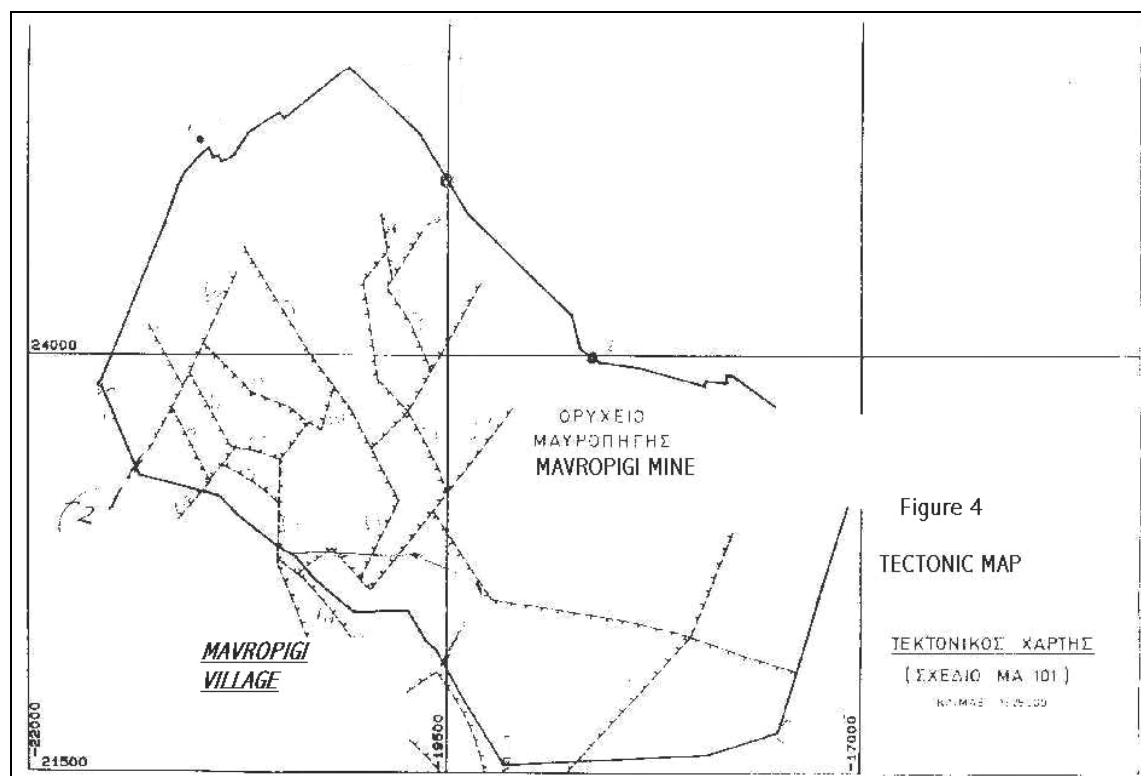
Η απόφαση της Δ.Ε.Η. για επέκταση των εκμεταλλεύσεων δυτικά του Ν.Πεδίου και η ακόλουθη διάνοιξη του ορυχείου Μαυροπηγής, οδήγησε στην εκτέλεση γεωλογικής-γεωτεχνικής έρευνας στην ευρύτερη περιοχή της Μαυροπηγής ώστε να συλλεχθούν τα απαραίτητα στοιχεία. Η ύπαρξη αστοχιών και μετατοπίσεων των πρανών του λιγνιτορυχείου της Μαυροπηγής αποτέλεσε το κίνητρο για την εργασία αυτή.

Το ορυχείο της Μαυροπηγής είναι ένα νέο ορυχείο λιγνίτη που βρίσκεται στο δυτικό μέρος της Πτολεμαΐδας, μέσα στο νομαρχιακό διαμερισμα της Κοζάνης, στη δυτική Μακεδονία (Σχήμα 4.1).

Το ορυχείο ανήκει στο Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας και Αμυνταίου (Λ.Κ.Π.Α) και έχει συνολικά 178 Mt εξορυσσόμενου λιγνίτη. Η αναλογία εξόρυξης του ορυχείου είναι της τάξης των 3,2 m³/τόνο λιγνίτη.

Η τυπική ετήσια παραγωγή είναι 9,5 Mt, για τα 35 χρόνια εκσκαφής που έχουν οριστεί, επί του συνόλου των 55 Mt.

Τα δεδομένα και οι τιμές που παρουσιάζονται και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και την επίλυση του προσομοιώματος, αναφέρονται στην περιοχή της Μαυροπηγής και συγκεκριμένα στο Λ.Κ.Π.Α. Προέκυψαν από επί τόπου δοκιμές καθώς και εργαστηριακές δοκιμές από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 4.2: Τεκτονικός χάρτης Μαυροπηγής (Διαμαντόπουλος, 2003).

4.3 Γεωτεχνική έρευνα

Η γεωτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της γεωλογικής δομής καθώς και των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών περιέλαβε επιτόπου σεισμικές διασκοπήσεις και εργαστηριακές δοκιμές.

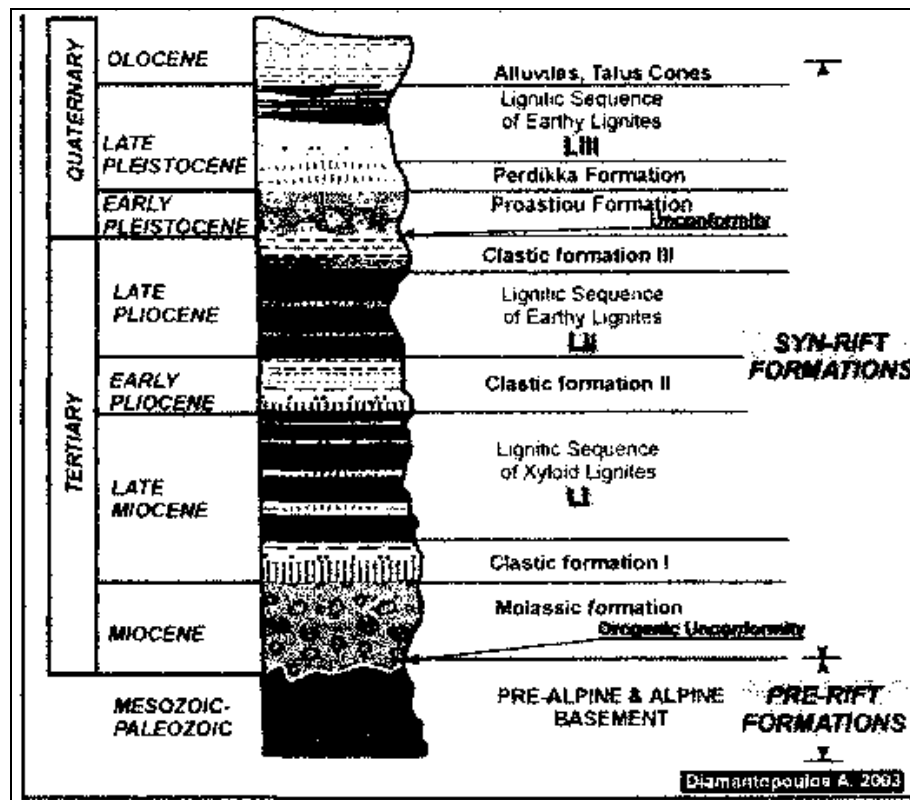
Οι σεισμικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της σεισμικής

διάθλασης και της αντιστροφής των επιφανειακών κυμάτων.

Οι εργαστηριακές δοκιμές περιέλαβαν δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών, δοκιμές συμπιεστότητας, δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (UU, CU & CD), καθώς και δοκιμές άμεσης και περιστροφικής διάτμησης σε δείγματα που πάρθηκαν από την περιοχή της Μαυροπηγής (ΑΠΘ, 2000).

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε μια εικόνα της στρωματογραφίας της περιοχής (Σχήμα 4.3) η οποία χαρακτηρίζεται από τους ακόλουθους σχηματισμούς:

- Υπερκείμενα
- Λιγνιτοφόρα στρώση
- Μάργα
- Εναλλαγές άμμου - ιλύος
- Άμμοι υψηλής διαγένεσης
- Ασβεστόλιθος



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστική γεωλογική τομή της περιοχής της Μαυροπηγής (Διαμαντόπουλος, 2003).

4.4 Υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας

Σύμφωνα με τις επιτόπου παρατηρήσεις, τις ερευνητικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή και τις γεωσεισμικές έρευνες που εκπονήθηκαν, προέκυψε ότι ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σχεδόν επιφανειακά. Συγκεκριμένα, στην περιοχή έδρασης των πύργων ψύξης του Α.Η.Σ. Μαυροπηγής, το υπόγειο νερό συναντάται στα -3 m από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (Τίκα, 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ PLAXIS

5.1 Γενικά

Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων 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. Οι αρχές στις οποίες βασίζεται η μέθοδος διέπονται από μαθηματικά μοντέλα και καταστατικές εξισώσεις. Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο όχι για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα (προσομοιώματα), αλλά και για προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες που είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους.

Η παραμετρική ανάλυση ευστάθειας πρανών που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Plaxis Version 7.0. Το Plaxis, είναι ένα λογισμικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για ειδικές εφαρμογές, κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων παραμόρφωσης και ευστάθειας σε εδάφη και πετρώματα.

Το συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο, πραγματοποιεί επιλύσεις προσομοιωμάτων εδαφικής συμπεριφοράς σε δύο διαστάσεις. Το πρόγραμμα καθαυτό αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα, τα οποία και περιγράφονται σε παρακάτω ενότητες:

- το υποπρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων (input),
- το υποπρόγραμμα υπολογισμών (calculations),
- το υποπρόγραμμα των αποτελεσμάτων (output),
- το υποπρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών (curves).

5.2 Εισαγωγή δεδομένων

Για την επίλυση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Plaxis, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός, αρχικά ενός προτύπου (προσομοίωμα) πεπερασμένων στοιχείων

σε δύο διαστάσεις και ο καθορισμός των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών των υλικών καθώς και των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Οι εργασίες αυτές πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων (input).

Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται ξεκινώντας από το σχεδιασμό του στις δύο διαστάσεις με γραμμές και σημεία που ορίζουν κλειστά γεωμετρικά σχήματα. Η δημιουργία του κατάλληλου δικτύωματος πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιείται αυτόματα από το Plaxis, με βάση το γεωμετρικό πρότυπο που εισάγεται. Μπορεί να υπάρξει πύκνωση ή αραιώση του δικτύωματος των στοιχείων ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος, με σκοπό τη βέλτιστη διακριτοποίηση του γεωμετρικού προσομοιώματος.

Στο υποπρόγραμμα εισάγονται, επίσης οι ιδιότητες και οι συνοριακές συνθήκες των υλικών. Τέλος, στο πρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων σχεδιάζεται και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα για τη δημιουργία της πίεσης των πόρων και επίσης υπολογίζονται οι αρχικές ενεργές τάσεις για τον καθορισμό της αρχικής κατάστασης του προσομοιώματος.

5.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

Η δημιουργία του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με το σχεδιασμό του γεωμετρικού προτύπου, το οποίο αποτελεί την απεικόνιση του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Το γεωμετρικό πρότυπο (προσομοίωμα) αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Τα σημεία και οι γραμμές εισάγονται από το χρήστη, ενώ οι επιφάνειες δημιουργούνται ως κλειστά σχήματα από το ίδιο το πρόγραμμα. Έτσι αρχικά εισάγονται τα γενικά στοιχεία του προσομοιώματος, όπως οι διαστάσεις του και οι μονάδες του και στη συνέχεια οι υπόλοιπες παράμετροι.

Παράλληλα με αυτά τα βασικά στοιχεία, στο σχεδιασμό του γεωμετρικού προσομοιώματος μπορούν να εισαχθούν και κατασκευαστικά αντικείμενα, όπως δοκοί, γεωυφάσματα, αγκύρια, καθώς επίσης και ειδικές κατασκευές όπως σήραγγες, καθώς και γενικότερα χαρακτηριστικά όπως τα στρώματα των υλικών, τα όρια του προσομοιώματος, τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες (Καλογήρου, 2003).

5.2.2 Ιδιότητες υλικών

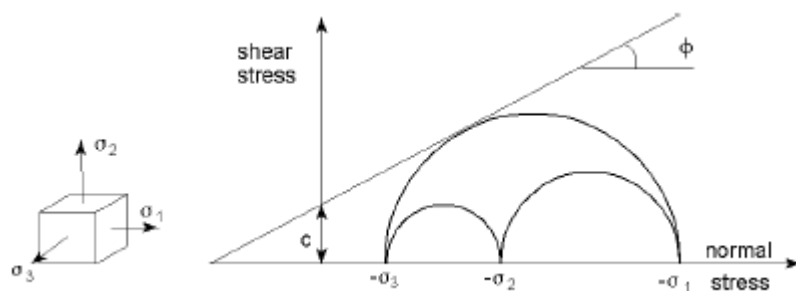
Για καθένα από τα υλικά του προσομοιώματος, εισάγεται μια ομάδα ιδιοτήτων η οποία και αντιστοιχεί σε κάποιο ή κάποια εδαφικά στρώματά του. Τα χαρακτηριστικά στη βάση δεδομένων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στα γενικά χαρακτηριστικά, στις παραμέτρους του υλικού και στις παραμέτρους των διεπιφανειών.

Τα γενικά χαρακτηριστικά αφορούν τον τύπο του εδαφικού προσομοιώματος, τον τύπο της εδαφικής συμπεριφοράς και τις γενικές εδαφικές ιδιότητες όπως είναι τα φαινόμενα βάρη και η διαπερατότητα.

5.2.2.1 Τύπος εδαφικού μοντέλου

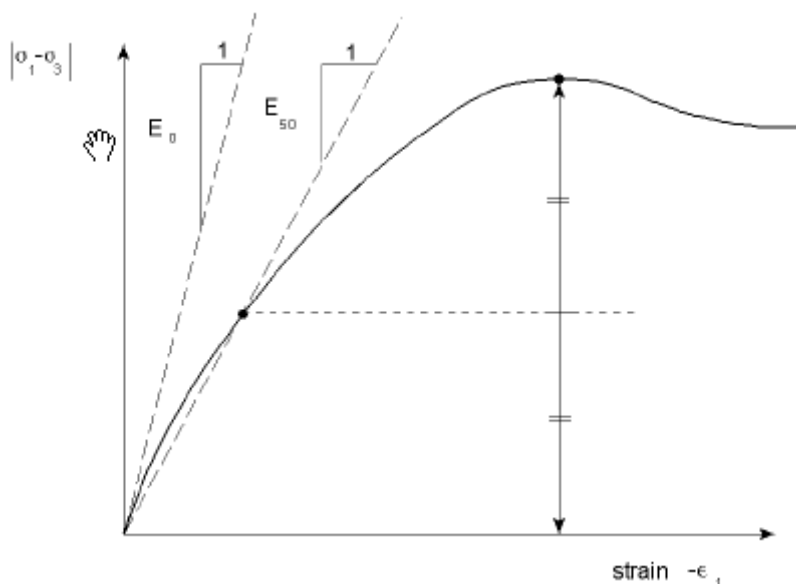
Το Plaxis υποστηρίζει διάφορα πρότυπα που προσομοιάζουν την συμπεριφορά των εδαφών αλλά και άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται κατά τη προσομοίωση. Τα μοντέλα είναι τα εξής:

- Γραμμικά ελαστικό μοντέλο (linear elastic)
Αυτό το μοντέλο αντιπροσωπεύει το νόμο του Hooke για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει δύο ελαστικές παραμέτρους ακαμψίας, το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) και το λόγο του Poisson (ν). Το γραμμικά ελαστικό μοντέλο έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή σε εδάφη και χρησιμοποιείται κυρίως για άκαμπτες συμπαγείς κατασκευές στο έδαφος.
- Μοντέλο Mohr- Coulomb
Όπως ήδη αναφέρθηκε, το μοντέλο Mohr-Coulomb, αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών. Είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο μοντέλο και οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό το ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο, είναι:
 - το μέτρο ελαστικότητας του Young (E),
 - ο λόγος του Poisson (ν),
 - η συνοχή (c),
 - η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και
 - η γωνία διασταλτικότητας (ψ).



Σχήμα 6.7: Κύκλοι τάσης στο κριτήριο Mohr-Coulomb, ένας εκ των οποίων αγγίζει το φάκελο αστοχίας του Coulomb (Plaxis, 1998).

Εκτός αυτών των παραμέτρων, υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης και κάποιων άλλων παραμέτρων, για την επίλυση πιο εξειδικευμένων μοντέλων, όπως ρυθμού αύξησης της ακαμψίας και της συνοχής συναρτήσει του βάθους, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η επιλογή του ορίου αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία. Κανονικά, είναι πιο ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_0 σε εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ελαστοπλαστικής περιοχής. Στις σήραγγες και στις εκσκαφές, προτιμάται το μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση E_{ur} αντί του E_{50} (Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8: Διαχωρισμός μέτρων ελαστικότητας E_0 , E_{50} από αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής σε ξηρό δείγμα (Plaxis, 1998).

- 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. Αυτός ο τύπος μοντέλου χρησιμοποιήθηκε μαζί με το μοντέλο Mohr-Coulomb, στην παρούσα εργασία για σύγκριση αποτελεσμάτων. Βασίζεται στην θεωρία πλαστικότητας και συμπεριλαμβάνει τη διασταλτικότητα του εδάφους.

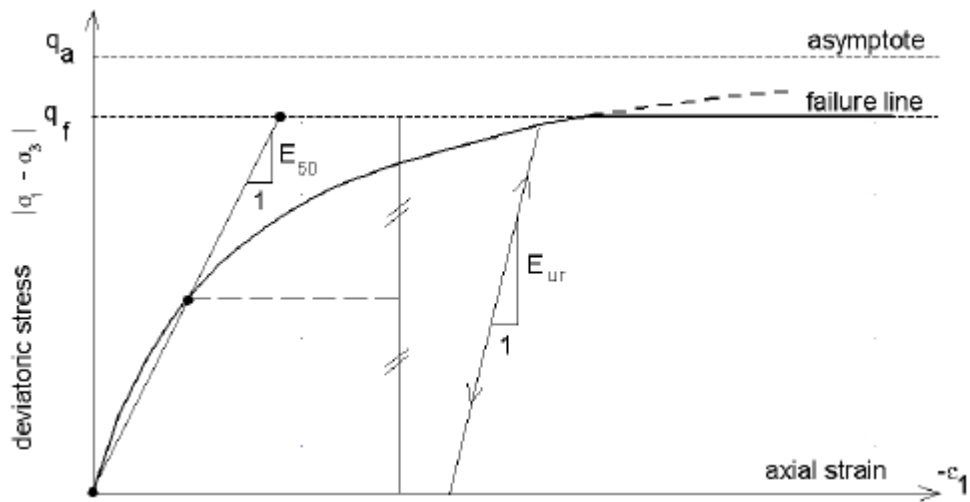
Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου που πρέπει να προσδιοριστούν είναι:

- το σχετικό μέτρο ελαστικότητας E_{50}^{ref} που αντιστοιχεί σε μια πρωταρχική φάση φόρτισης,
- το σχετικό μέτρο ακαμψίας E_{ur}^{ref} , που αφορά κύκλο αποφόρτισης-επαναφόρτισης,
- το σχετικό μέτρο ελαστικότητας E_{oed}^{ref} , που προκύπτει από δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης,

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma}{p^{ref}} \right)^m$$

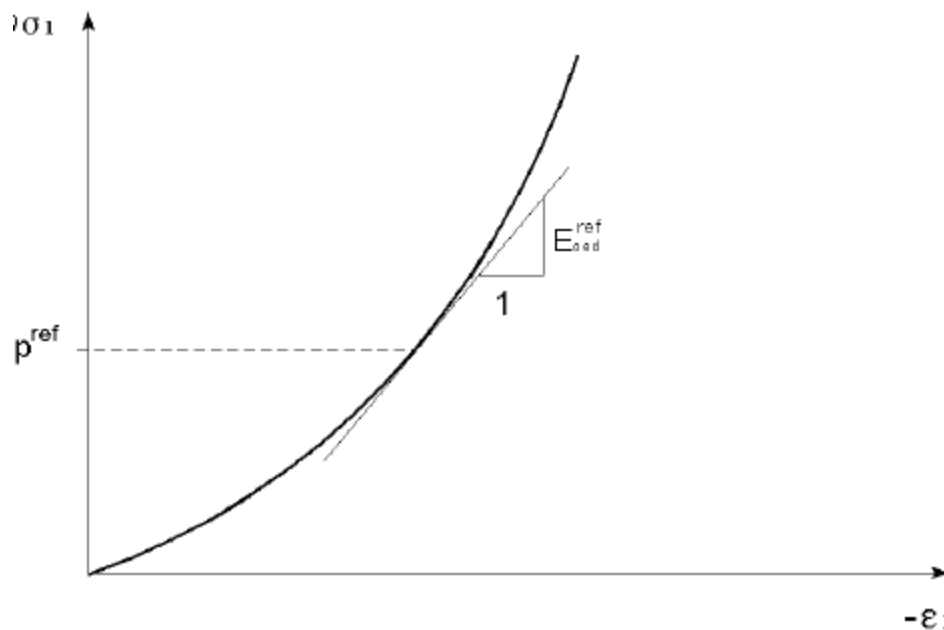
- ο συντελεστής m , που δίνει την τιμή της τάσης που εξαρτάται από την δευτερεύουσα κύρια τάση σ_3 και τέλος,
- τα χαρακτηριστικά του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και γωνία διασταλτικότητας) με τα οποία υπολογίζεται το συντελεστή ασφαλείας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο μοντέλο αυτό, παρουσιάζει η σχέση εξάρτησης μεταξύ της τάσης και της ακαμψίας του εδάφους. Τα μέτρα παραμορφωσιμότητας E_{ur}^{ref} , E_{oed}^{ref} , προτείνονται αυτόματα από το πρόγραμμα τη στιγμή που ορίζεται η τιμή του E_{50}^{ref} .



Σχήμα 6.9: Καμπύλη υπερβολικής μορφής που παρουσιάζει τη σχέση αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης σε τριαξονική δοκιμή φόρτισης (Plaxis, 1998).

Τα μέτρα ελαστικότητας συσχετίζονται μεταξύ τους με κάποιες σχέσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στα Σχήματα 6.9 και 6.10 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις προσδιορισμού των μέτρων ελαστικότητας και πως διαχωρίζεται το ένα από το άλλο (Plaxis, 1998).



Σχήμα 6.10: Διάκριση E_{oed}^{ref} από αποτελέσματα δοκιμών στερεοποίησης (Plaxis, 1998).

Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι εξισώσεις που συσχετίζουν τα μέτρα ελαστικότητας, τα οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό πακέτο.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma'_1}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m$$

όπου, E_{oed}^{ref} : το σχετικό μέτρο ελαστικότητας μονοδιάστατης στερεοποίησης,

p^{ref} : η σχετική πίεση αναφοράς,

m : ο συντελεστής εξάρτησης τάσης και δευτερεύουσας κύριας τάσης σ'_3 ,

σ : η ορθή τάση.

Το μέτρο ελαστικότητας E_{50} σχετίζεται με το αντίστοιχο σχετικό μέτρο ελαστικότητας E_{50}^{ref} με βάση τη σχέση:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma'_3}{p^{ref}} \right)^m$$

όπου, c : η συνοχή,

φ : η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους,

σ'_3 : η μικρότερη κύρια τάση,

p^{ref} : η σχετική πίεση αναφοράς και,

m : συντελεστής με εύρος τιμών $0,5 < m < 1$.

- 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. Το μοντέλο εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε προσομοίωση καταστάσεων πρωτεύουσας στερεοποίησης.

- 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.

5.2.2.2 Συμπεριφορά υλικών όσο αφορά την αποστράγγιση

- **Στραγγιζόμενη συμπεριφορά υλικών**

Όταν χρησιμοποιείται η επιλογή της στραγγιζόμενης συμπεριφοράς δεν αναπτύσσεται υπερπίεση των πόρων. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις ξηρών εδαφών, σε εδάφη με μεγάλη περατότητα που εμφανίζουν πλήρη

αποστράγγιση, καθώς και σε περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού φόρτισης, ή όταν γίνεται ανάλυση μακροχρόνης συμπεριφοράς (οπότε το έδαφος προλαβαίνει να αποστραγγίσει μέσα σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο). Γενικά ο όρος 'drained' (στραγγιζόμενη συμπεριφορά) αναφέρεται σε εδάφη που το νερό στους πόρους τους αναπτύσσει πίεση μόνο ίση με την υδροστατική και αν επιβληθεί σε αυτά κάποιο φορτίο, το νερό στραγγίζει χωρίς να παραλάβει μέρος της φόρτισης (Plaxis, 1998). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος αυτός δεν σημαίνει ότι όλο το νερό έχει απομακρυνθεί από τους πόρους του πετρώματος. Το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο. Απλά δεν υπάρχει κάποια επιπλέον πίεση πόρων η οποία να προκαλείται από την επιβολή φορτίου (Craig, 2004). Κατά την επίλυση των προσομοιωμάτων επιλέχτηκε η στραγγιζόμενη συμπεριφορά υλικών.

- **Μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά υλικών**

Αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται στην περίπτωση κατά την οποία γίνεται πλήρης ανάπτυξη της πίεσης των πόρων. Η ροή του νερού των πόρων μπορεί να παραβλεφθεί λόγω της χαμηλής διαπερατότητας (άργιοι), ή/και του υψηλού ρυθμού φόρτισης. Τα εδαφικά στρώματα που ορίζονται ως μη στραγγιζόμενα συμπεριφέρονται κατά αυτόν τον τρόπο, ακόμη και αν μέρος τους βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (Plaxis, 1998).

- **Μη πορώδη υλικά**

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

5.2.2.3 Χαρακτηριστικά υλικών

Μετά τον προσδιορισμό των μοντέλων συμπεριφοράς εισάγονται όλα τα γενικά χαρακτηριστικά των υλικών, όπως χαρακτηριστικά ακαμψίας, αντοχής αλλά και γενικές ιδιότητες όπως διαπερατότητα και μοναδιαία φαινόμενα βάρη.

- Μέτρο ελαστικότητας (E)

Όταν σε ένα σώμα ασκηθούν βραδέως και προοδευτικά αυξανόμενες εξωτερικές δυνάμεις, τότε το σώμα παραμορφώνεται. Η παραμόρφωση συνεχίζεται μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία μεταξύ των εξωτερικών και των αναπτυσσόμενων εσωτερικών δυνάμεων.

Μετά τη βαθμιαία αποφόρτισή του, το σώμα επανέρχεται μερικώς ή ολικώς στις αρχικές διαστάσεις του. Η ιδιότητα των σωμάτων να επανέρχονται πλήρως στην αρχική τους μορφή μετά από αποφόρτιση, ονομάζεται ελαστικότητα (Μαρκέτος, 1992).

Μέσα στην ελαστική περιοχή, εμφανίζεται μια αναλογία μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης. Στην περιοχή αυτή, ισχύει ο νόμος του Hook (1678), κατά τον οποίο οι μεταβολές των γεωμετρικών διαστάσεων είναι ανάλογες των μεταβολών των τάσεων (Δημόπουλος, 1986). Η αναλογία αυτή εκφράζεται με το μέτρο ελαστικότητας E, το οποίο ορίζεται ως η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί σε κάποιο υλικό για την παραμόρφωσή του κατά μια μονάδα μήκους.

Γραφικά, το μέτρο ελαστικότητας ισούται με την κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης που σχεδιάζεται από μετρήσεις τριαξονικών ή μονοαξονικών δοκιμών. Είναι:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

όπου: E: το μέτρο ελαστικότητας του Young,

$d\sigma$: η μεταβολή της τάσης για τη γραμμική περιοχή της καμπύλης,

$d\varepsilon$: η μεταβολή της παραμόρφωσης για την ίδια περιοχή.

Ουσιαστικά το μέτρο ελαστικότητας αφορά το πολύ αρχικό τμήμα της καμπύλης, όπου το δείγμα κινείται ακόμη μέσα στην ελαστική περιοχή και οι παραμορφώσεις του είναι της τάξης του 0,002 %.

- Λόγος Poisson (ν)

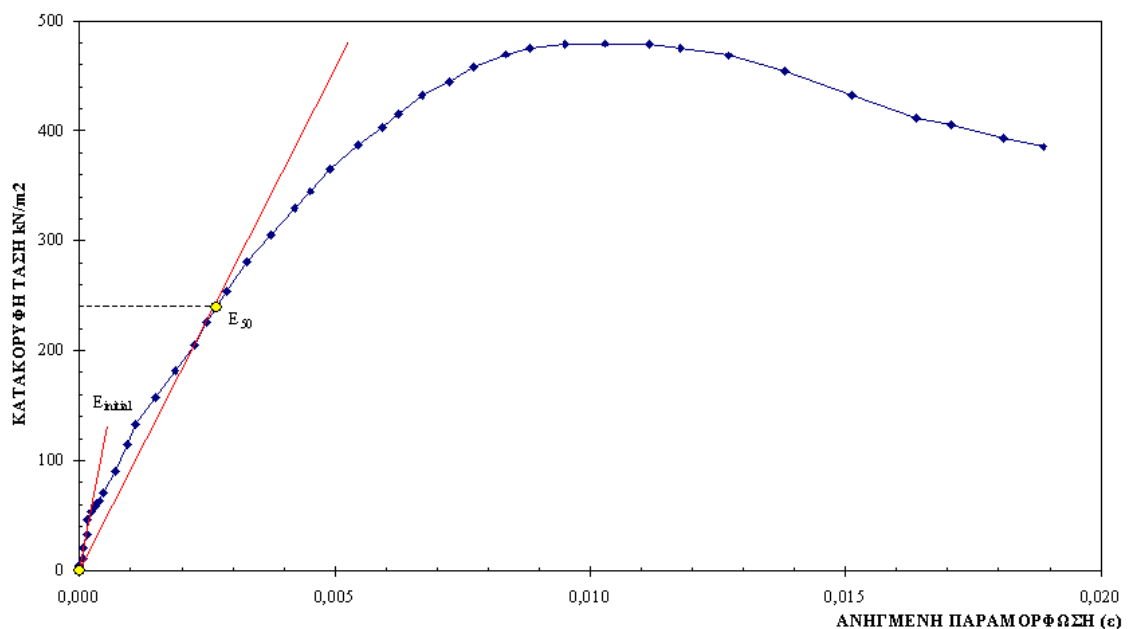
Σε κάθε υλικό που καταπονείται ελαστικά σε μονοαξονική καταπόνηση, αποδεικνύεται πειραματικά ότι το πηλίκο της ανηγμένης πλευρικής παραμόρφωσης ε_x προς την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση ε_y είναι ίσο με ένα σταθερό μέγεθος ν στο ελαστικό εύρος κατανομής. Έχουμε συνεπώς, σε ομοιογενή και ισότροπα υλικά, ελαστικά καταπονούμενα:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$$

Η σταθερά αυτή ονομάζεται συντελεστής εγκάρσιας παραμόρφωσης ή λόγος του Poisson (Μαρκέτος, 1992).

- Συνοχή (C)

Η συνοχή, είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής ενός υλικού και ουσιαστικά εκφράζει την ικανότητα του να ανθίσταται σε διατμητικές δυνάμεις. Η συνοχή σε ένα εδαφικό υλικό εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε νερό, την πυκνότητα και την πλαστικότητα του εδάφους (Αγιουτάντης, 2002).



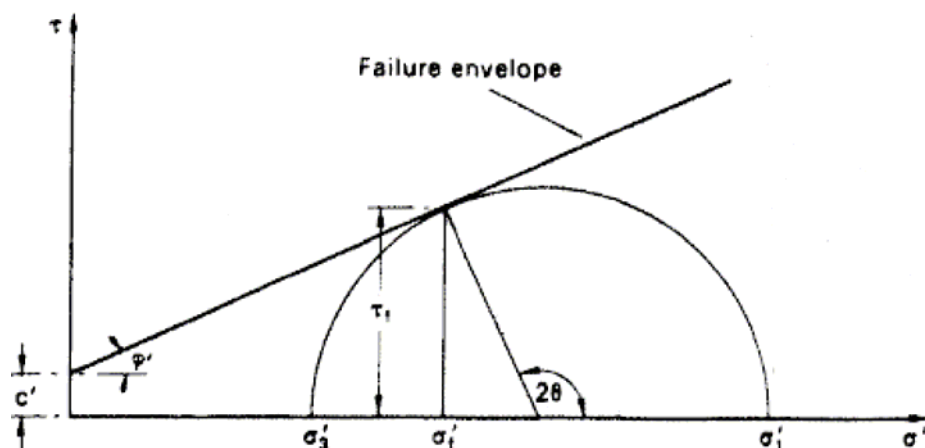
Σχήμα 5.1: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας (Καλογήρου, 2000).

Η συνοχή ενός υλικού η οποία αποτελεί το αίτιο εκδήλωσης της διατμητικής αντοχής των εδαφών οφείλεται στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων. Υπολογίζεται γραφικά με βάση το διάγραμμα διατμητικής - ορθής τάσης που προκύπτει από μετρήσεις δοκιμής διάτμησης και ειδικότερα από το σημείο της περιβάλλουσας αστοχίας του Mohr με τον άξονα των τεταγμένων.

- Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)

Η διατμητική αντοχή ενός εδαφικού υλικού εξαρτάται εκτός από τη συνοχή του και από την τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και την αλληλοεμπλοκή τους που οφείλεται στο σχήμα τους. Αυτό το «εσωτερικό αίτιο» ονομάζεται εσωτερική τριβή και το μέγεθός του εξαρτάται από το ορθό φορτίο στην επιφάνεια ολίσθησης (Στειακάκης, 1996).

Στα εδάφη, η γωνία εσωτερικής τριβής εκφράζει ουσιαστικά ένα μέτρο της γωνίας φυσικής απόθεσής τους. Για παράδειγμα στην περίπτωση ξηρής άμμου η γωνία αυτή είναι περίπου 30° , ενώ μέτριας ή μεγάλης πλαστικότητας εδαφικά υλικά εμφανίζουν γωνία εσωτερικής τριβής της τάξης των 15° (Αγιουτάντης, 2002). Η γωνία εσωτερικής τριβής υπολογίζεται από την κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας του Mohr (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Προσδιορισμός εσωτερικής γωνίας τριβής πάνω στο κριτήριο αστοχίας του Mohr (Craig, 1997).

- Γωνία διασταλτικότητας (ψ)

Η γωνία διασταλτικότητας ψ εκφράζει την τάση ενός εδαφικού υλικού να διογκώνεται κάτω από συνθήκες διάτμησης. Ορίζεται είτε με βάση την μεταβολή της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας ανηγμένης παραμόρφωσης ($d\epsilon_1$ και $d\epsilon_3$), ή με βάση τη μεταβολή της ανηγμένης ογκομετρικής παραμόρφωσης ($d\epsilon_v$) και της μέγιστης διατμητικής ανηγμένης παραμόρφωσης ($d\gamma$) (Plaxis, 1998).

- Μοναδιαίο βάρος (Ξηρό και Υγρό Μοναδιαίο βάρος)

Μοναδιαίο βάρος ενός υλικού είναι ο λόγος του συνολικού βάρους του υλικού (μαζί με το νερό στους πόρους του) προς το συνολικό όγκο του υλικού. Το μοναδιαίο βάρος ταυτίζεται με τον όρο φαινόμενο βάρος, το οποίο ισούται με το λόγο του συνολικού βάρους του υλικού προς όγκο νερού ίσο με το συνολικό όγκο του υλικού (Αγιουτάντης, 2002). Το ξηρό βάρος, γ_{dry} , αποδίδεται στο λογισμικό Plaxis σε όλα τα υλικά πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα ενώ το γ_{wet} σε όλα τα υλικά που βρίσκονται κάτω από αυτόν (υπονοώντας το κορεσμένο φαινόμενο βάρος γ_{sat}).

Για πορώδη υλικά το ξηρό μοναδιαίο βάρος είναι μικρότερο από ότι το υγρό μοναδιαίο βάρος. Για παράδειγμα στις άμμους το γ_{dry} είναι περίπου 16 kN/m^3 ενώ το αντίστοιχο γ_{wet} είναι περίπου 20 kN/m^3 . Τα αργιλώδη εδάφη δεν είναι ποτέ εντελώς ξηρά. Πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα οι άργιλοι μπορεί να είναι σε κατάσταση κορεσμού εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων. Άλλες περιοχές πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να είναι μερικώς κορεσμένες. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα ήταν πιο σωστό να εισαχθεί μία τιμή του ξηρού βάρους λίγο μεγαλύτερη της πραγματικής (Plaxis, 1998).

- Διαπερατότητα

Οι διαπερατότητες στο Plaxis έχουν το μέγεθος της ταχύτητας (μήκος προς χρόνο). Οι τιμές των διαπερατοτήτων είναι σημαντικές όταν γίνεται ανάλυση στερεοποίησης (consolidation analysis) ή υπόγειας ροής (groundwater flow calculation). Στο πρόγραμμα γίνεται διάκριση μεταξύ της οριζόντιας k_x και της κατακόρυφης k_y , εφόσον κάποιοι τύποι εδάφους

συμπεριφέρονται ανισότροπα και παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις δύο κατευθύνσεις ως προς τη διαπερατότητα. Ωστόσο, προσοχή θα πρέπει να δοθεί όταν προκύπτουν ταυτόχρονα πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές τιμές σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθώς αυτό δημιουργεί προβλήματα στο μητρώο ακαμψίας (Plaxis, 1998).

5.2.3 Κριτήρια αστοχίας γεωϋλικών

Η εμφάνιση αστοχίας σε ένα υλικό μελετάται συνήθως από κάποιο αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας. Τα κριτήρια αστοχίας των υλικών, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με δύο τρόπους:

- 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 (Αγιουτάντης, 2002).

5.2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb

Αν σε ένα σημείο στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους η διατμητική τάση γίνει ίση με τη διατμητική αντοχή αυτού, στο επίπεδο 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):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

όπου c και φ είναι οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα). Σύμφωνα με τη 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:

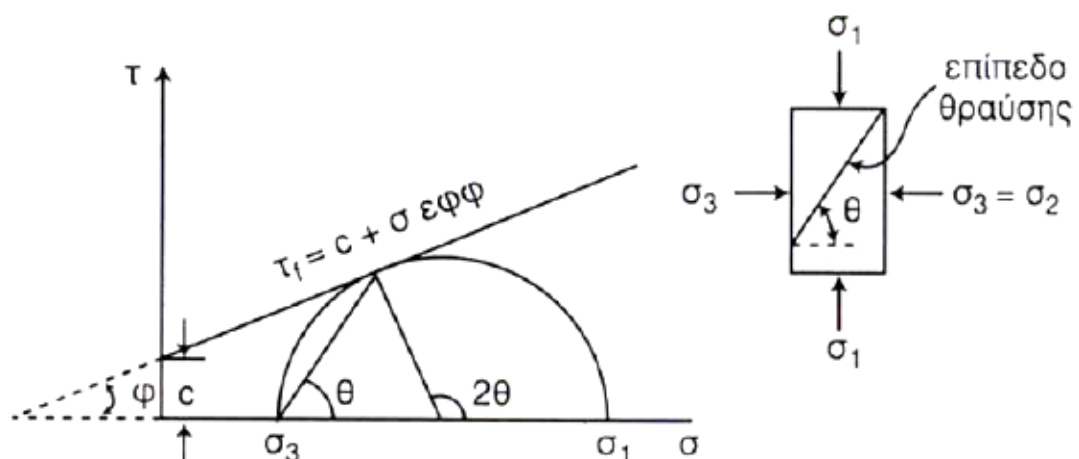
$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

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

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

Έστω ζεύγος τιμών των τάσεων (σ_1, σ_3) , τέτοιων που να προκαλέσουν τη θραύση του εδάφους. Ταυτόχρονα, πρέπει να πληρούνται και η συνθήκη του Coulomb.

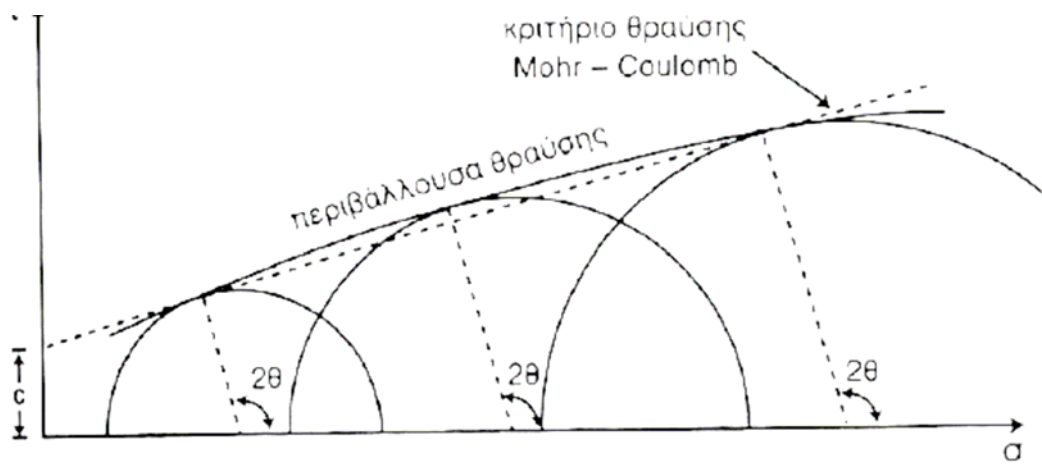
Αυτό σημαίνει ότι η ευθεία θραύσης του Coulomb και ο κύκλος θραύσης του Mohr (Σχήμα 5.3) έχουν ένα κοινό σημείο, το σημείο επαφής τους, δηλαδή η ευθεία του Coulomb είναι εφαπτόμενη του κύκλου του Mohr.



Σχήμα 5.3: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Κολέτσος, 2004).

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

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



Σχήμα 5.4: Περιβάλλουσα αστοχίας (Κολέτσος, 2004).

Η μηχανική σημασία της περιβάλλουσας του Mohr μπορεί να γίνει αντιληπτή από τις ακόλουθες περιπτώσεις, που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την επίλυση του κριτηρίου (Σχήμα 5.4):

1. Εάν ο κύκλος του Mohr, για δεδομένη φόρτιση (σ_1, σ_3) βρίσκεται κάτω από την περιβάλλουσα θραύσης, το έδαφος είναι ευσταθές για τη φόρτιση αυτή.
2. Εάν ο κύκλος του Mohr εφάπτεται της περιβάλλουσας, σε κάποια επιφάνεια εντός του εδάφους η αντοχή του βρίσκεται σε οριακή κατάσταση. Η επιφάνεια αυτή κλίνει κατά γωνία θ ως προς τη διεύθυνση της μικρότερης κύριας τάσης.
3. Δεν είναι δυνατό ο κύκλος του Mohr να τέμνει την περιβάλλουσα, δεδομένου ότι κάθε προσπάθεια να επιβληθεί φόρτιση μεγαλύτερη από την αντοχή του εδάφους στην αστοχία, θα οδηγήσει σε γενική κατάρρευσή του.

Το 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).

5.2.3.2 Κριτήριο αστοχίας Von Mises

Είναι το λεγόμενο κριτήριο μεγίστης διατμητικής τάσης. Είναι απλό κριτήριο, αλλά 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, λαμβάνοντας υπόψη αυτή την εναλλακτική, θεωρεί ότι η αστοχία σε ένα υλικό ξεκινά όταν η οκταεδρική διατμητική τάση προσεγγίσει μια κρίσιμη τιμή k . Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση (Chen and Han, 1988):

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{\frac{2}{3}} k$$

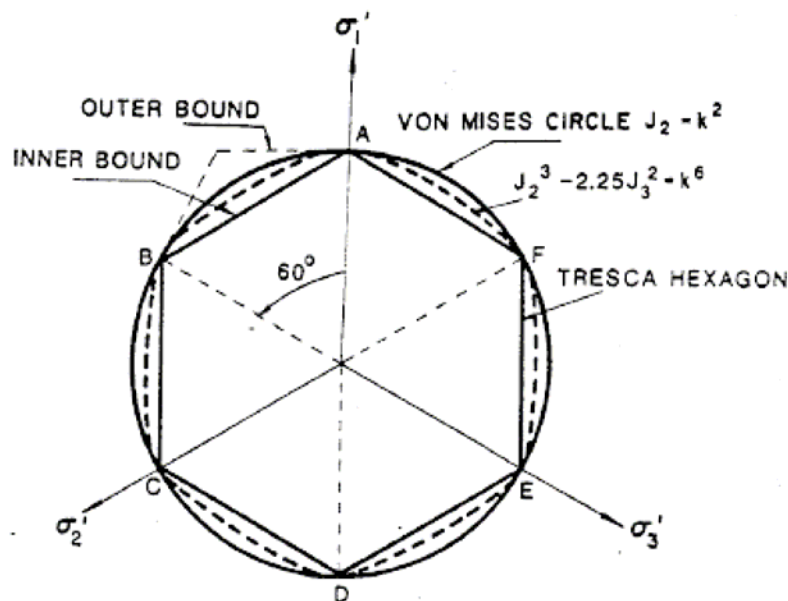
ή αλλιώς, συναρτήσει των κυρίων τάσεων είναι:

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

όπου k είναι η τάση αστοχίας σε διάτμηση. Η τάση αστοχίας σε μια δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού είναι $\sigma_1 = \sigma_0$, ενώ επίσης $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Γραφικά ο κύκλος του κριτηρίου Von Mises περικλείει το εξάγωνο του κριτηρίου Tresca. Παρ' όλ' αυτά, στην περίπτωση που στα δύο κριτήρια συμφωνούν οι τιμές του k (ίση αντοχή σε διάτμηση), ο κύκλος βρίσκεται εντός του εξαγώνου (Chen and Han, 1988).

Στο χώρο των κυρίων τάσεων, η επιφάνεια αστοχίας είναι ένας κύλινδρος που περικλείει το εξαγωνικό πρίσμα του Tresca, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, όπου απεικονίζονται μαζί τα κριτήρια των Tresca-Von Mises.



Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση κριτηρίων αστοχίας Von Mises και Tresca στο χώρο των ενεργών τάσεων (Chen and Han, 1988).

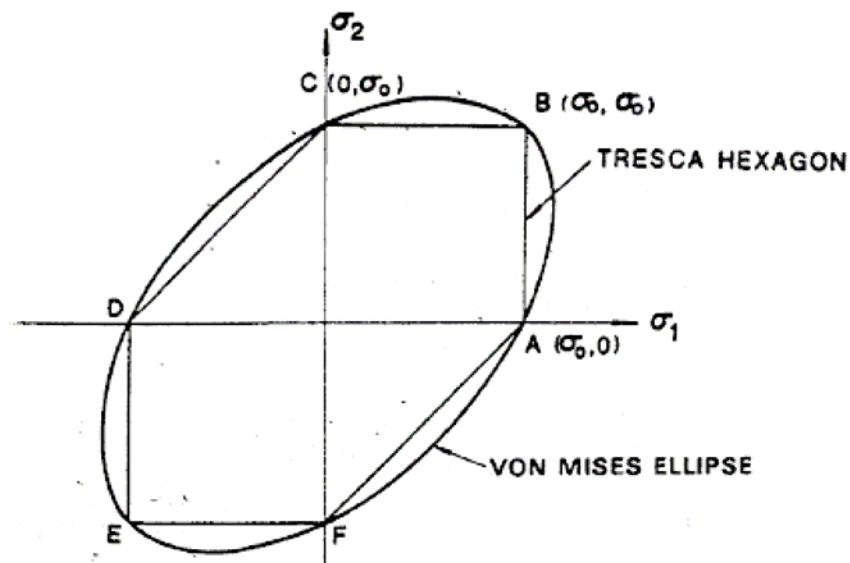
5.2.3.3 Κριτήριο αστοχίας Tresca

Με βάση το 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).

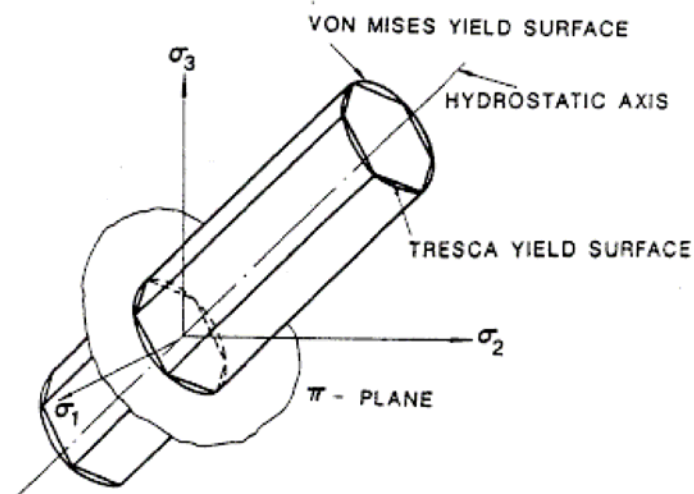
Σύμφωνα με τον Tresca, η διαρροή σε όλκιμα υλικά κάτω από συνθήκες σύνθετης εντατικής κατάστασης συμβαίνει όταν η μέγιστη διατμητική τάση γίνει ίση με τη μέγιστη διατμητική τάση σ_{Δ} , που αναπτύσσεται τη στιγμή της διαρροής, όταν το υλικό καταπονείται σε καθαρό εφελκυσμό. Η μαθηματική διατύπωση του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

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

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



Σχήμα 5.6: Κριτήρια αστοχίας στο επίπεδο $\sigma_3=0$ (Chen and Han, 1988).



Σχήμα 5.7: Επιφάνειες αστοχίας στο χώρο των κυρίων τάσεων (Chen and Han, 1988).

5.2.3.4 Κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager

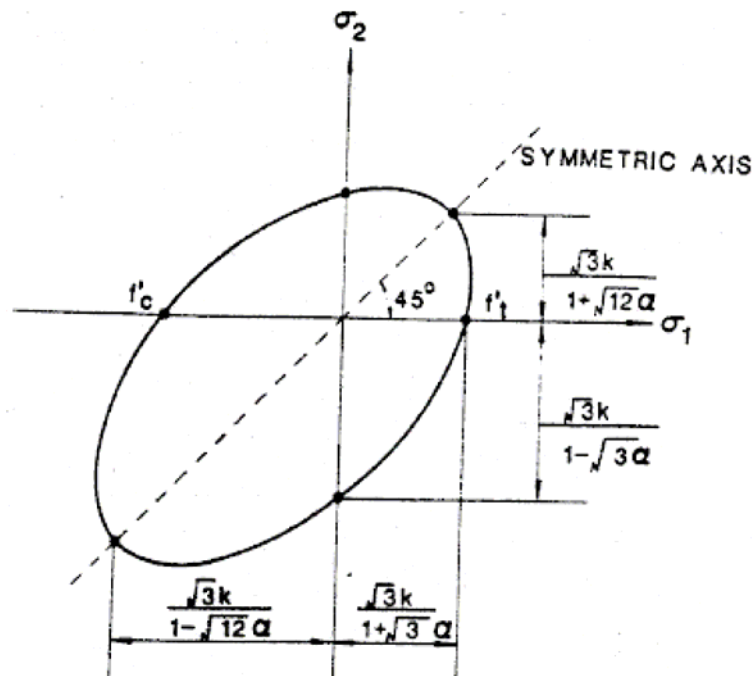
Το κριτήριο αυτό αποτελεί μια γενίκευση της υπόθεσης Mohr - Coulomb και δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση:

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k,$$

όπου f η συνάρτηση διαρροής, α και k οι θετικές σταθερές του υλικού και J_1, J_2 , οι σταθερές του αποκλίνοντα τανυστή τάσης.

Στην περίπτωση όπου $\alpha=0$, προκύπτει το κριτήριο του Von-Misses, δηλαδή η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από έναν ορθό κύλινδρο.

Στην περίπτωση που $\alpha > 0$, η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από μία ορθή πυραμίδα, της οποίας η κορυφή βρίσκεται στην αρχή των αξόνων (Αγιουτάντης 2002). Στο συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας η μόνη διαφοροποίηση από αυτό των Mohr – Coulomb, είναι η επίδραση της υδροστατικής πίεσης.



Σχήμα 5.8: Κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager στο επίπεδο $\sigma_3 = 0$ (επίπεδη τάση) (Chen and Han, 1988).

5.2.4 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που επιλέχτηκαν για το αρχικό προσομοίωμα ήταν οι εξής:

- Στα κατακόρυφα όρια του προσομοιώματος εφαρμόστηκε μηδενική οριζόντια μετατόπιση ($u_x = 0$), που σημαίνει ότι για τα σημεία των γραμμών αυτών επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον y άξονα. Η συντεταγμένη x των γραμμών αυτών έχει την τιμή της υψηλότερης ή χαμηλότερης συντεταγμένης x ολόκληρου του προσομοιώματος.

- Στο κάτω όριο του προσομοιώματος (οριζόντια γραμμή), εφαρμόστηκε μηδενική μετατόπιση και ως προς τους δύο άξονες ($u_x = u_y = 0$), που σημαίνει ότι η γραμμή αυτή είναι πακτωμένη. Τα σημεία αυτής της γραμμής έχουν συντεταγμένη y ίση με τη χαμηλότερη τιμή της συντεταγμένης y σε όλο το προσομοίωμα.

5.2.5 Διακριτοποίηση

Μετά την εισαγωγή των χαρακτηριστικών και της γεωμετρίας του προσομοιώματος, διαμορφώθηκε το δικτύωμα των στοιχείων που αποτελούν το προσομοίωμα. Με τον καθορισμό του δικτυώματος (mesh), επιτυγχάνεται η ικανοποιητική διακριτοποίηση των στοιχείων που οδηγούν και στην επιτυχή επίλυση του προσομοιώματος. Ο χρήστης του λογισμικού προγράμματος Plaxis έχει την δυνατότητα να πυκνώσει ή να αραιώσει το πλέγμα, συμβάλλοντας στην βέλτιστη επίλυση του προβλήματος.

5.2.6 Υδρολογικές συνθήκες

Τελευταίο στάδιο αυτού του υποπρογράμματος, είναι ο προσδιορισμός των υδρολογικών συνθηκών. Από τη στιγμή που υπάρχει νερό σε κάποιο προσομοίωμα επίλυσης πρέπει να εισαχθεί το μοναδιαίο βάρος του νερού, οι πιέσεις νερού των πόρων και τα επίπεδα του 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. Ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να οριστεί από δύο ή περισσότερα σημεία πάνω στο προσομοίωμα, χωρίς να αλληλεπιδρά με αυτό.

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

$$\sigma_w = p_{steady} + p_{excess}$$

Οι πιέσεις των πόρων σταθερής κατάστασης, είναι οι πιέσεις που αντιπροσωπεύουν μια σταθερή υδραυλική κατάσταση. Μια τέτοια κατάσταση υπάρχει όταν εξωτερικές υδατικές συνθήκες παραμένουν σταθερές για μια

μακρά περίοδο. Για να επιτευχθεί μια σταθερή υδραυλική κατάσταση δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει στατική ισορροπία στις πιέσεις των πόρων εφόσον και περιπτώσεις ροής υπόγειων υδάτων μπορούν να οδηγήσουν σε σταθερή κατάσταση.

Οι υπερπιέσεις των πόρων είναι πιέσεις που προκύπτουν από την επιβολή φορτίου σε υλικά τα οποία βρίσκονται σε αστράγγιστες συνθήκες (Παπακωνσταντίνου, 2006).

5.3 Υπολογισμοί

Το δεύτερο υποπρόγραμμα είναι αυτό των υπολογισμών (Calculations). Στο Plaxis, υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές τύπων υπολογισμών. Το πρόγραμμα θεωρεί μόνο ανάλυση παραμόρφωσης και διαχωρίζει τους τύπους των υπολογισμών σε: α) ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του προσομοιώματος (plastic), β) ανάλυση στερεοποίησης (consolidation), γ) ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο πρώτος τύπος υπολογισμού, γιατί πάνω σε αυτό του τύπο υπολογισμού θέλαμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά των προσομοιωμάτων.

Κατασκευάστηκαν δύο προσομοιώματα πρανών, ένα αρχικό προσομοίωμα αποτελούμενο από μάργα και λιγνίτη και ένα δεύτερο προσομοίωμα σταδιακών εκσκαφών επίσης αποτελούμενο από μάργα και λιγνίτη.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τρεις φάσεις επίλυσης για το αρχικό προσομοίωμα, οι συνολικοί πολλαπλασιαστές (total multipliers), η σταδιακή κατασκευή (staged construction) και η μείωση των μηχανικών παραμέτρων (ϕ -c reduction) και δώδεκα φάσεις επίλυσης στο δεύτερο προσομοίωμα των σταδιακών εκσκαφών, τρεις σε κάθε στάδιο.

- Στην περίπτωση των συνολικών πολλαπλασιαστών (total multipliers), ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων. Τα μέγιστα φορτία που ορίζονται από τους συνολικούς πολλαπλασιαστές φόρτισης, εφαρμόζονται ακριβώς στο τέλος κάθε σταδίου υπολογισμών, δεδομένου ότι δεν έχει εμφανιστεί προηγουμένως μηχανισμός θραύσης ή αποφόρτισης.

- Στην περίπτωση της σταδιακής κατασκευής (staged construction), ο χρήστης ορίζει την τελική κατάσταση κάθε σταδίου μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του προσομοιώματος ή την πίεση των πόρων. Η διαδικασία αυτή δίνει μία ρεαλιστική προσέγγιση στη συμπεριφορά των εδαφών έπειτα από την διαφόρων κατασκευαστικών έργων ή εκσκαφών. Εκτός από τη μεταβολή της πίεσης των πόρων και της γεωμετρίας του προσομοιώματος, μπορούν επίσης να μεταβληθούν και οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών που συμμετέχουν στο προσομοίωμα. Για τον προσδιορισμό του κάθε σταδίου κατασκευής, ο χρήστης επιστρέφει στο πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων μέσα από το πρόγραμμα υπολογισμών και ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί διάφορα στοιχεία (κατασκευαστικά ή εδαφικά) του αρχικού εδαφικού προσομοιώματος. Επίσης δίνεται η πιθανότητα στο χρήστη να υποβιβάσει τον υδροφόρο ορίζοντα ώστε να μεταβάλει την πίεση των πόρων.
- Η ανάλυση της ευστάθειας στο Plaxis μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες, όπως τις παραμέτρους αντοχής των εδαφικών υλικών (phi-c reduction). Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση που χρησιμοποιείται επίλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών. Ο χρόνος δε λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση αυτή. Η διαδικασία αυτή γίνεται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανούς ή μίας κατασκευής. Ο συνολικός πολλαπλασιαστής ΣMsf χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων αντοχής σε ένα δεδομένο στάδιο της ανάλυσης. Στην αρχή κάθε επίλυσης, η τιμή του παράγοντα ΣMsf τίθεται ίση με 1,0 έτσι όλες οι παράμετροι των υλικών να έχουν αρχικά τις μη μειωμένες τιμές. Οι παράμετροι αντοχής μειώνονται αυτόματα μέχρι αστοχίας της κατασκευής και στο σημείο αυτό ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

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

Επίσης στο σημείο αυτό, μπορούν να επιλεγούν τα σημεία που βάσει αυτών θα υπολογιστούν και θα προσδιοριστούν οι μετέπειτα καμπύλες τάσης-

παραμόρφωσης ή μεταβολής τάσεων που βρίσκονται συνήθως όπου αναμένεται συγκέντρωση υψηλών τάσεων και παραμορφώσεων.

5.4 Αποτελέσματα

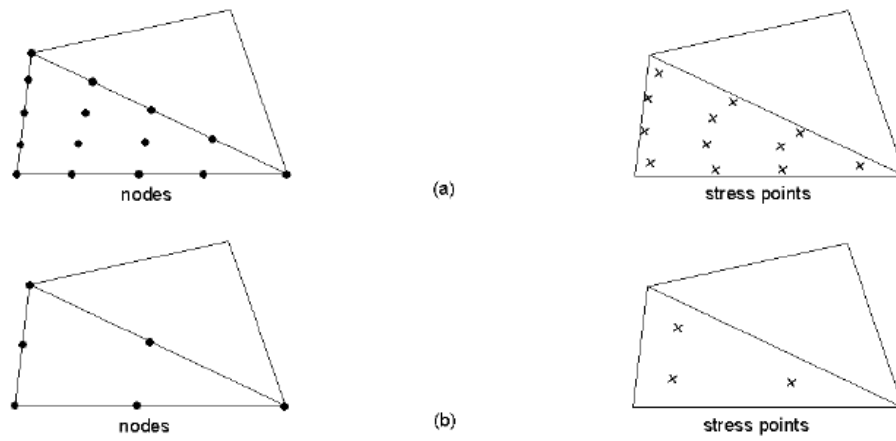
Τα κύρια ζητούμενα που υπολογίζονται από την επίλυση ενός προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων είναι οι παραμορφώσεις στους κόμβους των στοιχείων και οι τάσεις στα τασικά σημεία. Σε αυτό το υποπρόγραμμα (output) παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο υποπρόγραμμα, με τη δυνατότητα επέμβασης από τον χρήστη.

Το Plaxis διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό από διαφορετικούς τρόπους απεικόνισης των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Οι παραμορφώσεις, οι τάσεις (ενεργές τάσεις, πιέσεις πόρων), οι μετατοπίσεις, οι κατασκευές και οι διεπιφάνειες, τα σημεία αστοχίας, οι σχετικοί πίνακες αποτελεσμάτων (τάσης-παραμόρφωσης, μετατοπίσεων) και τα διαγράμματα σε τομές του προσομοιώματος (cross-section), είναι κάποιες από τις επιλογές μελέτης και παρατήρησης που προσφέρει το συγκεκριμένο υποπρόγραμμα.

5.5 Σχεδιασμός καμπυλών

Το υποπρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών (Curves) χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό διαγραμμάτων φορτίων - μετατοπίσεων, χρόνου - μετατοπίσεων καμπυλών τάσης - παραμόρφωσης και τασικών διαδρομών για προεπιλεγμένα σημεία του γεωμετρικού προσομοιώματος. Οι καμπύλες αυτές απεικονίζουν την ποσοτική ανάπτυξη συγκεκριμένων παραμέτρων κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων υπολογισμών και δίνουν μια εικόνα για την συνολική και τοπική συμπεριφορά του εδάφους.

Στην επιλογή των σημείων γίνεται διάκριση μεταξύ των κόμβων και των τασικών σημείων (Σχήμα 5.9). Γενικά, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό καμπυλών φορτίων-μετατοπίσεων και τα τασικά σημεία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων και τασικών διαδρομών. Στα προσομοιώματα της εργασίας μελετήθηκαν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες έδωσαν και πληροφορίες για το συντελεστή ασφαλείας κάθε προσομοιώματος.



Σχήμα 5.9: Διάκριση μεταξύ κόμβων και τασικών σημείων σε α) δεκαπεντακομβικό και β) εξακομβικό στοιχείο (Plaxis, 1998).

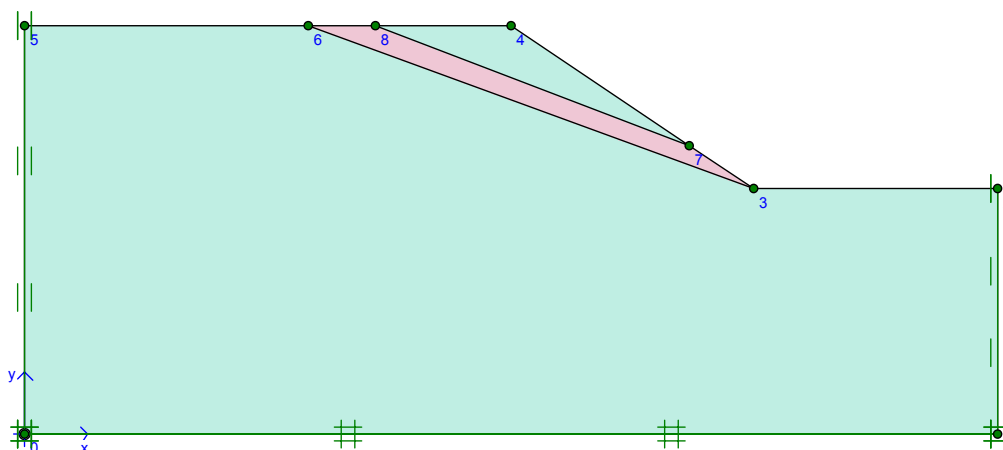
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

6.1 Γενικά

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας των πρανών, βασίστηκε και προσομοιώθηκε με βάση τις συνθήκες του λιγνιτωρυχείου της Μαυροπηγής στην Πτολεμαΐδα.

Αρχικά εισάγονται οι μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου (που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι m, kN και days), και ορίζεται ο τύπος ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η ανάλυση επίπεδης τάσης (plain strain) δεδομένου ότι το προσομοίωμα έχει μεγάλη έκταση ως προς την κάθετη προς το επίπεδο τομής του πρανούς διεύθυνση και οι παραμορφώσεις στην διεύθυνση αυτή, αναμένεται να είναι αμελητέες.

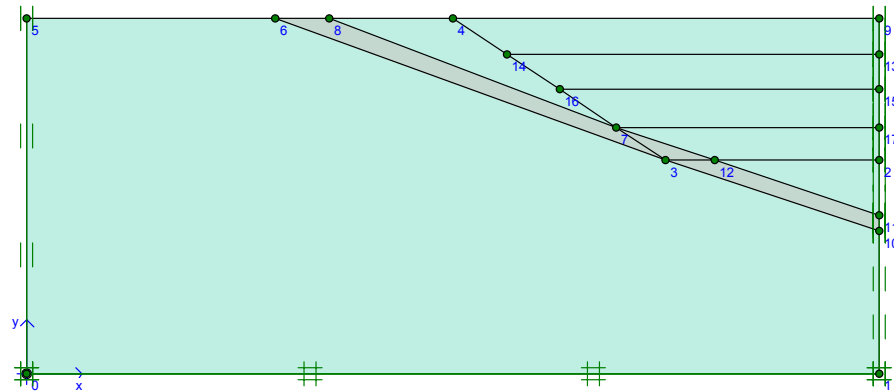


Σχήμα 6.1: Γεωμετρία αρχικού προσομοιώματος και συνοριακές συνθήκες.

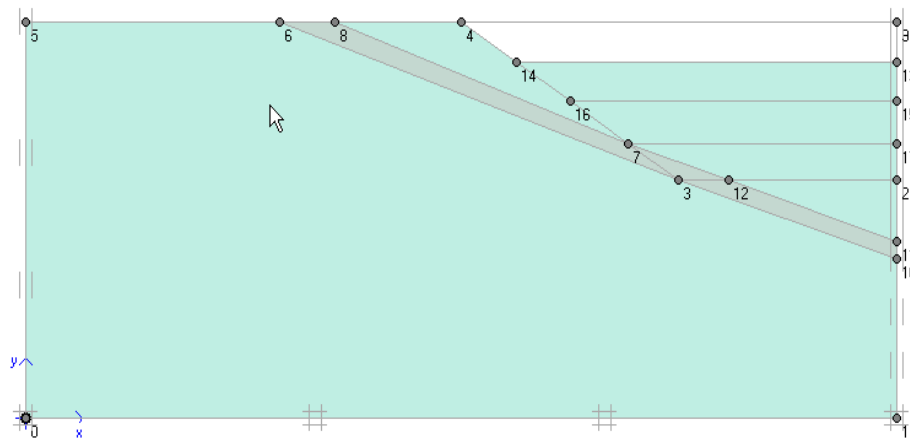
Ακολουθεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του προσομοιώματος των δύο εδαφικών υλικών (μάργας, λιγνίτη). Το αρχικό προσομοίωμα έχει μήκος 1200 m και ύψος 500 m (Σχήμα 6.1). Η μάργα, αποτελεί την κύρια μάζα του πρανούς και ο λιγνίτης, ένα λεπτό στρώμα σε σχέση με τις συνολικές διαστάσεις του μοντέλου (πάχους 5 m περίπου). Η κλίση του πρανούς είναι 1:1. Το στρώμα του λιγνίτη εμφανίζεται στα 350 m από το αριστερό όριο του πρανούς και καταλήγει στο πόδι αυτού, με μια κλίση 25° ως προς την οριζόντιο.

Σχεδιάστηκαν δύο προσομοιώματα, αυτό το οποίο προσομοιάζει το φυσικό πρανές με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1 και αυτό που

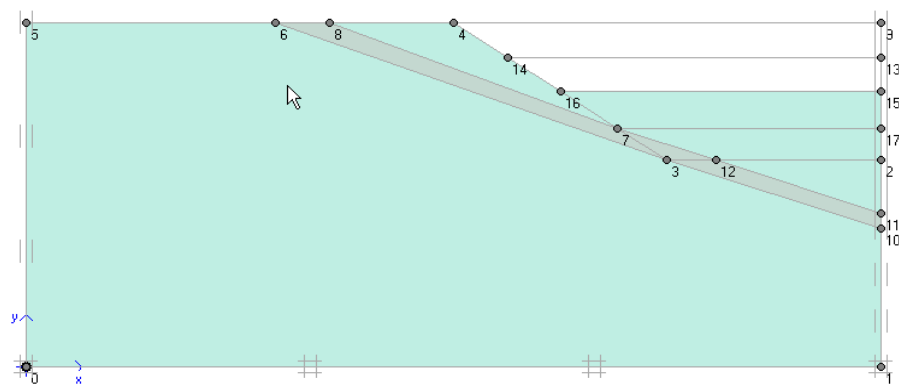
προσομοιάζει τη διαμόρφωσή του με σταδιακές εκσκαφές (Σχήματα 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 και 6.6). Και στις δύο περιπτώσεις η γεωμετρία του τελικού πρανούς παραμένει η ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι στο δεύτερο προσομοίωμα διαφοροποιείται η διαδικασία επίλυσης στα στάδια των εκσκαφών και το φαινόμενο πάχος του στρώματος του λιγνίτη στο μέτωπο του πρανούς, το οποίο εμφανίζεται μέχρι το δεξί όριο του πρανούς.



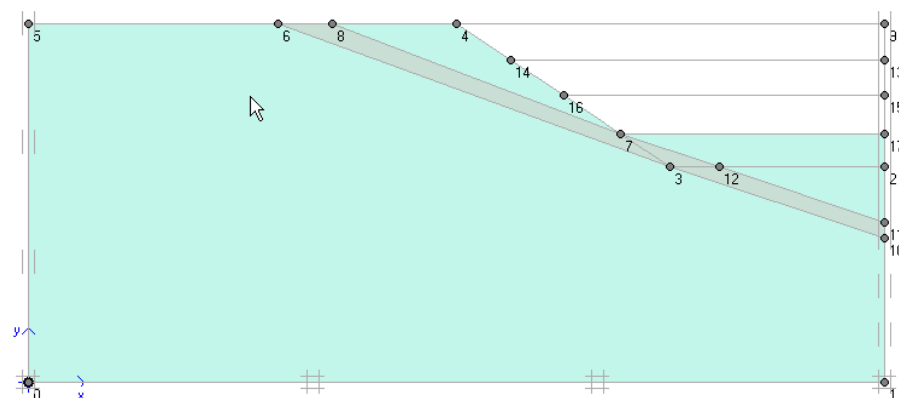
Σχήμα 6.2: Γεωμετρία προσομοιώματος εκσκαφών και συνοριακές συνθήκες.



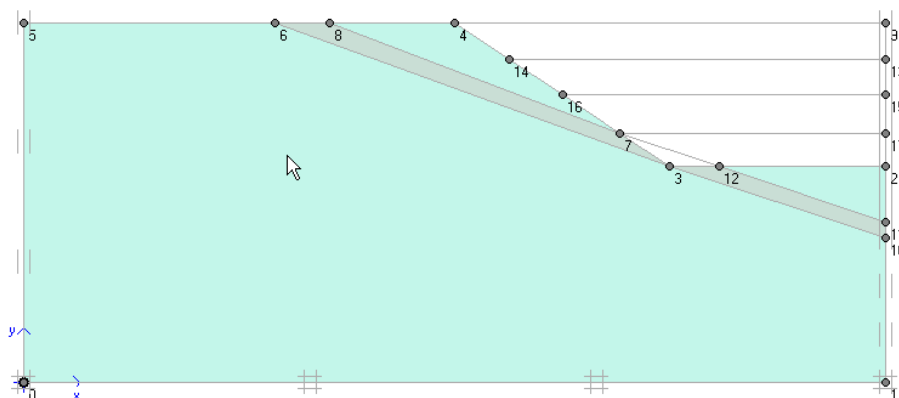
Σχήμα 6.3: Πρώτο στάδιο εκσκαφής προσομοιώματος.



Σχήμα 6.4: Δεύτερο στάδιο εκσκαφής προσομοιώματος.



Σχήμα 6.5: Τρίτο στάδιο εκσκαφής προσομοιώματος.



Σχήμα 6.6: Τέταρτο και τελευταίο στάδιο εκσκαφής προσομοιώματος.

6.2 Ιδιότητες εδαφικών υλικών

Κάθε εδαφικό υλικό έχει δικές του ιδιότητες. Οι βασικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο μοντέλα εδαφικής

συμπεριφοράς (Mohr-Coulomb και Hardening Soil) εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1 (Τίκα, 2002). Οι ιδιότητες αυτές διαφοροποιήθηκαν για καθένα από τα προσομοιώματα που επιλύθηκαν στο πλαίσιο μιας παραμετρικής ανάλυσης, παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.3 και 6.4. Συγκεκριμένα για τα μοντέλα συμπεριφοράς Mohr-Coulomb διαφοροποιήθηκαν το μέτρο ελαστικότητας (E_{ref}), η συνοχή (c) και το ξηρό (γ_{dry}) και υγρό (γ_{wet}) φαινόμενο βάρος των εδαφικών υλικών, ενώ για τα μοντέλα συμπεριφοράς Hardening Soil διαφοροποιήθηκε η συνοχή, το υγρό και ξηρό φαινόμενο βάρος και τα E_{50}^{ref} και E_{oed}^{ref} . Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται, ότι η τιμή του E_{oed}^{ref} στα μοντέλα συμπεριφοράς Hardening Soil, προτείνεται από το Plaxis, κατά τη διαδικασία ορισμού της τιμής του E_{50}^{ref} , (με βάση τη σχέση αναλογίας που υπάρχει για τα δύο είδη μέτρων ελαστικότητας) και δεν αποτελεί πρωτεύον δεδομένο εισαγωγής από το χρήστη.

Οι επιμέρους συνδυασμοί των εδαφικών χαρακτηριστικών, οδήγησαν στη δημιουργία και επίλυση 360 μοντέλων. Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, οι πίνακες με τους συνδυασμούς αυτούς καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα.

Πίνακας 6.1: Βασικές ιδιότητες εδαφικών υλικών.

Χαρακτηριστικά	Μοντέλο εδαφικού υλικού			
	Mohr-Coulomb		Hardening Soil	
	Λιγνίτης	Μάργα	Λιγνίτης	Μάργα
Μέτρο ελαστικότητας (E_{ref}) (kN/m ²)	50.000	150.000	-	-
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	-	-	69.614	232.200
E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	-	-	54.290	201.900
Συνοχή (c_{ref}) (kN/m ²)	200	250	200	250
Λόγος Poisson (ν)	0,18	0,30	0,18	0,30
Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) (°)	35	30	35	30
Γωνία διασταλτικότητας (ψ) (°)	0	0	0	0
Ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry}) (kN/m ³)	12	13	12	13
Υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{wet}) (kN/m ³)	17	18	17	18
Διαπερατότητα (k_x, k_y) (m/day)	0,026	0,018	0,026	0,018
Power (m)	-	-	0,5	0,5

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται όλοι οι συνδυασμοί των προσομοιωμάτων επίλυσης αναλόγα με το μοντέλο συμπεριφοράς που υπακουούν.

Πίνακας 6.2: Συνδυασμοί προσομοιωμάτων.

	Μοντέλο εδαφ.συμπεριφοράς προσομοιώματος
Προσομοίωμα Α	Μάργα & Λιγνίτης Mohr-Coulomb χωρίς σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Β	Μάργα & Λιγνίτης Hardening Soil χωρίς σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Γ	Μάργα Mohr-Coulomb & Λιγνίτης Hardening Soil χωρίς σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Δ	Μάργα Hardening Soil & Λιγνίτης Mohr-Coulomb χωρίς σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Ε	Μάργα & Λιγνίτης Mohr-Coulomb με σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Ζ	Μάργα & Λιγνίτης Hardening Soil με σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Η	Μάργα Mohr-Coulomb & Λιγνίτης Hardening Soil με σταδιακές εκσκαφές
Προσομοίωμα Θ	Μάργα Hardening Soil & Λιγνίτης Mohr-Coulomb με σταδιακές εκσκαφές

Για κάθε περίπτωση προσομοιώματος έγιναν οι αντίστοιχες μεταβολές στις ιδιότητες (συνοχή, μέτρο παραμορφωσιμότητας, μοναδιαία βάρη). Για κάθε συνδυασμό προσομοιώματος και για κάθε μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς διαφοροποιήθηκε και η παρουσία ή μη της υδροφορίας.

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικές ιδιότητες λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση.

Χαρακτηριστικά	Λιγνίτης	
	Mohr-Coulomb	Hardening Soil
Μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_{ref}) (kN/m ²)	50.000	-
	65.000	-
	80.000	-
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	-	69.614
	-	75.000
E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	-	54.290
	-	106.800
Συνοχή (c_{ref}) (kN/m ²)	100	100
	200	150
	300	200
	-	250
Λόγος Poisson (ν)	0,18	
Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) (°)	35	
Γωνία διασταλτικότητας (ψ) (°)	0	
Ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry}) (kN/m ³)	5	
	12	
	13	
Υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{wet}) (kN/m ³)	12	
	15	
	17	
Διαπερατότητα (k_x, k_y) (m/day)	0,026	
Power (m)	-	0,5

Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικές ιδιότητες μάργας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση.

Χαρακτηριστικά	Μάργα	
	Mohr-Coulomb	Hardening Soil
Μέτρο ελαστικότητας (E_{ref}) (kN/m ²)	120.000	-
	150.000	-
	200.000	-
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	-	232.200
	-	
E_{oed}^{ref} (kN/m ²)		
	-	201.900
Συνοχή (c_{ref}) (kN/m ²)	150	250
	200	300
	250	350
	300	-
	350	-
Λόγος Poisson (ν)	0,30	
Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) (°)	30	
Γωνία διασταλτικότητας (ψ) (°)	0	
Ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry}) (kN/m ³)	9.5	
	12	
	13	
Υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{wet}) (kN/m ³)	15	
	18	
Διαπερατότητα (k_x, k_y) (m/day)	0,018	
Power (m)	-	0,5

6.3 Τύποι συμπεριφοράς υλικών

6.3.1 Μοντέλο Mohr-Coulomb

Το μοντέλο Mohr-Coulomb είναι το πιο γνωστό μοντέλο στο χώρο των μηχανικών. Στηρίζεται στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και απαιτεί στο συνολό του, τον καθορισμό πέντε παραμέτρων που εύκολα μπορούν να προσδιοριστούν από αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- το μέτρο ελαστικότητας E ,
- ο λόγος Poisson ν ,
- η συνοχή c ,
- η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ ,
- και η γωνία διασταλτικότητας ψ .

6.3.2 Μοντέλο Hardening Soil

Το μοντέλο Hardening Soil είναι ένα εξιδεικευμένο μοντέλο προσομοίωσης συμπεριφοράς διαφόρων τύπων εδαφών (μαλακών αλλά και συμπαγών εδαφών) (Schanz, 1998). Είναι ένας τύπος ελαστοπλαστικού υπερβολικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς

6.4 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο προσομοίωμα εδαφικής ανάλυσης είναι οι εξής:

- Στα κατακόρυφα όρια του προσομοιώματος εφαρμόστηκε μηδενική οριζόντια μετατόπιση ($U_x=0$), έτσι ώστε στα όρια αυτά να πραγματοποιείται μόνο κύλιση ως προς τον άξονα y .
- Στο κάτω όριο του προσομοιώματος εφαρμόστηκε μηδενική μετατόπιση και ως προς τους δύο άξονες ($U_y = U_x = 0$), ώστε να πακτωθεί η βάση του προσομοιώματος (Σχήματα 6.1, 6.2).

6.5 Διακριτοποίηση (Mesh Generation)

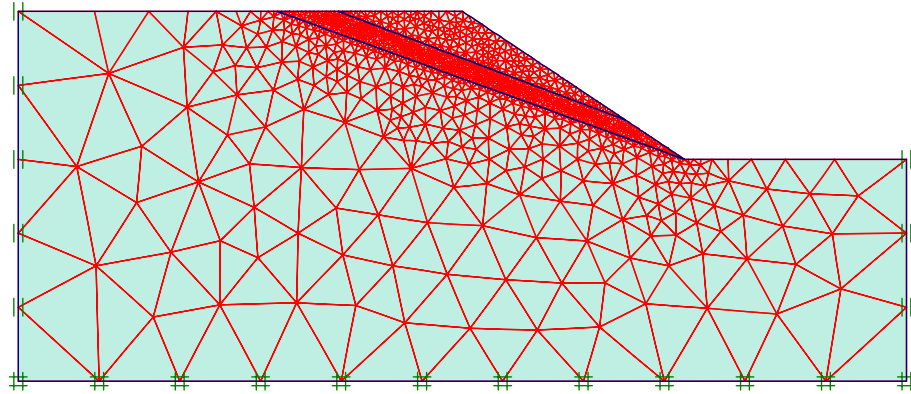
Για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται η διαίρεση του γεωμετρικού προσομοιώματος σε στοιχεία (Mesh Generation).

Όπως έχει προαναφερθεί, τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο για μοντέλα δύο διαστάσεων είναι τα τριγωνικά (εξακομβικά και δεκαπεντακομβικά). Τα προσομοιώματα διακριτοποιήθηκαν σε εξακομβικά στοιχεία.

Στο Plaxis, η δημιουργία του δικτυώματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια τελείως αυτοματοποιημένη διαδικασία, που βασίζεται στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του μοντέλου. Παρόλα αυτά, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να αυξήσει την πυκνότητα του πλέγματος σε οποιοδήποτε σημείο, υλικό ή περιοχή (Σχήμα 6.11), όπου αυτός το κρίνει απαραίτητο (όπου δηλαδή αναμένεται συγκέντρωση τάσεων).

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε πύκνωση στην περιοχή του μετώπου του πρανούς, στο στρώμα του λιγνίτη και στις διεπιφάνειες μεταξύ των

στρωμάτων λιγνίτη και μάργας. Προέκυψαν συνολικά 2760 στοιχεία, 5629 κόμβοι και 7528 τασικά σημεία για το πρώτο μοντέλο της ενιαίας κοπής και 3832 στοιχεία, 7799 κόμβους και 11496 τασικά σημεία για το μοντέλο των σταδιακών εκσκαφών.

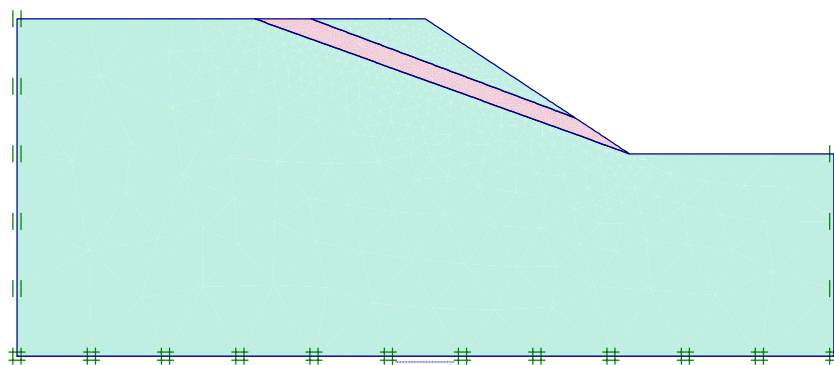


Σχήμα 6.11: Διακριτοποιημένο μοντέλο.

6.6 Υδρολογικές συνθήκες

Οι πιέσεις των πόρων ρυθμίζονται με βάση τη θέση του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύει το γεωμετρικό τόπο των σημείων των οποίων η πίεση του νερού είναι ίση με το μηδέν. Κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου, η πίεση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (υδροστατική πίεση).

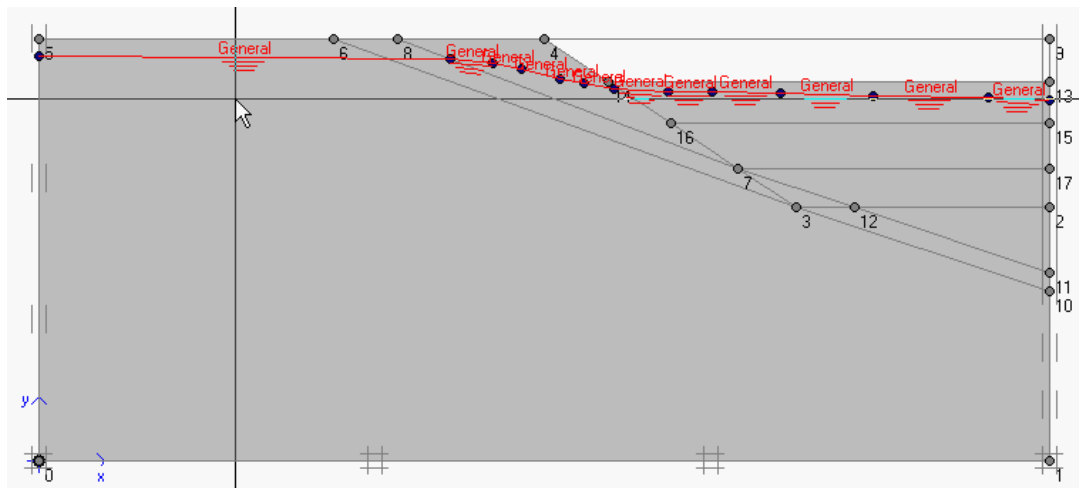
Στο αρχικό προσομοίωμα (Σχήμα 6.1), ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε στη βάση αυτού (Σχήμα 6.12), έτσι ώστε η υδροφορία να μην επηρεάζει την επίλυση.



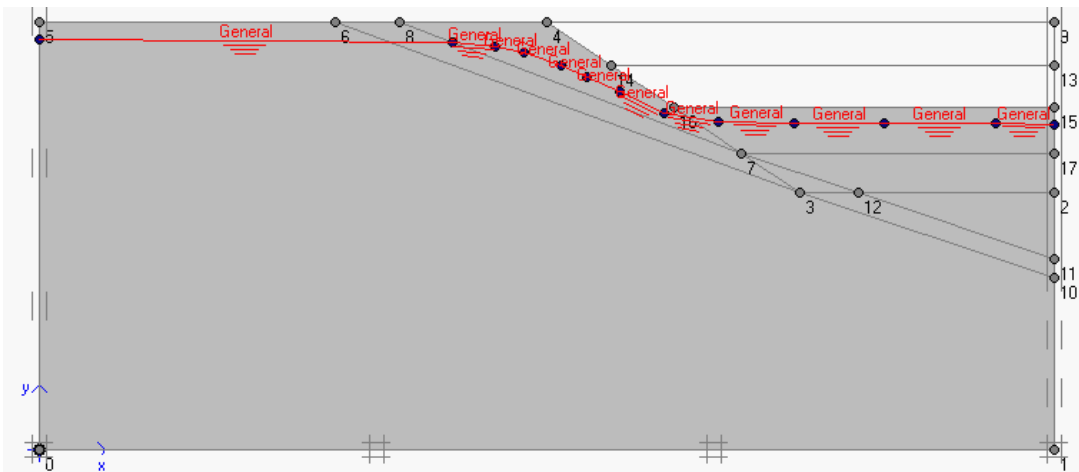
Σχήμα 6.12: Ρύθμιση υδροφόρου ορίζοντα.

Στην δεύτερη ομάδα προσομοιωμάτων που επιλύθηκε, το επίπεδο το υδροφόρου ορίζοντα ορίστηκε υψηλότερα και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή της συνθήκης αρχικών τάσεων ως προς την υδροφορία, γιατί αλλιώς η ανάλυση θα βγάλει λάθος αποτελέσματα.

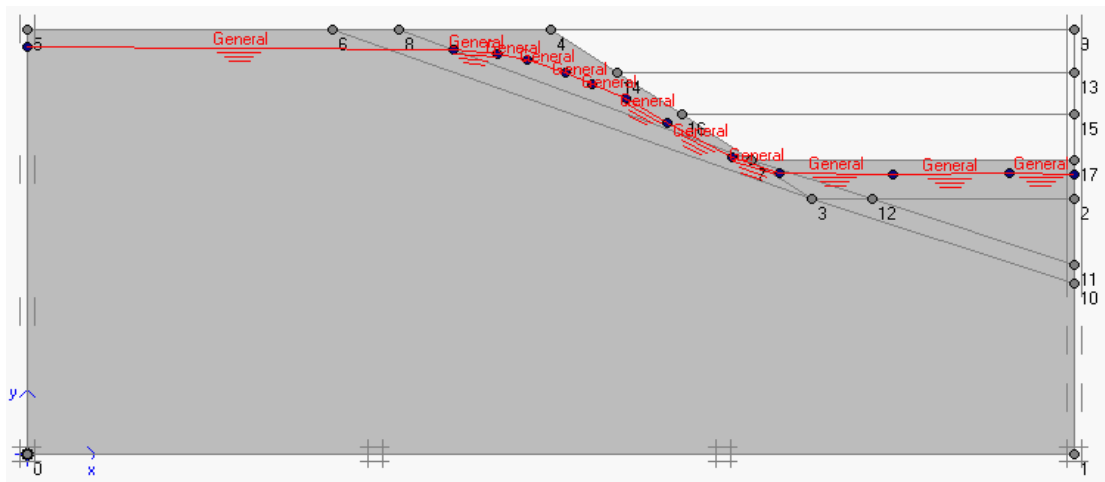
Ο υδροφόρος ορίζοντας για το δεύτερο προσομοίωμα τροποποιήθηκε για κάθε φορά για κάθε στάδιο εκσκαφής (Σχήματα 6.13, 6.14, 6.15 και 6.16).



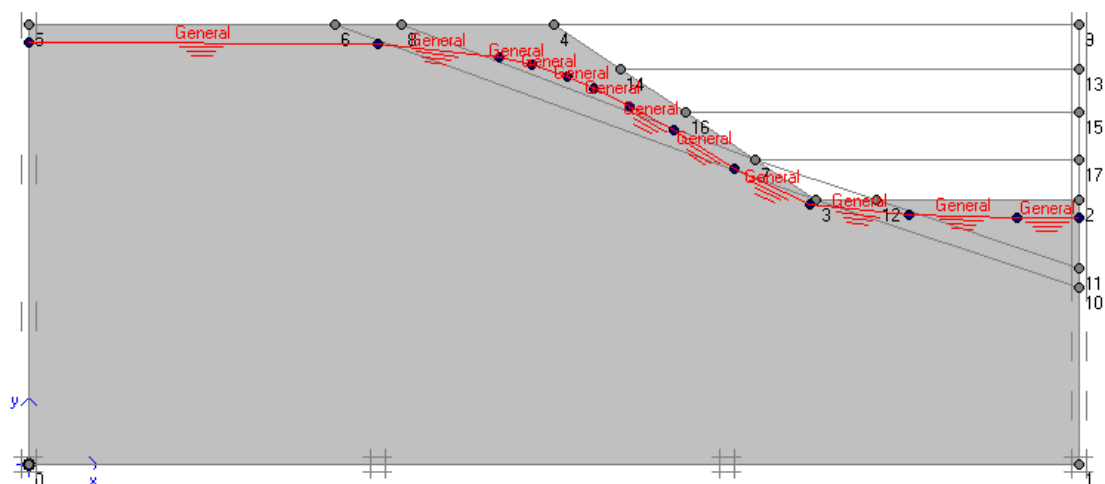
Σχήμα 6.13: Υποβιβασμός υδροφόρου ορίζοντα στο πρώτο στάδιο εκσκαφής.



Σχήμα 6.14: Υποβιβασμός υδροφόρου ορίζοντα στο δεύτερο στάδιο εκσκαφής.



Σχήμα 6.15: Υποβιβασμός υδροφόρου ορίζοντα στο τρίτο στάδιο εκσκαφής.



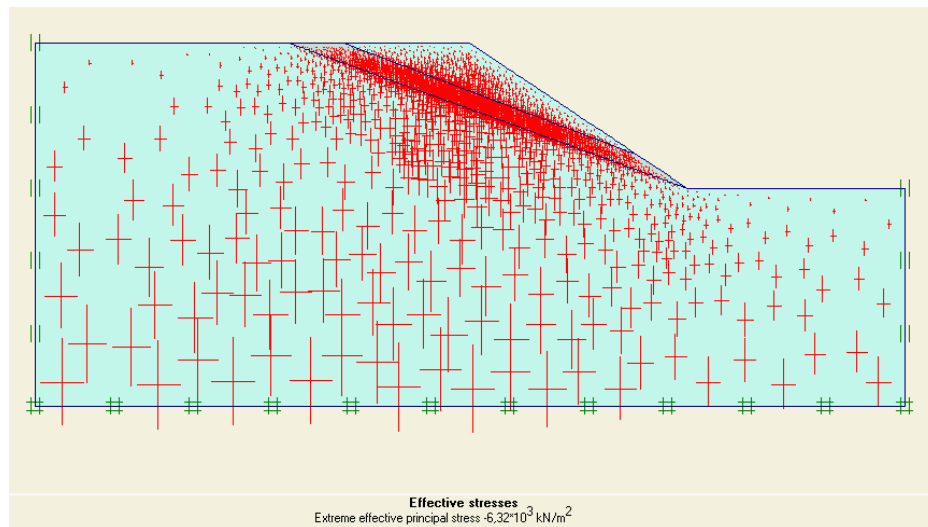
Σχήμα 6.16: Υποβιβασμός υδροφόρου ορίζοντα στο τελευταίο στάδιο εκσκαφής.

6.7 Αρχικές τάσεις (διαδικασία K_0)

Οι αρχικές τάσεις στη μάζα του εδάφους εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το βάρος των υλικών. Η εντατική αυτή κατάσταση περιγράφεται από μια αρχική κατακόρυφη τάση $\sigma_{v,0}$ που σχετίζεται με το συντελεστή πλευρικής ώθησης 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, με επέμβαση του χρήστη.

Στο αρχικό προσομοίωμα (Σχήμα 6.1), η επιφάνεια αυτού δεν είναι οριζόντια, επομένως για την δημιουργία των αρχικών τάσεων εφαρμόζεται το ίδιο το βάρος των υλικών, με τη διαδικασία total multipliers στην πρώτη φάση

υπολογισμών. Η διαδικασία ορισμού του K_0 , ενεργοποιείται μόνο όταν υπάρχει οριζόντια εδαφική επιφάνεια στα μοντέλα επίλυσης (Σχήμα 6.17).



(Σχήμα 6.17): Παρουσίαση ενεργών τάσεων ($-6,32 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$) για το αρχικό μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς Mohr-Coulomb για συνοχή μάργας= 350 kN/m^2 και λιγνίτη= 100 kN/m^2 .

6.8 Υπολογισμοί

Από τη στιγμή που ορίσθηκαν οι ιδιότητες του προσομοιώματος μπορούν να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να οριστούν ο τύποι των υπολογισμών, τα στάδια επίλυσης και οι τύποι των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια των επιμέρους σταδίων επίλυσης.

Η ανάλυση του προσομοιώματος έγινε με υπολογισμό της πλαστικής συμπεριφοράς του, χωρίς να είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι επιδράσεις των μεγάλων παραμορφώσεων και να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας του χρόνου.

Για το πρώτο προσομοίωμα ορίσθηκαν τρεις φάσεις επίλυσης: στην πρώτη εφαρμόστηκε το ίδιο το βάρος των υλικών, στη δεύτερη εξισορροπούνται οι δυνάμεις που βρίσκονται εκτός ισορροπίας μετά την επίλυση της πρώτης φάσης και στην τρίτη πραγματοποιείται σταδιακή μείωση των μηχανικών παραμέτρων των υλικών (διαδικασία phi-c reduction) για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Για το δεύτερο προσομοίωμα ορίστηκαν δώδεκα φάσεις: δύο staged construction φάσεις και μια phi-c reduction φάση για κάθε εκσκαφή. Στο κομμάτι αυτό των υπολογισμών μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει τις παραμέτρους των διαδικασιών επίλυσης (μηδενισμός παραμορφώσεων, τύπος συμπεριφοράς υλικού), τα σφάλματα, κτλ. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τις μετατοπίσεις του προσομοιώματος, τις ενεργές τάσεις και φυσικά το συντελεστή ασφαλείας (Σχήματα 6.18, 6.19, 6.20 και 6.21).

Για καθεμία από τις περιπτώσεις του εδαφικού πρανούς που μελετήθηκε, ορίστηκαν αρχικά τρεις φάσεις υπολογισμών (total multipliers, staged construction, phi-c reduction) εκτός της αρχικής, η οποία αναφέρεται στους υπολογισμούς των αρχικών συνθηκών των εδαφικών προσομοιωμάτων.

Με βάση τους Brinkgreve and Bakker (1991), ο συντελεστής ασφαλείας του εδαφικού πρανούς προκύπτει από την καμπύλη του συντελεστή ΣMsf (που καθορίζει το ποσοστό της τάσης διάτμησης ως προς την διατμητική αντοχή του εδάφους) συναρτήσει του μέτρου της μετατόπισης, για ένα σημείο που βρίσκεται πάνω στο φρύδι του πρανούς (Σχήμα 6.21).

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}}$$

όπου: φ_{input} = η αρχική γωνία εσωτερικής τριβής του εκάστοτε εδαφικού υλικού,

$\varphi_{reduced}$ = η μειωμένη τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής σε κάθε στάδιο της ανάλυσης,

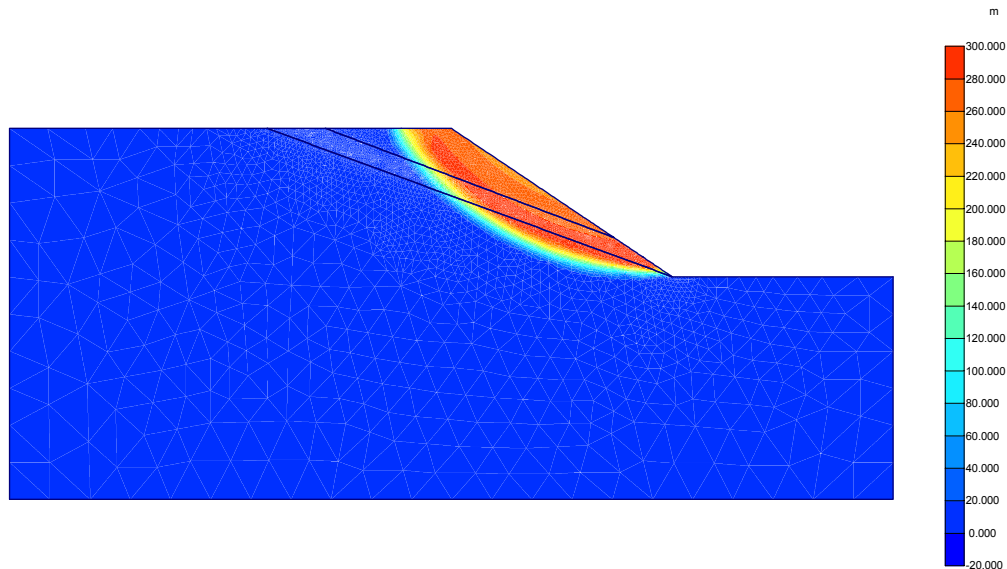
C_{input} = η αρχική συνοχή των υλικών,

$C_{reduced}$ = η μειωμένη συνοχή των υλικών σε κάθε στάδιο της ανάλυσης.

Με τη σταδιακή μείωση των παραμέτρων της αντοχής των υλικών που συμμετέχουν στο προσομοίωμα του εδαφικού πρανούς, μειώνεται ο παρονομαστής του πηλίκου της σχέσης, επομένως αυξάνεται ο συντελεστής ΣMsf μέχρι μιας μέγιστης τιμής, σε σχετικά μικρές τιμές της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Με περαιτέρω μείωση, η τιμή του συντελεστή αυτού πέφτει ελάχιστα, έως ότου η καμπύλη που σχηματίζεται επιπεδώνεται (Σχήμα 6.21).

Οι παράμετροι αντοχής μειώνονται αυτόματα μέχρι αστοχίας της κατασκευής και στο σημείο αυτό ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση:

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



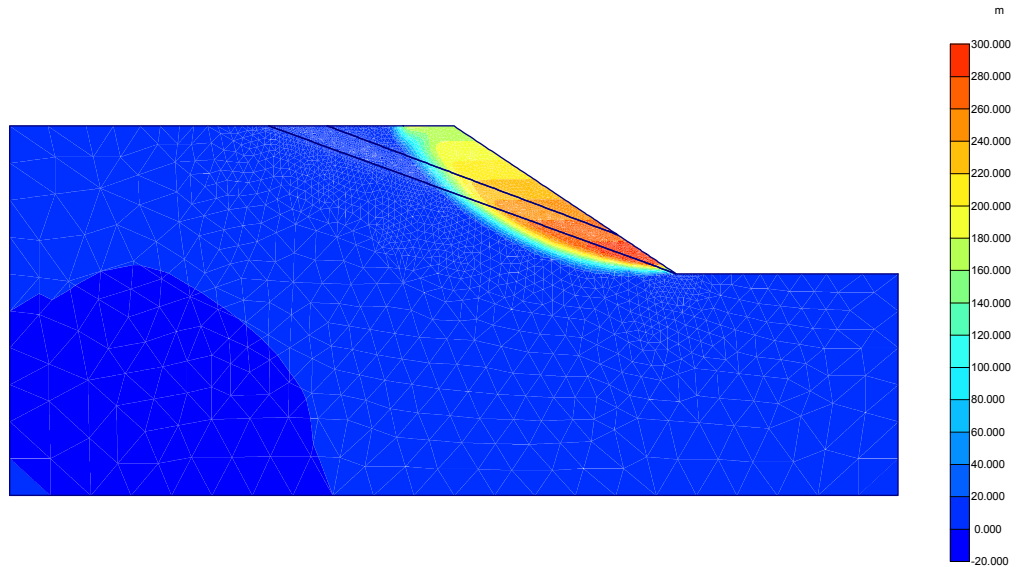
Σχήμα 6.18: Γράφημα ολικών μετατοπίσεων $U_{\text{total}} = 8,20 \text{ m}$ (επίλυση αρχικού προσομοιώματος, μοντέλου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, **προσομοίωμα Α**, για συνοχή μάργας = 350 kN/m^2 και λιγνίτη = 100 kN/m^2).

Στο Σχήμα 6.18, παρατηρείται μια κυκλική επιφάνεια, (οι καμπύλες ολικών μετατοπίσεων) που υποδηλώνουν μια πιθανή ολίσθηση. Επίσης, στα γραφήματα των Σχημάτων 6.19 και 6.20, τα οποία αντιστοιχούν στο ίδιο προσομοίωμα, παρατηρείται η ίδια κυκλική επιφάνεια.

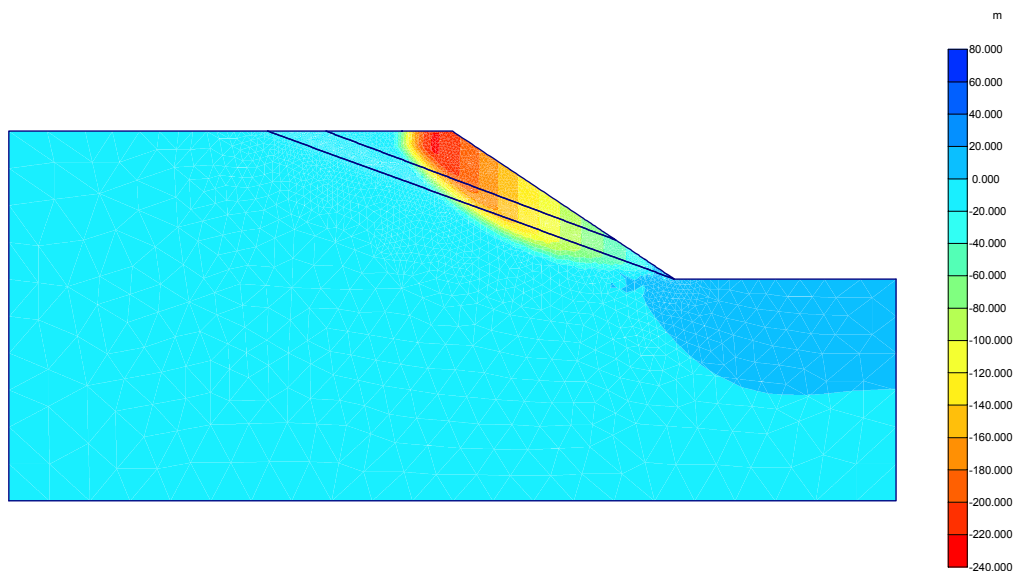
Όμως, λόγω του ότι ο συντελεστή ασφαλείας είναι ίσος με 1,8 το μοντέλο δεν αστοχεί.

Πρακτικά λοιπόν μειώνονται οι παράμετροι αντοχής των υλικών έως ότου επιτευχθεί εκείνη η τιμή η οποία θα οδηγήσει το εδαφικό πρότυπο σε αστοχία. Η τιμή αυτή προκύπτει από την καμπύλη που εξετάζεται και αντιστοιχεί στην περιοχή επιπέδωσής της. Το τμήμα αυτό της καμπύλης υποδεικνύει ότι ο συντελεστής ασφάλειας να αποκτά μια σταθερή τιμή και να δεν μειώνεται περαιτέρω. Ο λόγος της διατμητικής αντοχής προς την διατμητική τάση που οδηγεί σε αστοχία είναι ο συντελεστής ασφάλειας του συγκεκριμένου εδαφικού πρανούς που εξετάζεται.

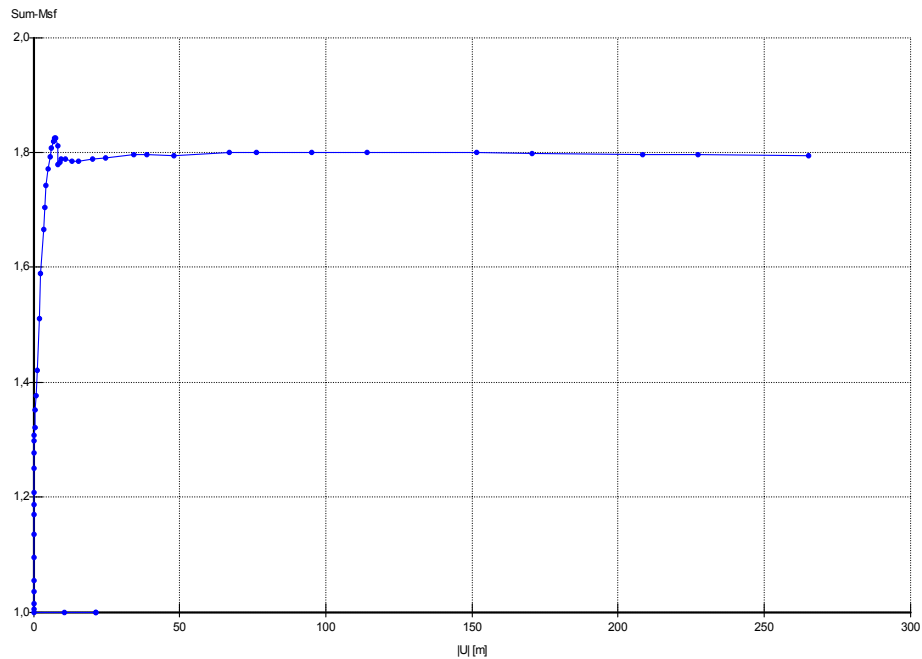
Με βάση λοιπόν τους Brinkgreve and Bakker (1991), η τιμή του συντελεστή ΣMsf (Σχήμα 6.22) η οποία αντιστοιχεί στην επιπέδωση της καμπύλης είναι ο συντελεστής ασφάλειας που αντιπροσωπεύει το δεδομένο προσομοίωμα.



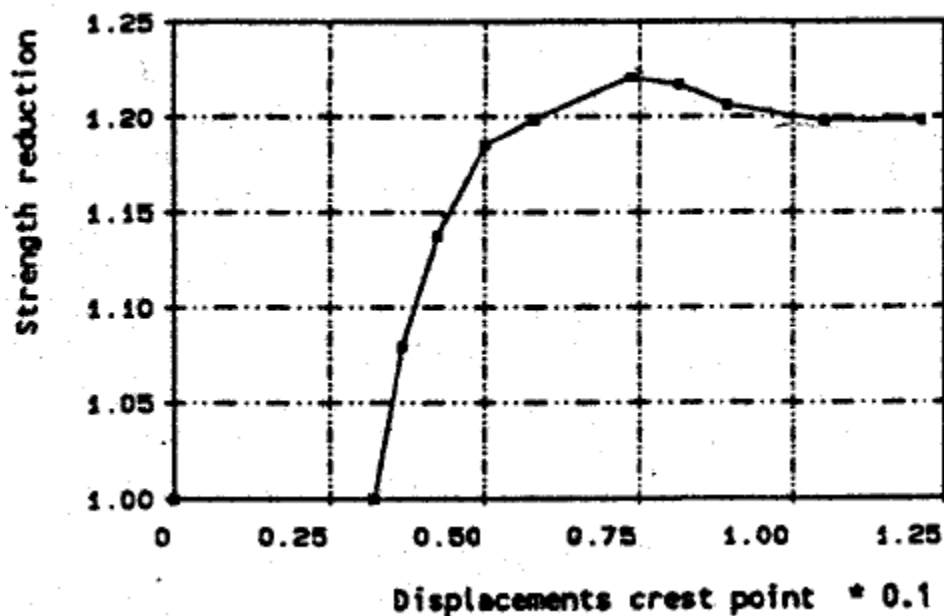
Σχήμα 6.19: Γράφημα οριζόντιων μετατοπίσεων $U_x = 0,89$ m (επίλυση αρχικού προσομοιώματος, μοντέλου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, **προσομοίωμα Α**, για συνοχή μάργας = 350 kN/m^2 και λιγνίτη = 100 kN/m^2).



Σχήμα 6.20: Γράφημα κατακόρυφων μετατοπίσεων $U_y = 8,20$ m.



Σχήμα 6.21: Γράφημα υπολογισμού συντελεστή ασφαλείας ($SF=1,8$) για ένα σημείο που βρίσκεται στο φρύδι του πρανούς (δοκιμή αρχικού μοντέλου, μοντέλου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, **προσομοίωμα Α**, για συνοχή μάργας= 350kN/m^2 και λιγνίτη= 100 kN/m^2).

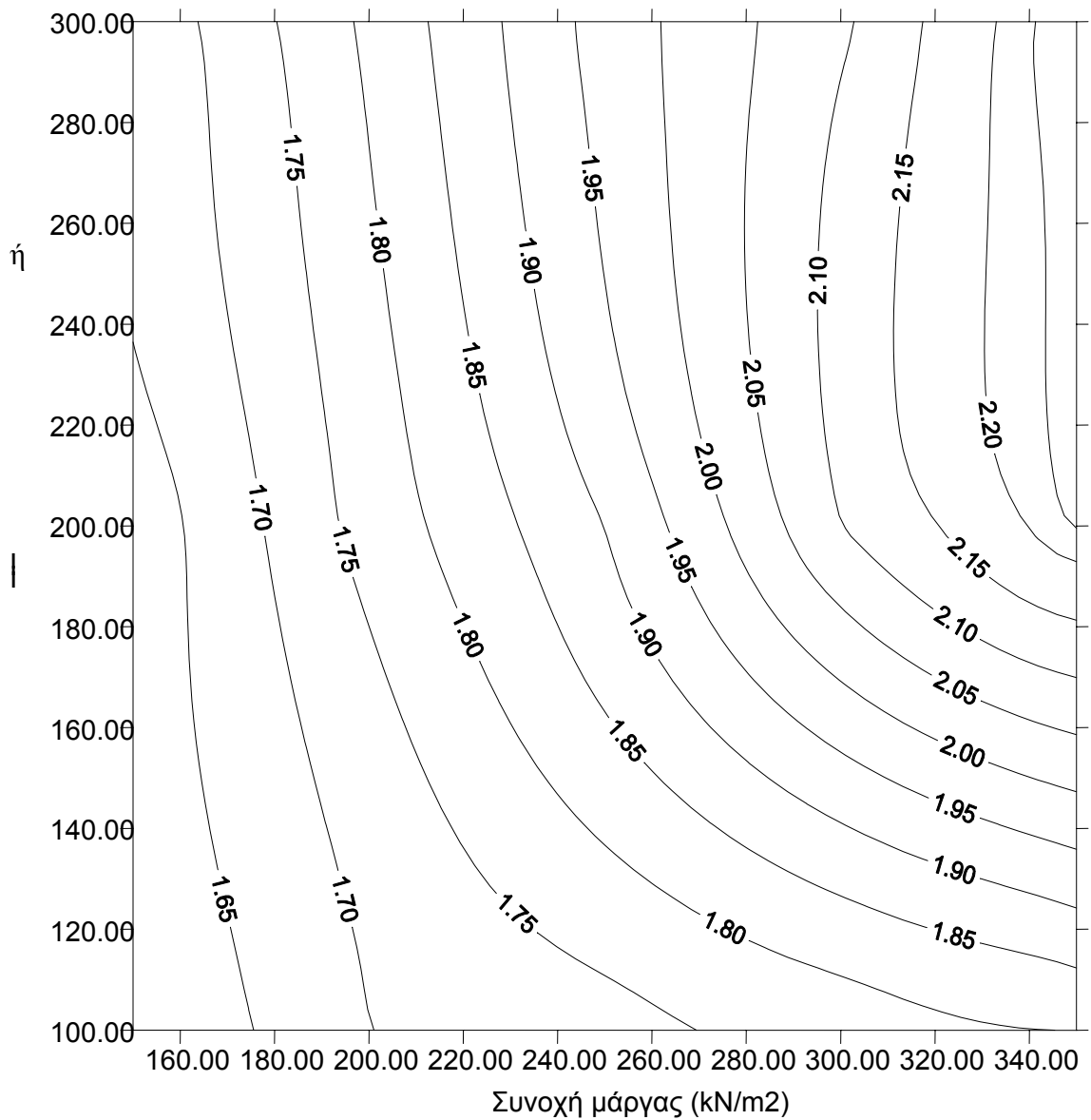


Σχήμα 6.22: Καμπύλη ΣMsf συναρτήσει της μετατόπισης του σημείου που βρίσκεται στο φρύδι του εδαφικού πρανούς (Brinkgreve and Bakker, 1991).

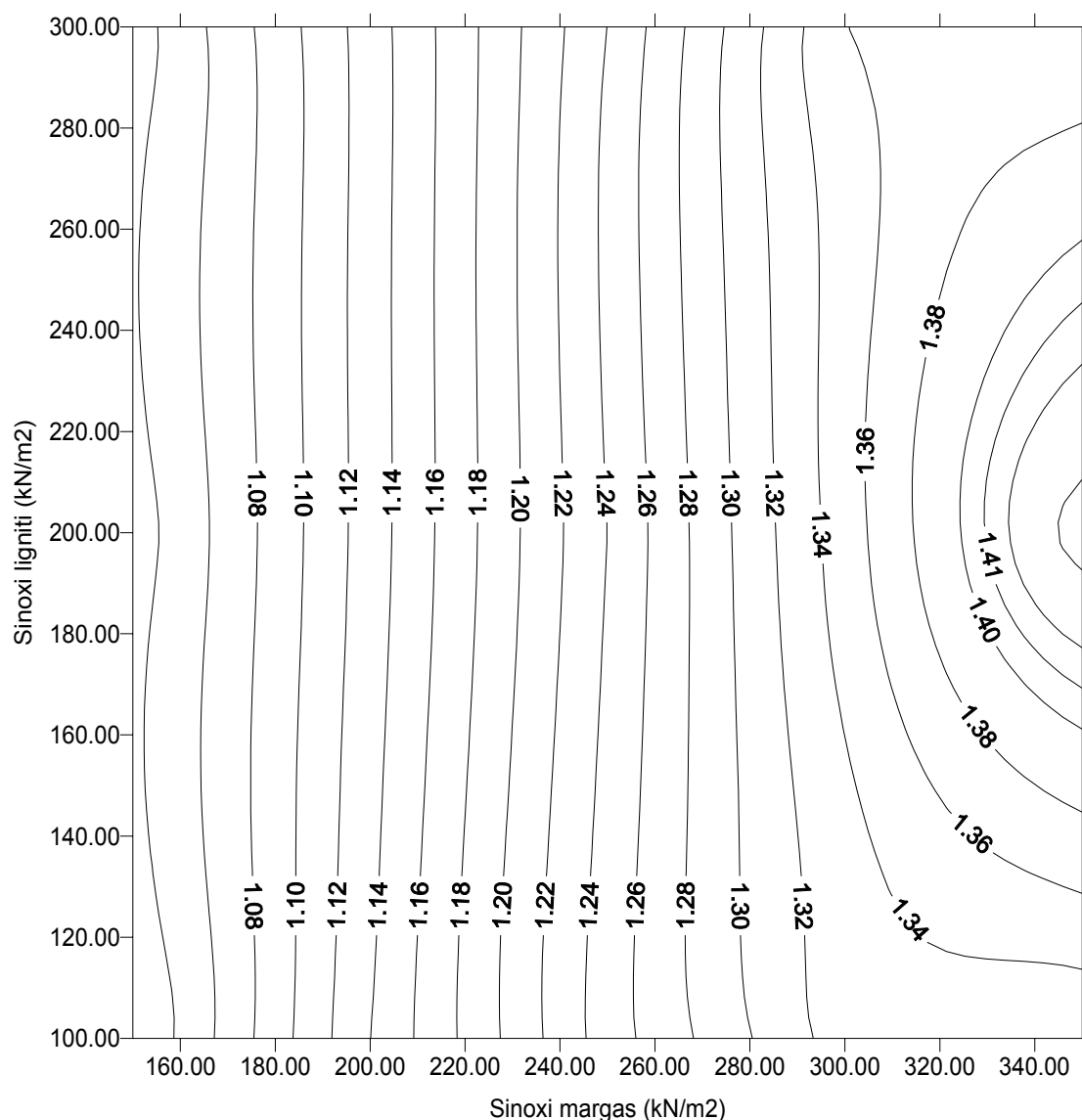
Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας, τότε το προσομοίωμα αστοχεί. Στο σχήμα 6.20 παρουσιάζεται μια αρκετά ικανοποιητική τιμή συντελεστή ασφαλείας.

6.9 Αποτελέσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πραγματοποιήθηκε σειρά επιλύσεων για την σύγκριση του συντελεστή ευστάθειας των προσομοιωμάτων, αλλά και των μετατοπίσεων που εκηλώνονται. Τα αποτελέσματα όλων αυτών των επιλύσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα της εργασίας. Στη συνέχεια ακολουθούν κάποιες γραφικές παραστάσεις όπου παρουσιάζονται οι συντελεστές ευστάθειας και οι μετατοπίσεις για διάφορες τιμές ιδιοτήτων των γεωυλικών και των μοντέλων εδαφικής συμπεριφοράς τους (Σχήματα 6.22 - 6.41).



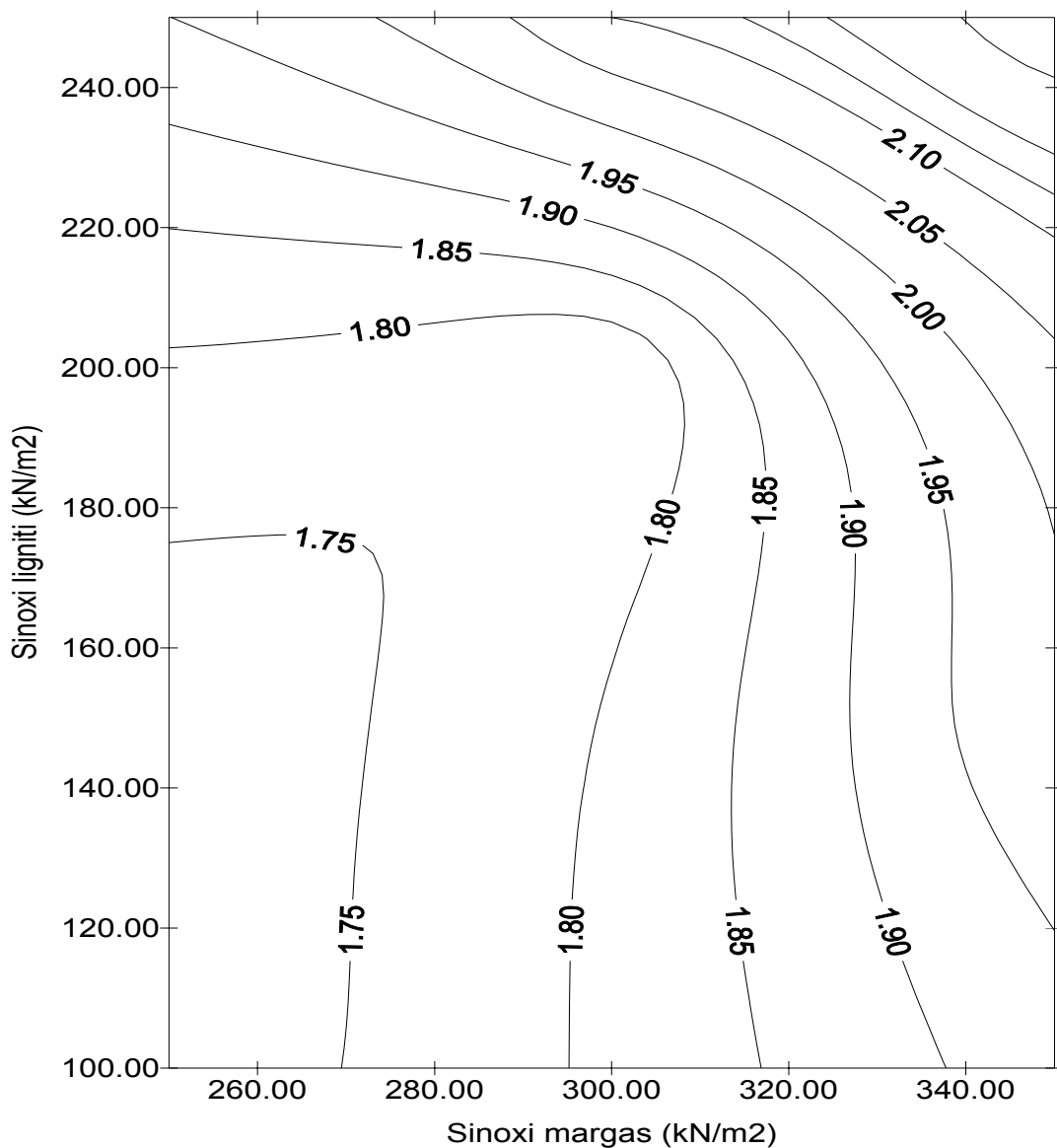
Σχήμα 6.22: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του αρχικού μοντέλου **χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.



Σχήμα 6.23: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των δύο υλικών του αρχικού μοντέλου **με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

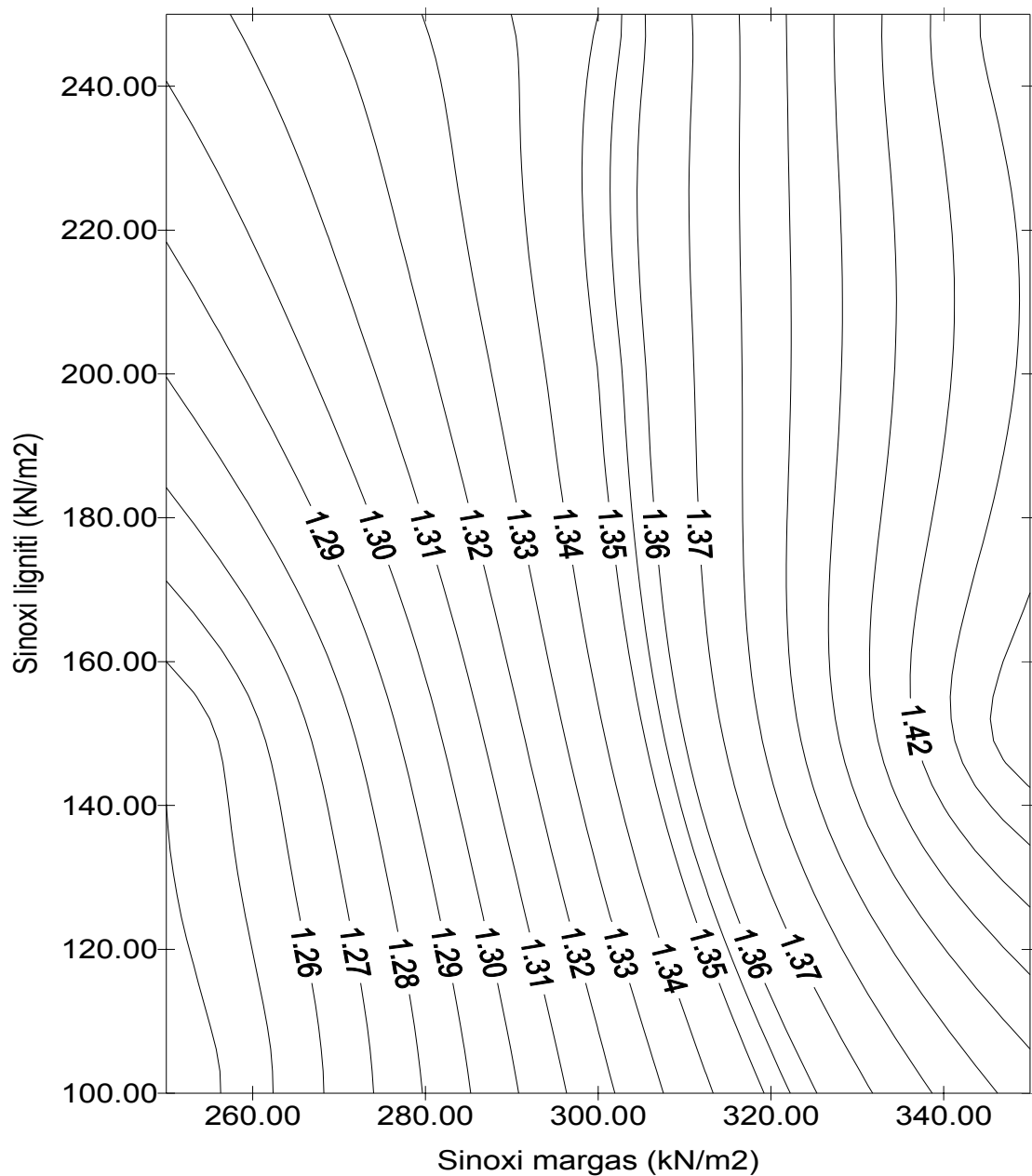
Στα Σχήματα 6.22 και 6.23 παρατηρείται ότι με αύξηση της συνοχής των υλικών (ειδικά της μάργας) για το μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, αυξάνεται όπως ήταν αναμενόμενο και ο συντελεστής ευστάθειας. Επίσης παρατηρείται ότι αυξάνοντας μόνο τη συνοχή του λιγνίτη, ο συντελεστής ευστάθειας δεν αυξάνεται αισθητά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λιγνίτης είναι ένα λεπτό στρώμα συγκριτικά με το στρώμα της μάργας και η συνοχή του δεν επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή ευστάθειας, δεδομένου ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις συγκεντρώνονται στο στρώμα της μάργας και στη διεπιφάνεια μάργας-λιγνίτη.

Ακόμα και μετά την εισαγωγή της υδροφορίας, τα αποτελέσματα δεν παρουσίασαν αισθητή μεταβολή όσο αφορά την κατανομή τους.



Σχήμα 6.24: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του αρχικού μοντέλου **χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

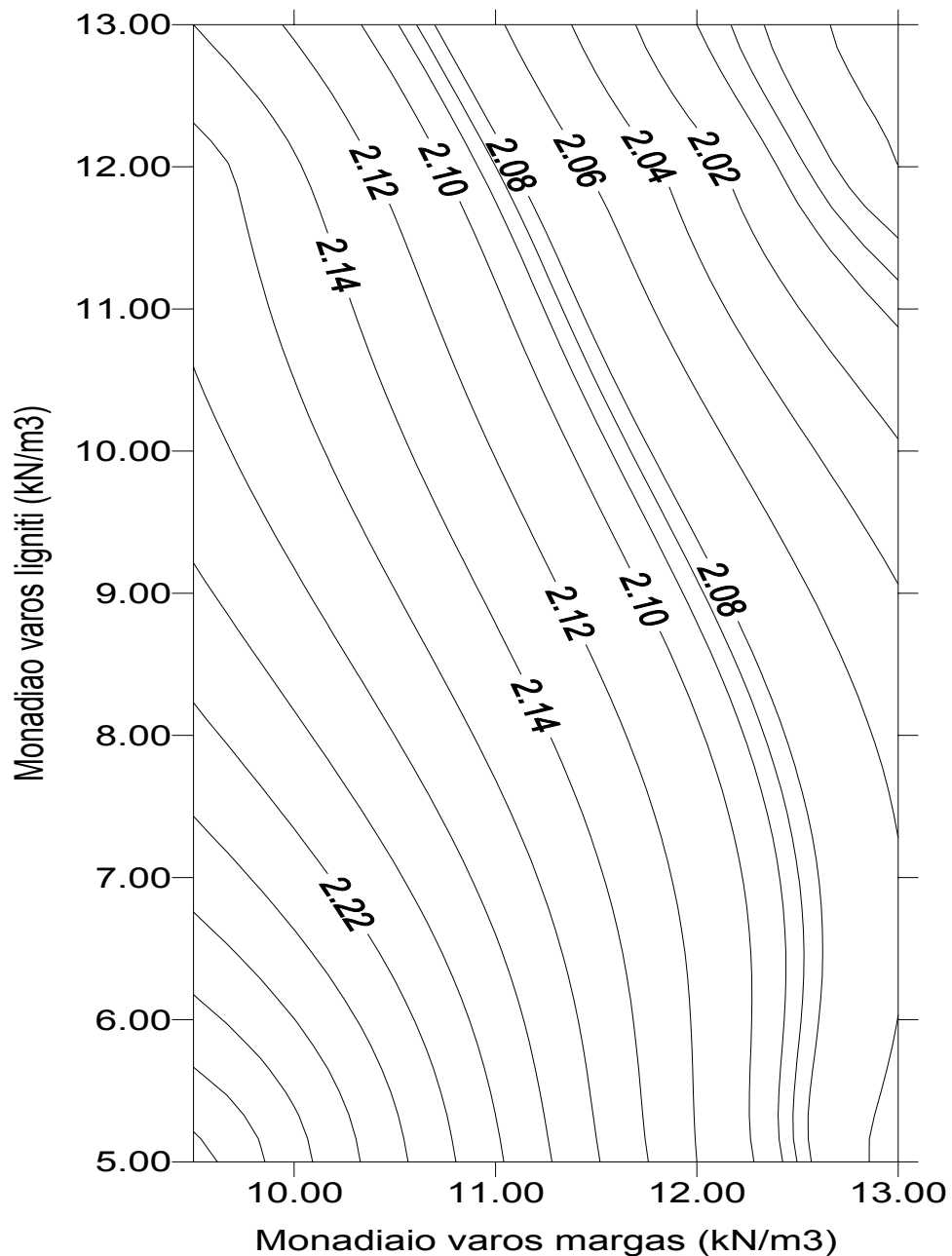
Στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil χωρίς νερό παρατηρείται ότι η συνοχή του λιγνίτη επηρεάζει περισσότερο τον συντελεστή ευστάθειας σε σχέση με τα μοντέλα συμπεριφοράς Mohr-Coulomb με και χωρίς νερό. Ειδικότερα για τιμές συνοχής λιγνίτη πάνω από 180 kN/m² (Σχήμα 6.24).



Σχήμα 6.25: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του αρχικού μοντέλου **με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

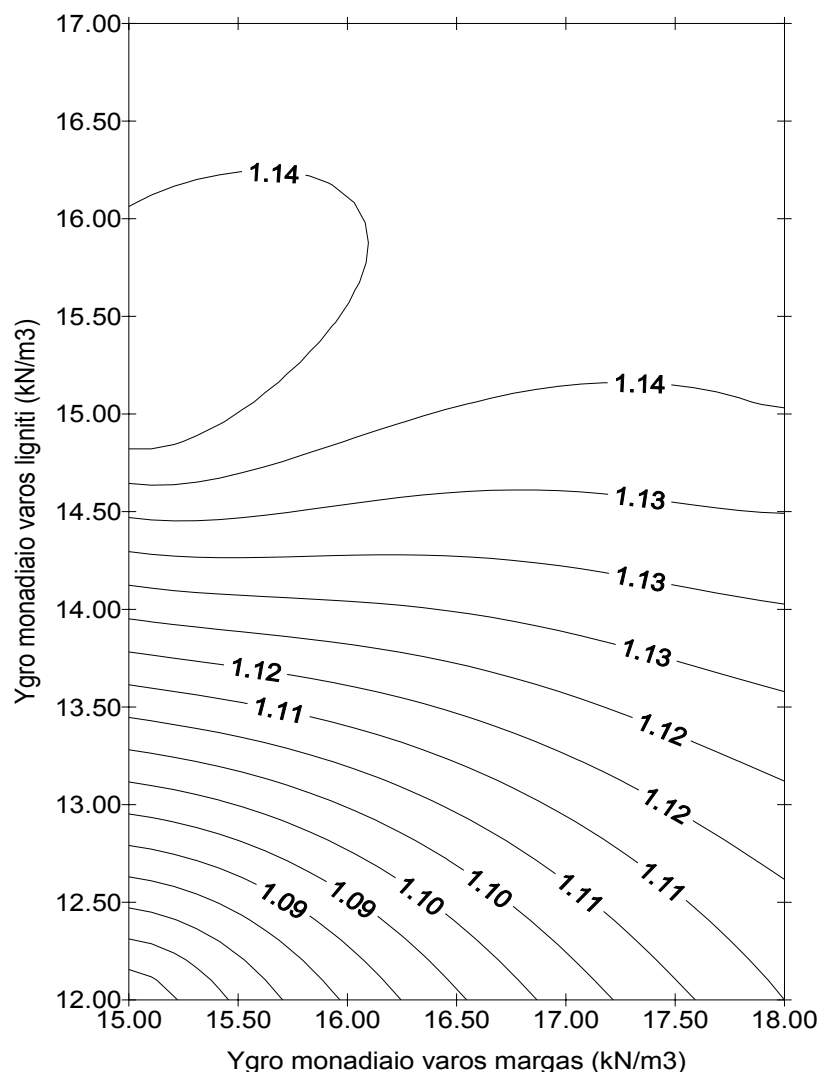
Στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil με νερό ο συντελεστής ευστάθειας μειώθηκε κατά μισή μονάδα, το οποίο είναι λογικό γιατί στο σημείο αυτό ο συντελεστής ευστάθειας υπολογίζεται με βάση τα υγρά μοναδιαία βάρη, τα οποία είναι και μεγαλύτερα (η δύναμη που τείνει να κινήσει τη μάζα του πρανούς είναι μεγαλύτερη) (Σχήμα 6.25).

Παρατηρείται ότι η κατανομή των συντελεστών ευστάθειας τείνει να επηρεάζεται λιγότερο από την αύξηση της συνοχής του λιγνίτη στις περιπτώσεις που εισάγεται και η παράμετρος της υδροφορίας και στους δύο τύπους επιλύσεων για διαφορετικό δηλαδή μοντέλο συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών.



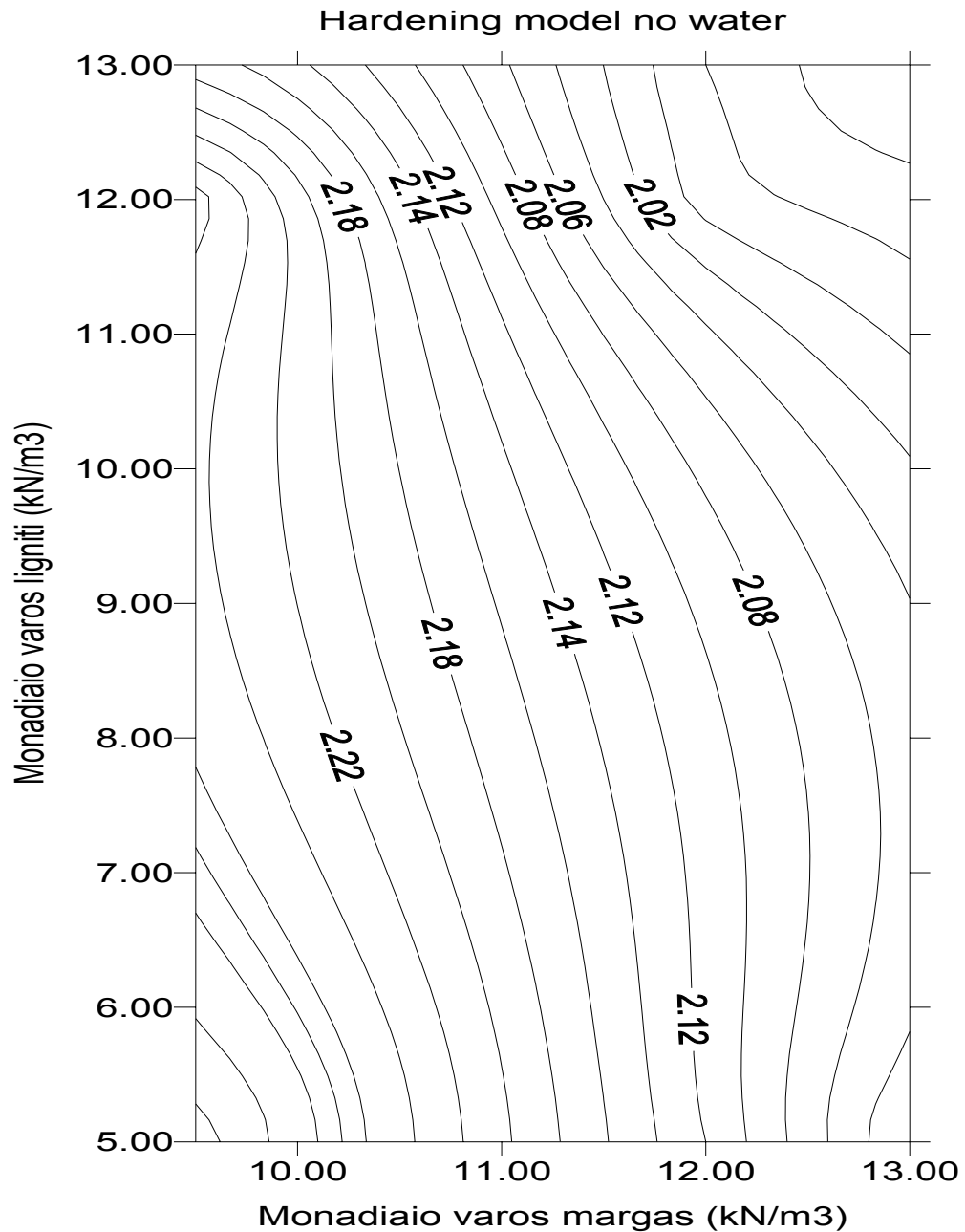
Σχήμα 6.26: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς ξηρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του αρχικού μοντέλου **χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

Στα μοντέλα όπου μεταβλήθηκαν τα ξηρά μοναδιαία βάρη των υλικών του πρανούς, παρατηρήθηκε μια μείωση του συντελεστή ευστάθειας με την παράλληλη αύξηση των μοναδιαίων βαρών των υλικών. Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του βάρους των υλικών, αυξάνεται η συνιστώσα της δύναμης που πάει να μετακινήσει τη μάζα του πρανούς, με αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή ευστάθειας.



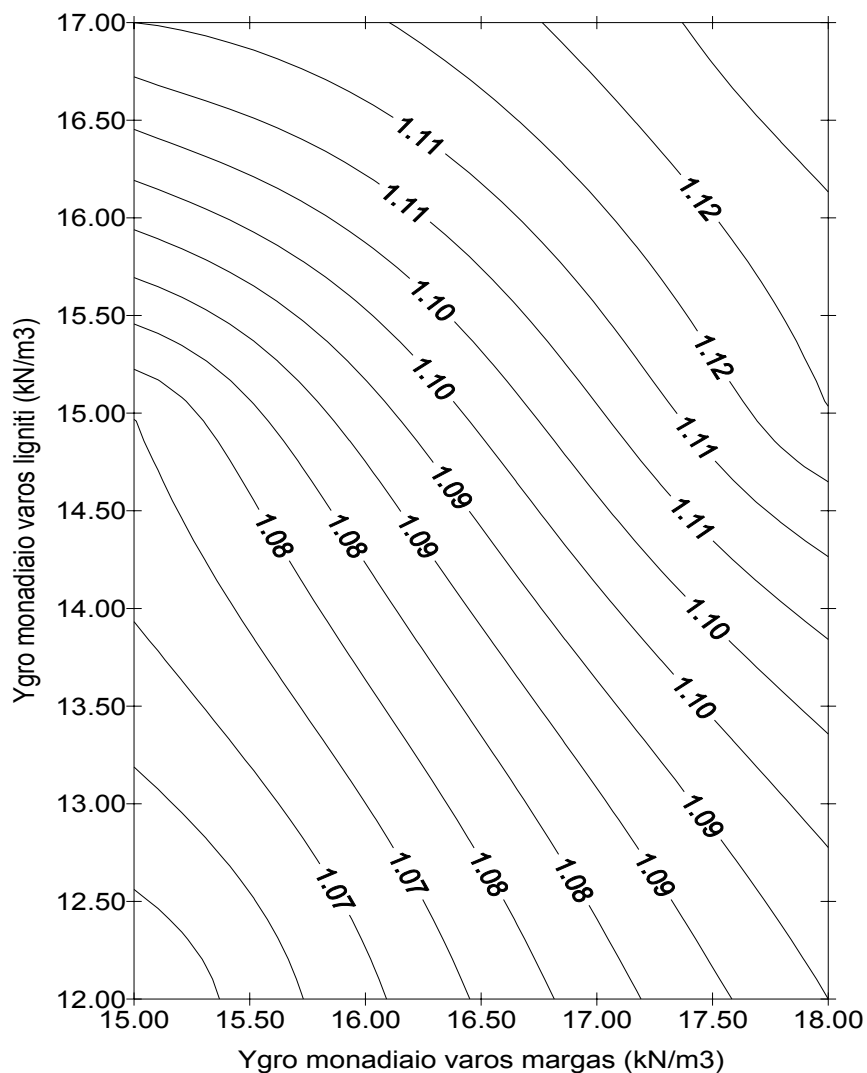
Σχήμα 6.27: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς υγρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του αρχικού μοντέλου **με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

Στο Σχήμα 6.27 παρατηρείται με αύξηση των μοναδιαίων υγρών βαρών των υλικών αυξάνεται ο συντελεστής ευστάθειας.



Σχήμα 6.28: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς ξηρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του αρχικού μοντέλου **χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

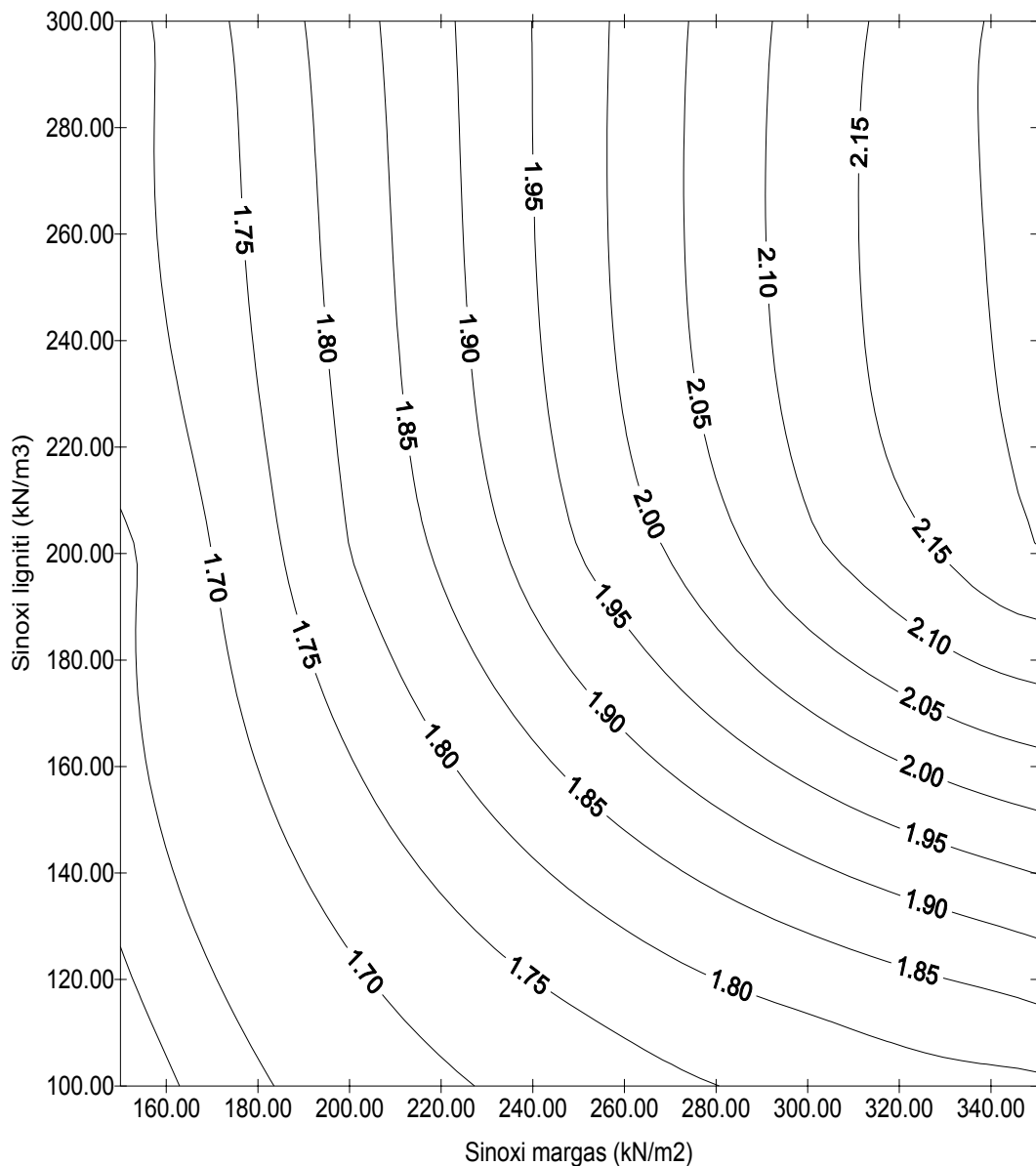
Στο Σχήμα 6.28 παρατηρείται μείωση του συντελεστή ευστάθειας με την παράλληλη αύξηση του μοναδιαίου βάρους των υλικών, όπως και στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb.



Σχήμα 6.29: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς υγρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του αρχικού μοντέλου **με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

Στα Σχήματα 6.27 κα 6.29 παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ευστάθειας με την παράλληλη αύξηση των μοναδιαίων βαρών των υλικών, όπως και στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb. Στο σημείο αυτό παίζουν ρόλο οι

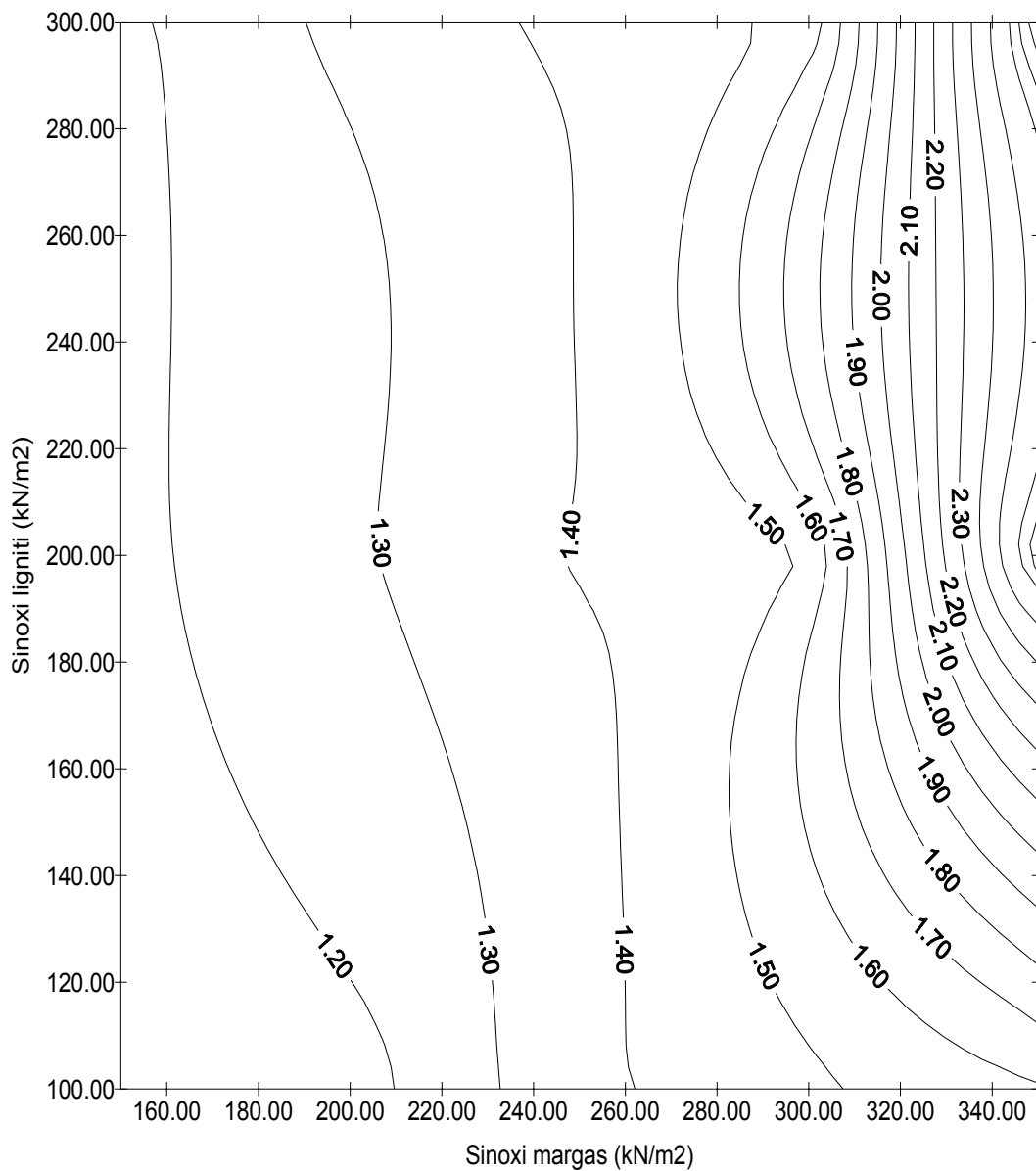
ενεργές τάσεις. Με την αύξηση του βάρους δημιουργείται εκτόνωση πίεσης πόρων με αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργών τάσεων και την αύξηση του συντελεστή ευστάθειας.



Σχήμα 6.30: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

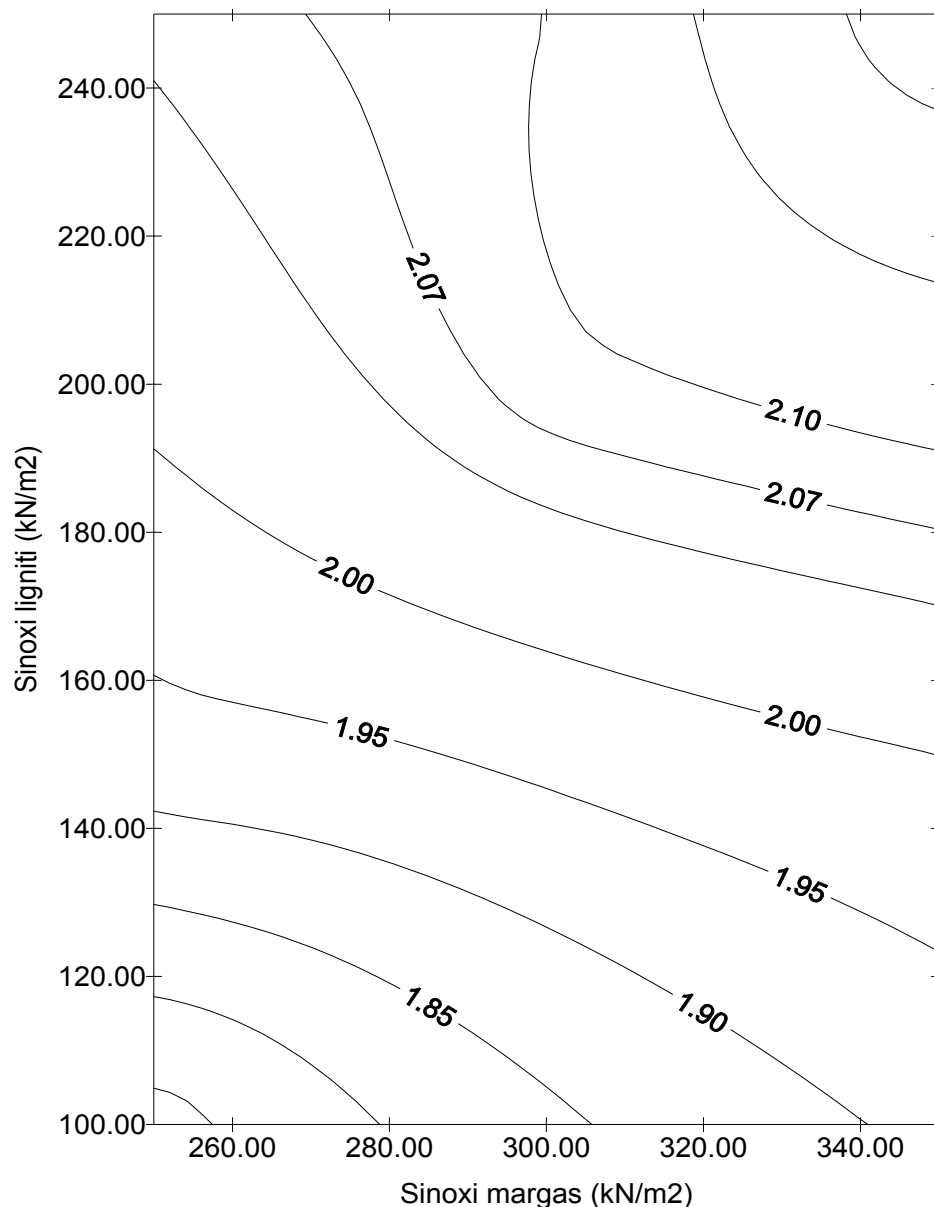
Όπως και στο αρχικό προσομοίωμα (Σχήμα 6.22), αύξηση της συνοχής των υλικών προκαλεί αύξηση του συντελεστή ευστάθειας. Κατ'αντιστοιχία με το αρχικό μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, η συνοχή του λιγνίτη επηρεάζει

λιγότερο το συντελεστή ευστάθειας από τη συνοχή της μάργας και ειδικότερα για το εύρος τιμών 160 -200 kN/m².



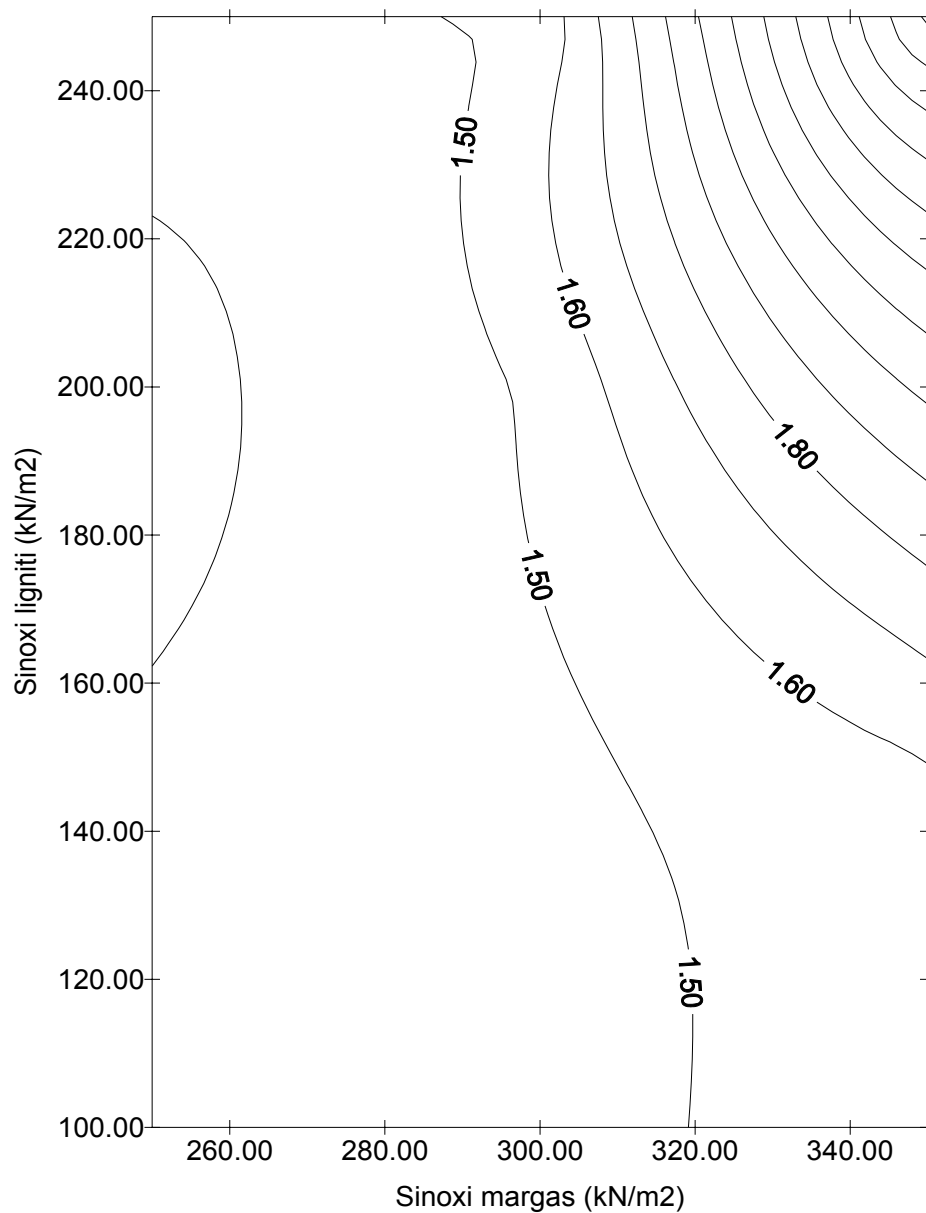
Σχήμα 6.31: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

Στο Σχήμα 6.31 για ακόμη μια φορά παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ευστάθειας με την αύξηση της συνοχής των υλικών. Στο μοντέλο σταδιακών εκσκαφών παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές συντελεστή ευστάθειας από ότι στο αρχικό μοντέλο, λόγω της σταδιακής αποτόνωσης της μάζας του εδαφικού πρανούς.



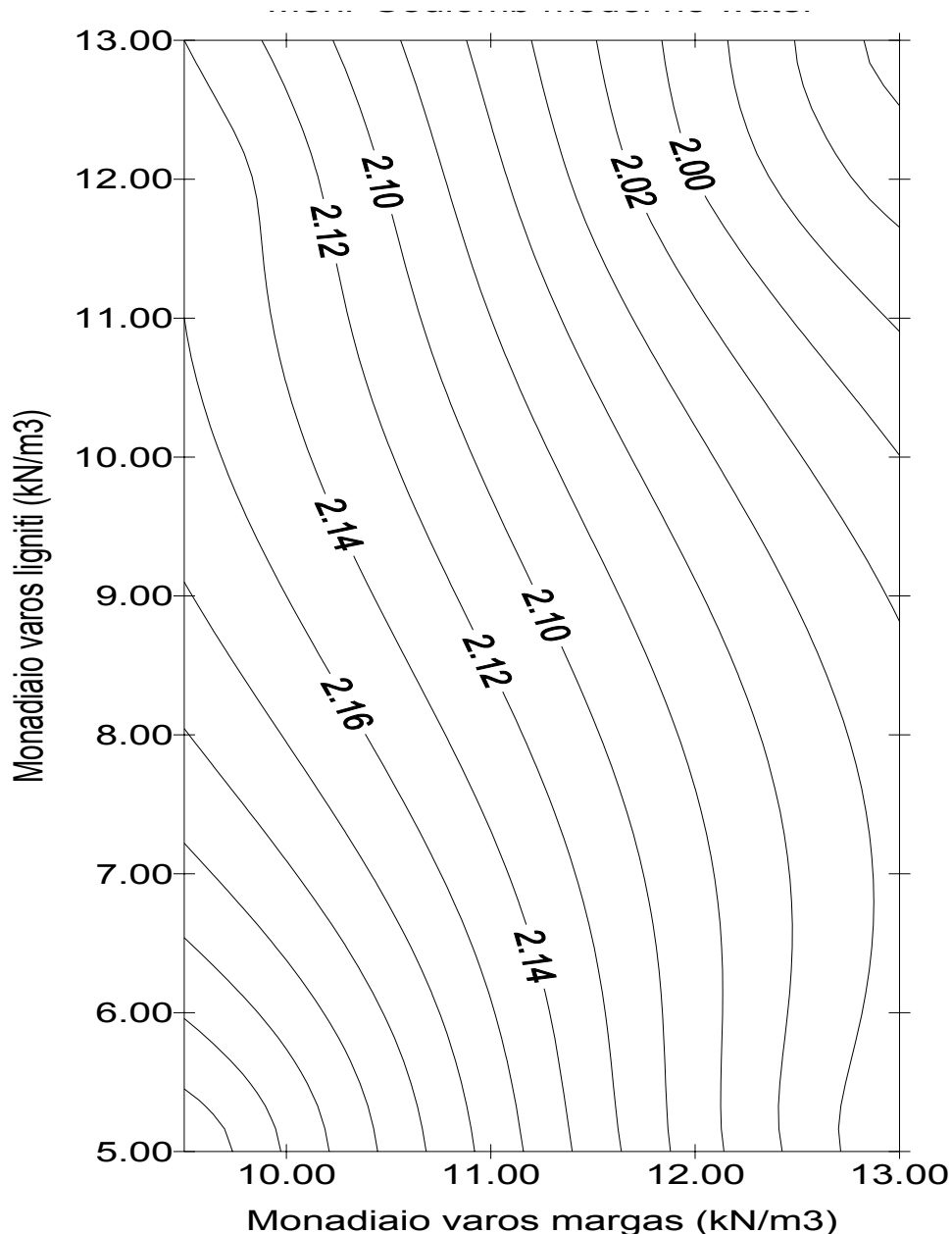
Σχήμα 6.32: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

Στην περίπτωση των σταδιακών εκσκαφών, όπου τα υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil, η αύξηση της συνοχής και των δύο υλικών επηρεάζει θετικά το συντελεστή ευστάθειας όπως και στο αρχικό μοντέλο της ίδιας συμπεριφοράς.



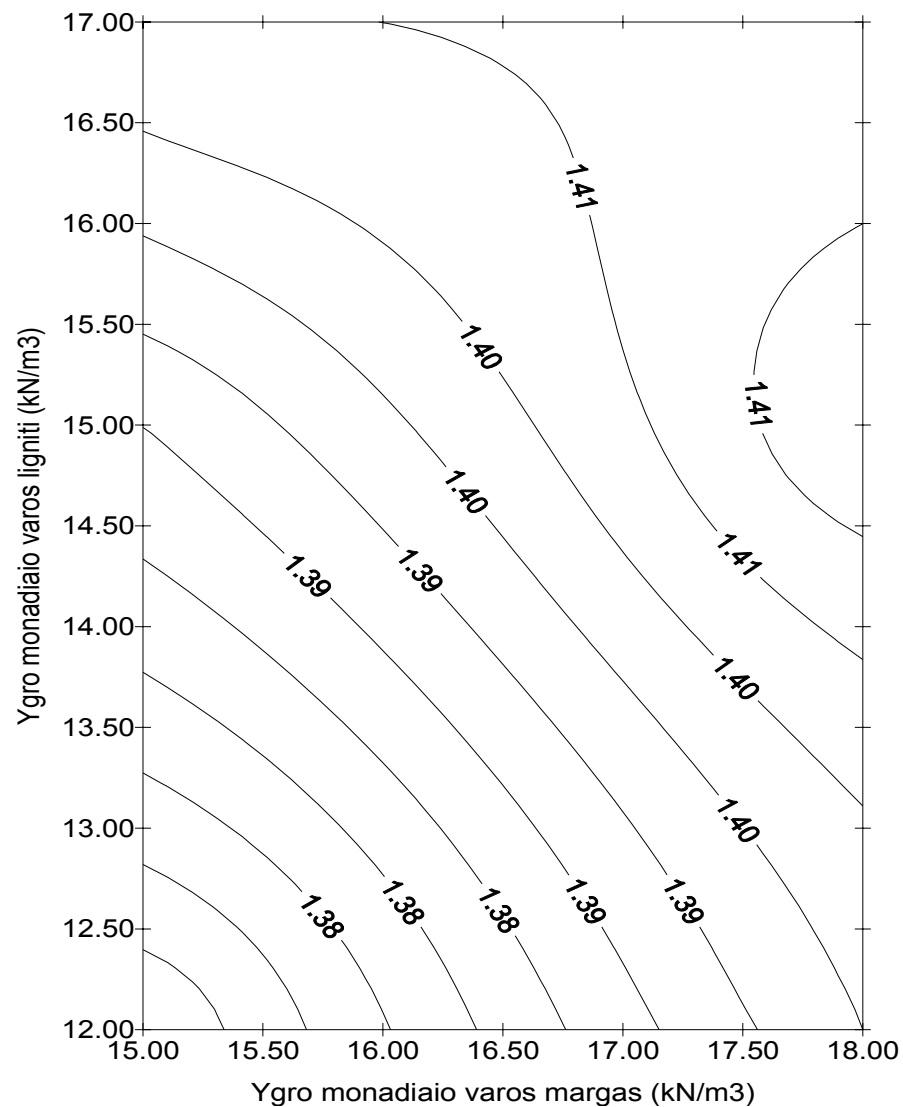
Σχήμα 6.33: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς συνοχής των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

Η συνοχή της μάργας για το εύρος τιμών 250 - 300 kN/m² φαίνεται να μην επηρεάζει το συντελεστή ευστάθειας, όσο η αύξηση της συνοχής του λιγνίτη (Σχήμα 6.33). Επίσης παρατηρείται ότι με αύξηση της συνοχής αυξάνεται ο συντελεστής ευστάθειας.



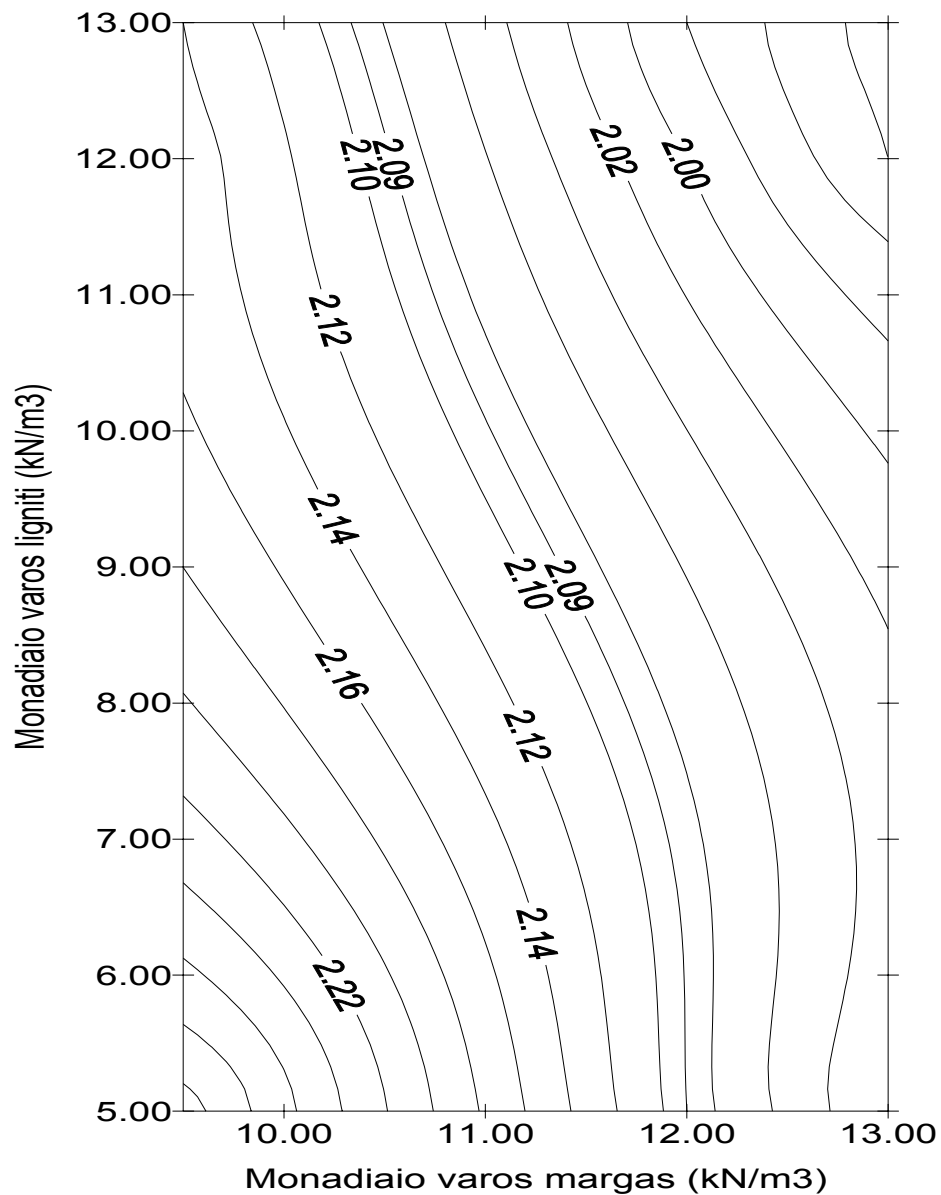
Σχήμα 6.34: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς ξηρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.34, αύξηση του μοναδιαίου βάρους των υλικών προκαλεί μείωση του συντελεστή ευστάθειας κατά αντιστοιχία με το αρχικό μοντέλο της ίδιας συμπεριφοράς.



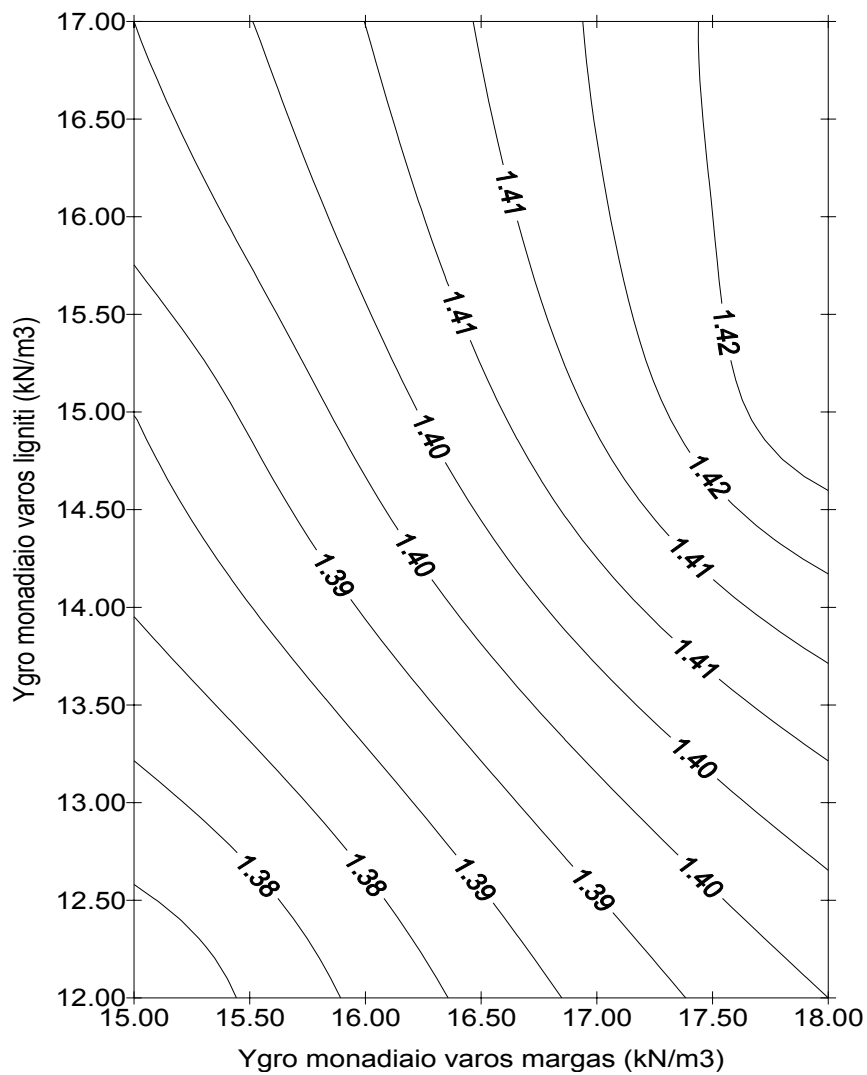
Σχήμα 6.35: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς υγρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb**.

Αύξηση του μοναδιαίου βάρους των υλικών επιφέρει αύξηση του συντελεστή ευστάθειας (Σχήμα 6.35). Το πρυνές με την εισαγωγή της υδροφορίας «βαραίνει» και επηρεάζει το συντελεστή.



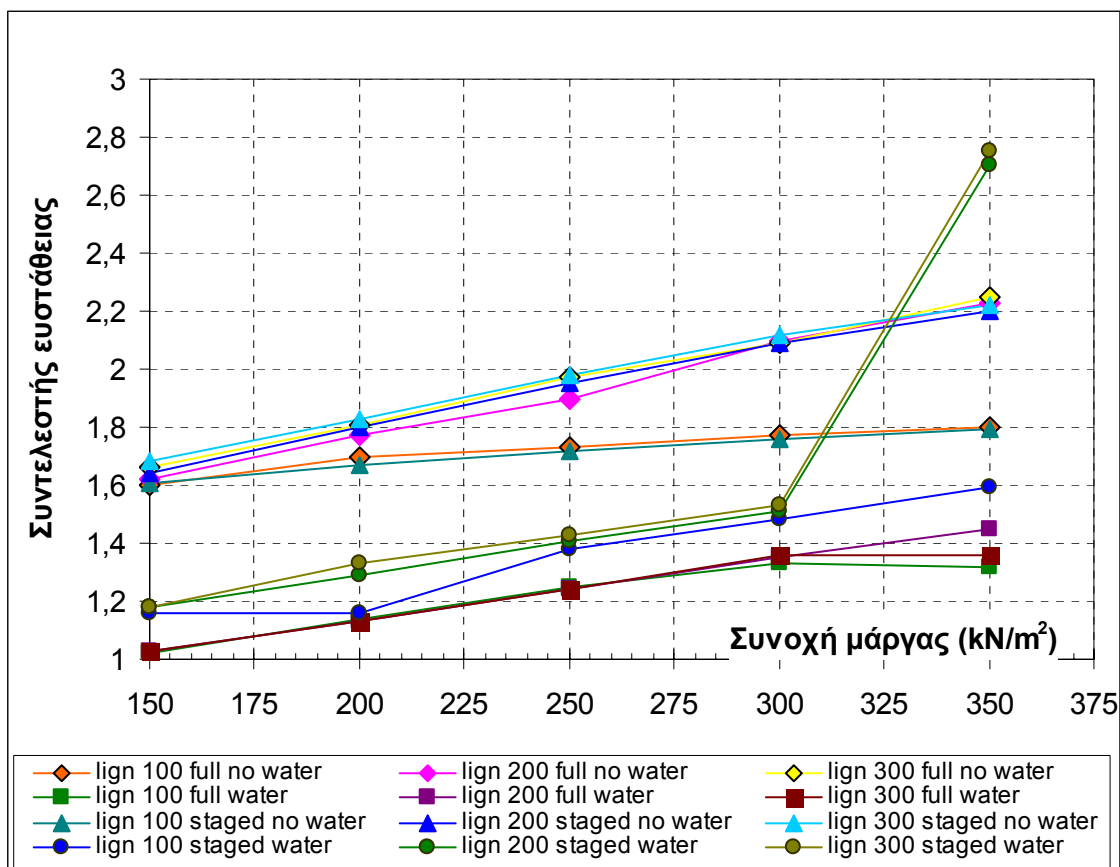
Σχήμα 6.36: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς ξηρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών χωρίς νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

Από το Σχήμα 6.36 φαίνεται ότι η αύξηση του βάρους των υλικών επιφέρει μείωση του συντελεστή ευστάθειας κατ'αντιστοιχία με το αρχικό μοντέλο. Το βάρος του λιγνίτη επηρεάζει λιγότερο το συντελεστή και αυτό οφείλεται στην μικρή έκταση που καταλαμβάνει στο σύνολο του πρανούς.



Σχήμα 6.37: Κατανομή συντελεστών ευστάθειας για τους διάφορους συνδυασμούς υγρού μοναδιαίου βάρους των υλικών του μοντέλου **σταδιακών εκσκαφών με νερό**, όταν και τα δύο υλικά υπακούουν στο μοντέλο συμπεριφοράς **Hardening Soil**.

Οι ενεργές τάσεις μειώνονται κατά την εισαγωγή του νερού. Η αύξηση του βάρους έχει σαν αποτέλεσμα την εκτόνωση της πίεσης των πόρων και την σταδιακή μείωση του συντελεστή ευστάθειας. Όμως στο Σχήμα 6.37 παρατηρείται αύξηση του συντελεστή με την παράλληλη αύξηση του βάρους.

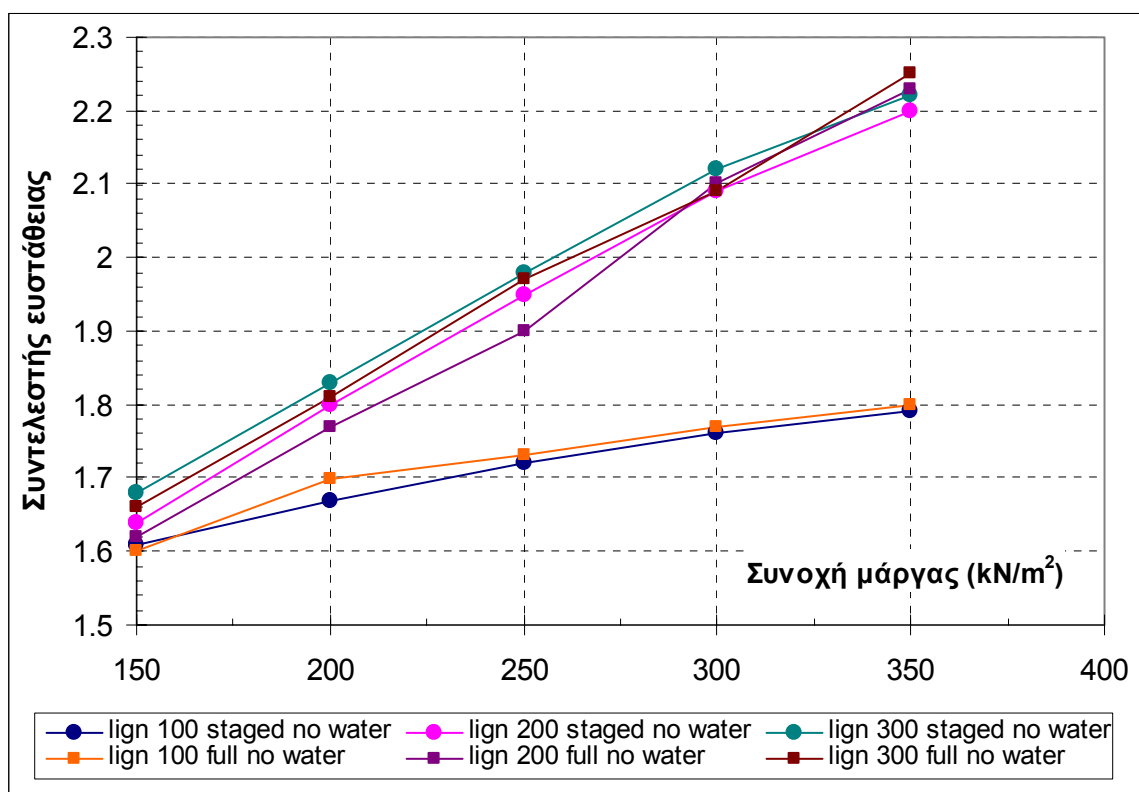


Σχήμα 6.38: Συγκριτικό γράφημα συντελεστών ευστάθειας και στα δύο είδη μοντέλων (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλο συμπεριφοράς υλικών Mohr-Coulomb με και χωρίς νερό, σε όλους τους συνδυασμούς των τιμών συνοχής των υλικών.

Στο Σχήμα 6.38 παρουσιάζονται όλοι οι συντελεστές ευστάθειας που προέκυψαν από τις διάφορες συνδυαστικές δοκιμές επίλυσης μοντέλου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb με και χωρίς νερό, σε όλους τους συνδυασμούς των τιμών συνοχής των υλικών.

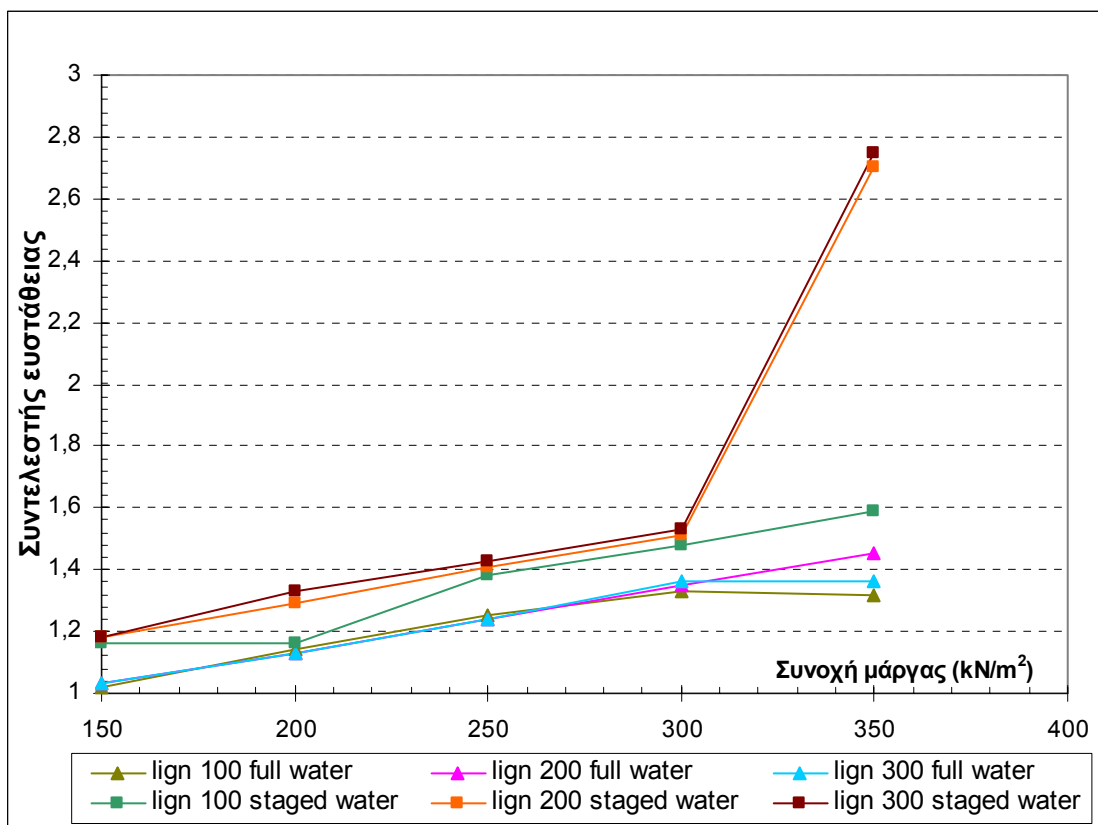
Παρατηρείται μια αυξητική τάση του συντελεστή ασφάλειας με την παράλληλη αύξηση της συνοχής των δύο υλικών. Αυτό είναι λογικό, γιατί όσο αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής ασφάλειας του εδαφικού πρανούς.

Επίσης, για καλύτερη σύγκριση, στα Σχήματα 6.39 και 6.40 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συγκρινόμενοι συντελεστές ευστάθειας του τύπου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb για όλες τις τιμές συνοχής που δόθηκαν στα υλικά του εδαφικού μοντέλου, με και χωρίς παρουσία υδροφορίας αντίστοιχα.



Σχήμα 6.39: Συγκριτικό γράφημα συντελεστών ευστάθειας και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλο συμπεριφοράς υλικών **Mohr-Coulomb χωρίς νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών συνοχής των υλικών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πρανούς προκαλεί αύξηση του συντελεστή ευστάθειας. Όσο μεγαλώνουν οι τιμές της συνοχής των υλικών το πρανές αυξάνει την ιδιότητα του να αντιστέκεται στις δυνάμεις που τείνουν να το μετακινήσουν και έτσι αυξάνεται ο συντελεστής ευστάθειας.

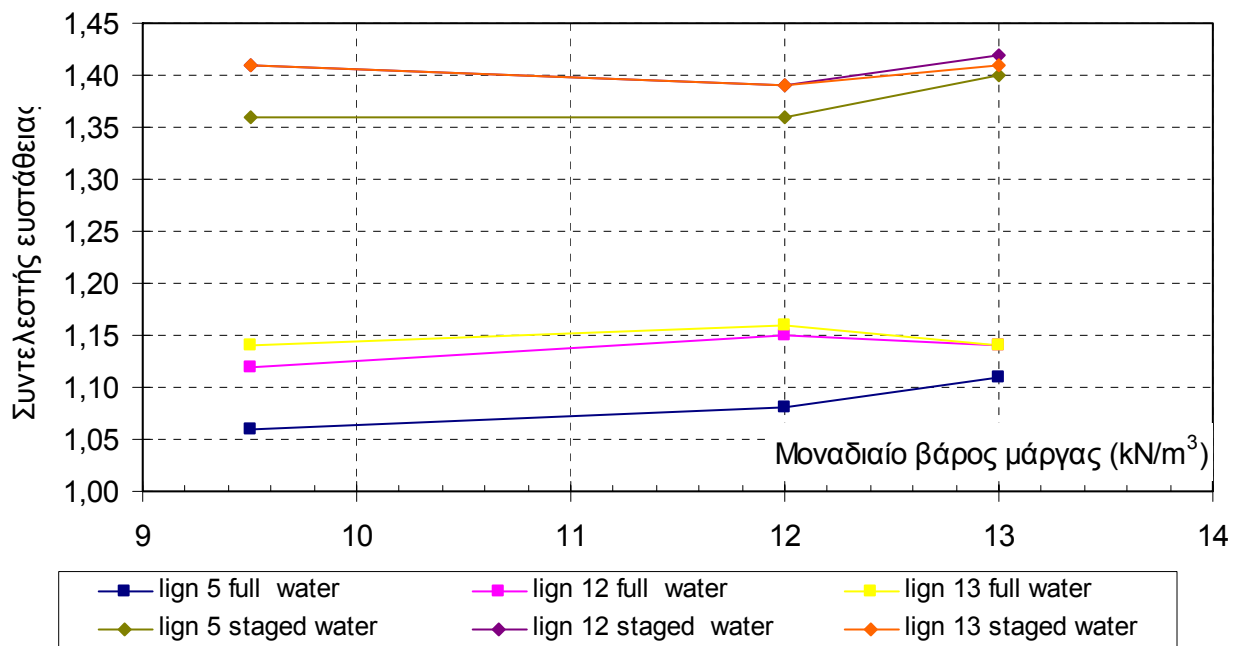


Σχήμα 6.40: Συγκριτικό γράφημα συντελεστών ευστάθειας και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb με νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών συνοχής των υλικών.

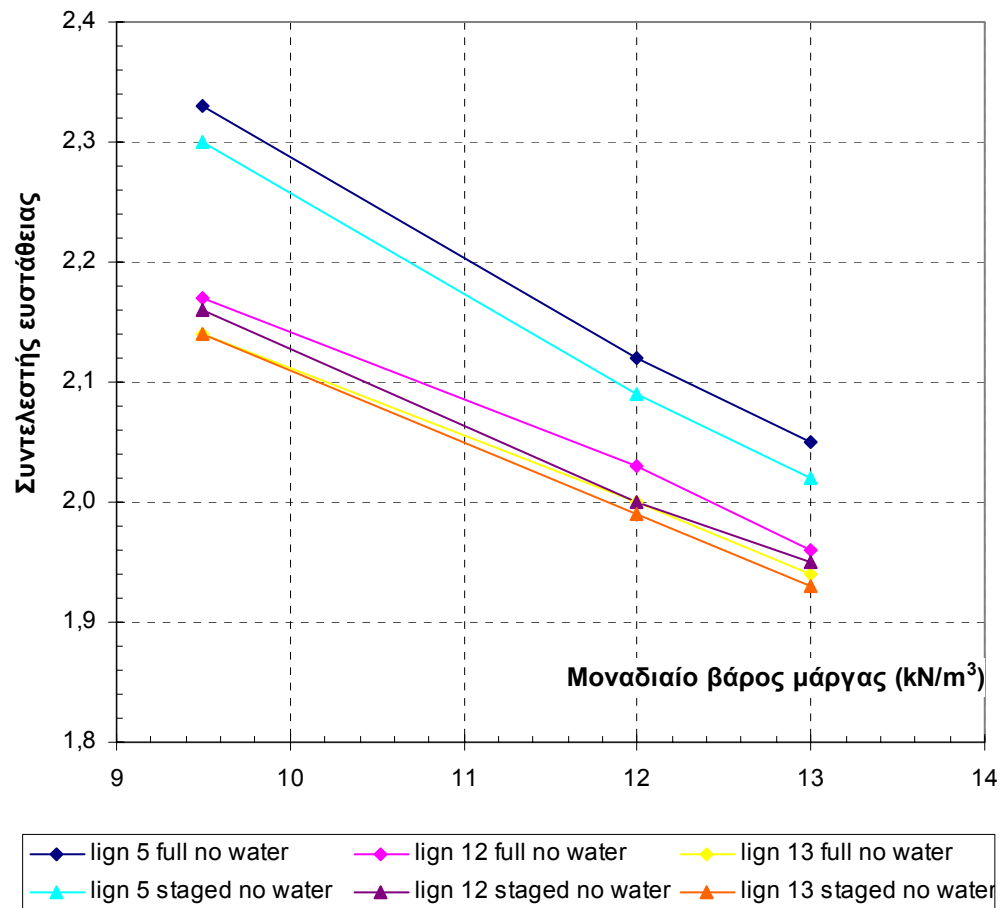
Και σε αυτό το γράφημα (Σχήμα 6.40) παρατηρήθηκε αύξηση του συντελεστή ευστάθειας με την παράλληλη αύξηση της συνοχής των υλικών. Επίσης παρατηρείται ότι στο μοντέλο σταδιακών εκσκαφών ο συντελεστής ευστάθειας είναι μεγαλύτερος από αυτόν του αρχικού μοντέλου. Αυτό είναι λογικό γιατί στο μοντέλο των σταδιακών εκσκαφών υπάρχει σταδιακή αποτόνωση του φορτίου σε κάθε στάδιο και καλύτερη κατανομή των τάσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή.

Οι συντελεστές ευστάθειας συγκρίθηκαν μόνο για το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb. Στο μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς Hardening Soil η σύγκριση δεν έχει ιδιαίτερο νόημα γιατί το Plaxis υπολογίζει και σε αυτή την περίπτωση τους συντελεστές ευστάθειας με το κριτήριο Mohr-Coulomb. Έτσι, για τα μοντέλα όπου ο τύπος συμπεριφοράς των υλικών είναι Hardening Soil, γίνεται απλώς σύγκριση των μετατοπίσεων με αυτές του μοντέλου Mohr-Coulomb.

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν γραφικά οι συντελεστές ευστάθειας με βάση τις μεταβολές του μοναδιαίου βάρους των δύο υλικών σε σχέση με την ύπαρξη ή μη υδροφορίας και για τα δύο μοντέλα. Οι μεταβολές του μοναδιαίου βάρους έγιναν στο τύπο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb (Σχήμα 6.41).

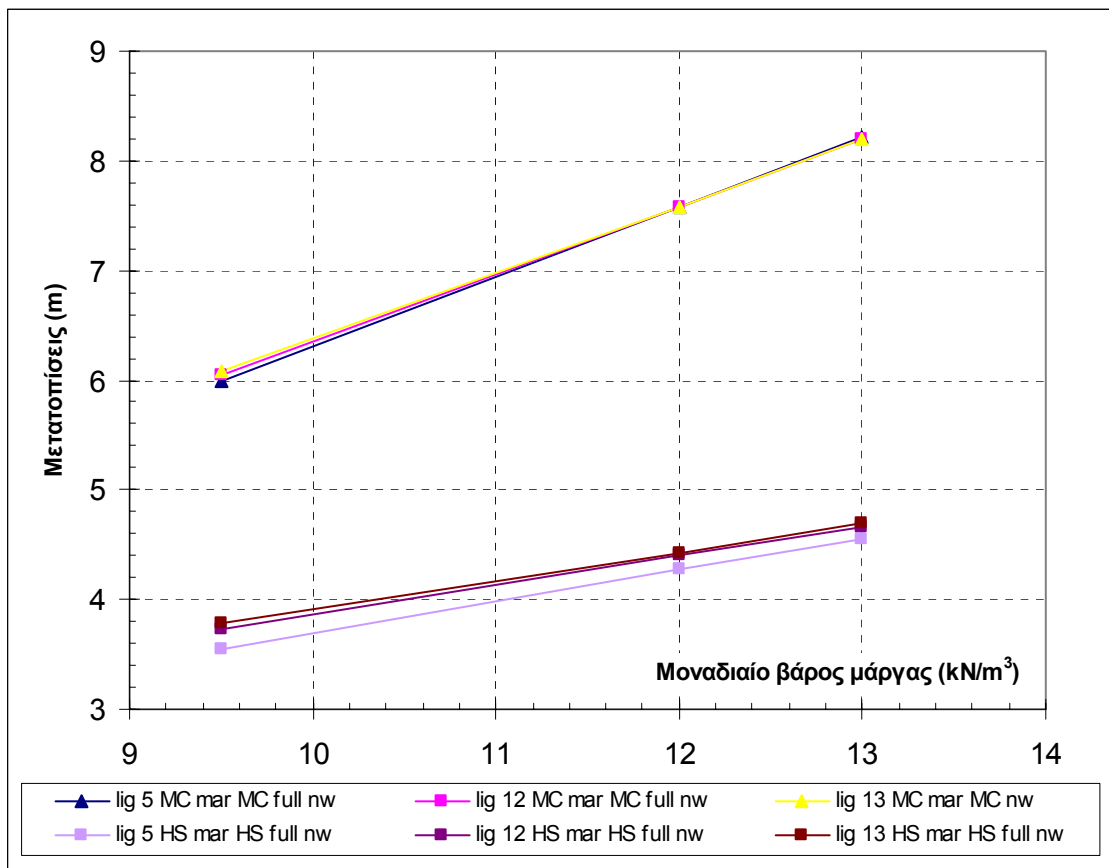


Σχήμα 6.41: Συγκριτικό γράφημα συντελεστών ευστάθειας και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb με νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μοναδιαίου βάρους των υλικών.



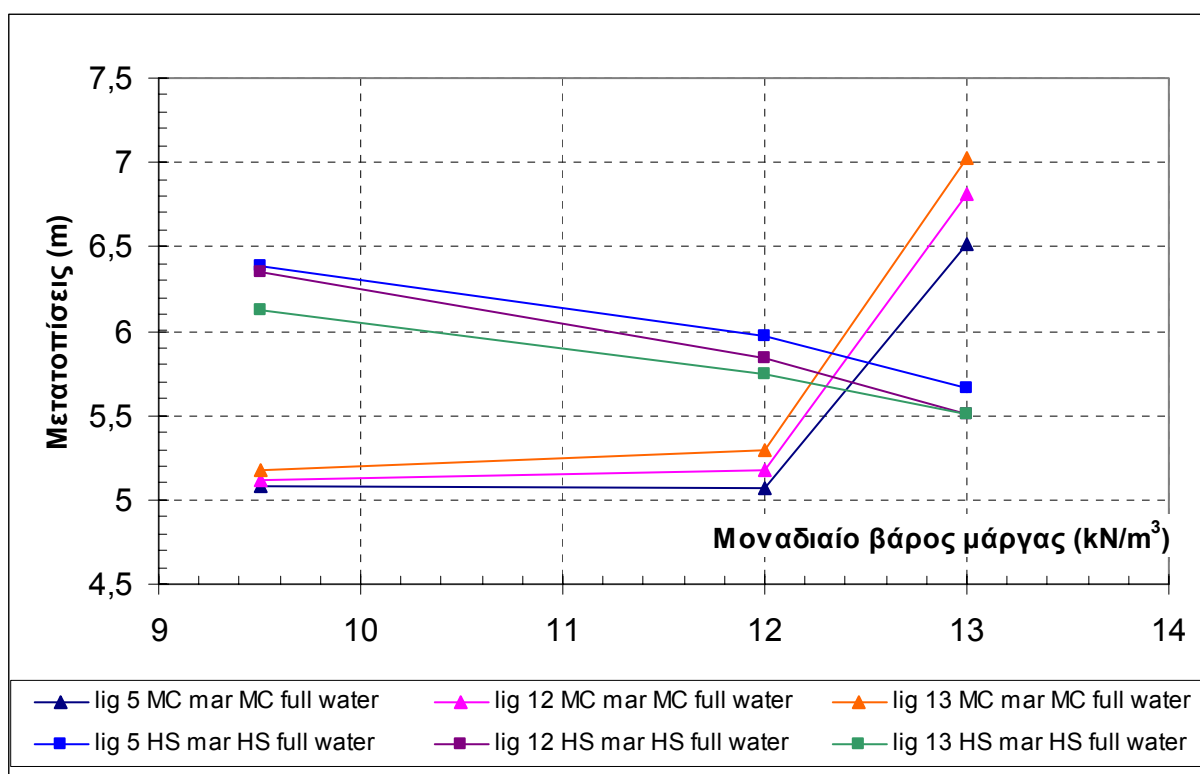
Σχήμα 6.42: Συγκριτικό γράφημα συντελεστών ευστάθειας και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλο συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb χωρίς νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μοναδιαίου βάρους των υλικών.

Στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb χωρίς νερό (Σχήμα 6.42), παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή ευστάθειας με την παράλληλη αύξηση του βάρους των υλικών. Το αρχικό προσομοίωμα έχει μεγαλύτερες τιμές συντελεστή από αυτό των σταδιακών εκσκαφών. Το σημείο όπου επιλέχθηκε κατά την επίλυση του προσομοιώματος ήταν πάντα σταθερό και αντιστοιχεί στο φρύδι του προσομοιώματος.



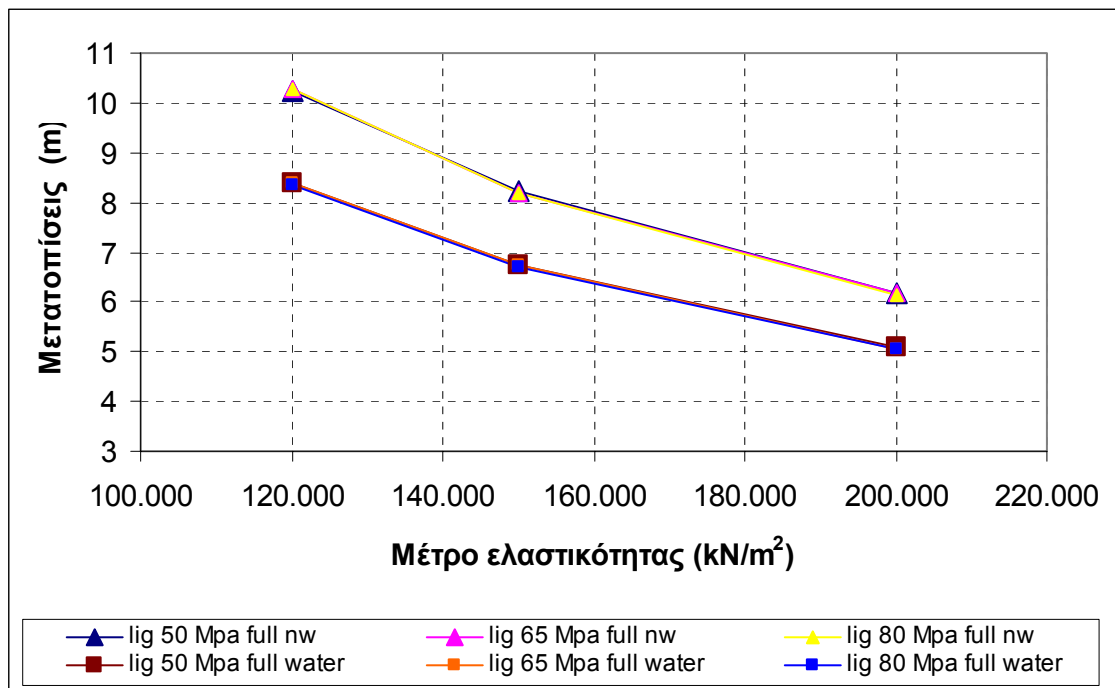
Σχήμα 6.43: Συγκριτικό γράφημα ολικών μετατοπίσεων και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλα συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb** και **Hardening Soil χωρίς νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μοναδιαίου βάρους των υλικών.

Στο γράφημα του Σχήματος 6.43 συγκρίθηκαν τα δύο μοντέλα συμπεριφοράς για τα δύο προσομοιώματα χωρίς νερό. Οι μετατοπίσεις του άξονα y του γραφήματος αναφέρονται στις ολικές μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν από το Plaxis. Παρατηρήθηκε ότι στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil οι μετατοπίσεις είναι αισθητά πιο μικρές από αυτές του μοντέλου συμπεριφοράς Mohr-Coulomb. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil προσεγγίζει πιο συντηρητικά τις τιμές της πραγματικότητας.



Σχήμα 6.44: Συγκριτικό γράφημα ολικών μετατοπίσεων και στα δύο είδη μοντέλων, (αρχικό - full και σταδιακής εκσκαφής - staged), για μοντέλα συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb** και **Hardening Soil με νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μοναδιαίου βάρους των υλικών.

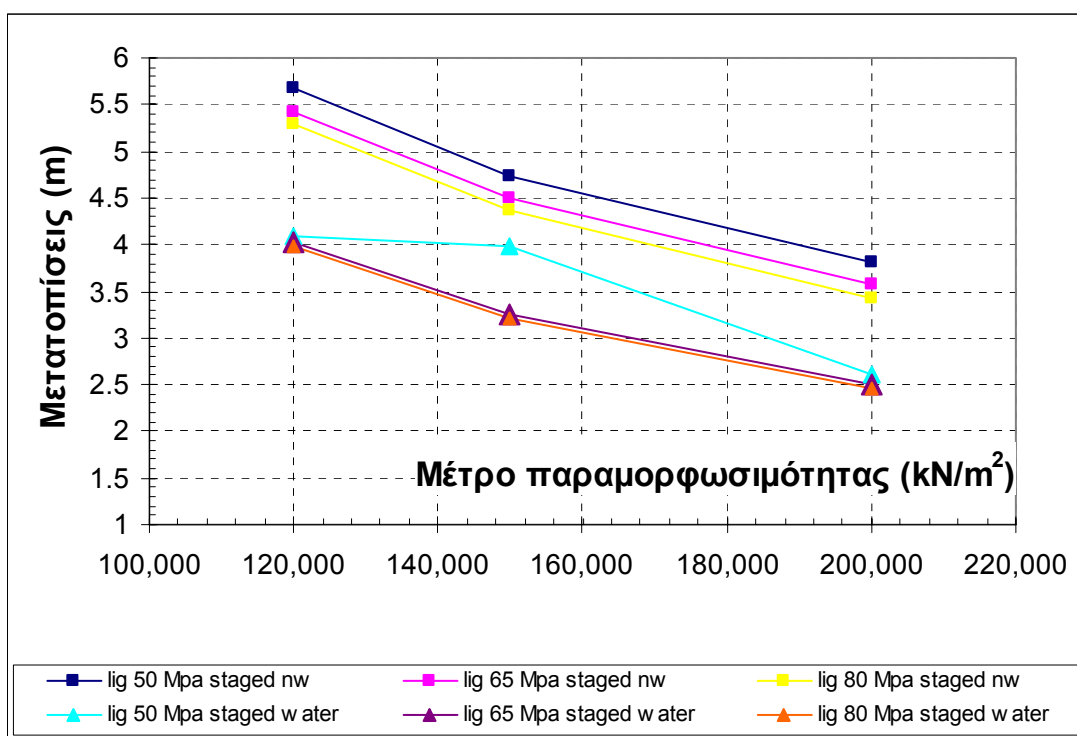
Στο γράφημα του Σχήματος 6.44 συγκρίθηκαν τα δύο μοντέλα συμπεριφοράς και για τα δύο προσομοιώματα με νερό. Παρατηρήθηκε ότι στο μοντέλο εδαφικής συμπεριφοράς Mohr-Coulomb οι ολικές μετατοπίσεις είναι πιο μικρές από αυτές του μοντέλου συμπεριφοράς Hardening Soil. Για τις τιμές μοναδιαίου βάρους πάνω από 12 kN/m³, παρατηρείται μια αντιστροφή των μετατοπίσεων και οι πιο μικρές μετατοπίσεις αντιστοιχούν στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil.



Σχήμα 6.45: Συγκριτικό γράφημα μετατοπίσεων του αρχικού μοντέλου, μοντέλου συμπεριφοράς **Mohr-Coulomb** χωρίς και με νερό, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μέτρου ελαστικότητας των υλικών.

Από τα Σχήματα 6.45 και 6.46 Παρατηρείται ότι με την εισαγωγή της παραμέτρου της υδροφορίας στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, οι μετατοπίσεις μειώθηκαν και στα δύο μοντέλα (Σχήματα 6.44, 6.45).

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil. Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας δεν επηρεάζει θετικά το συντελεστή ευστάθειας.



Σχήμα 6.46: Συγκριτικό γράφημα μετατοπίσεων του μοντέλου σταδιακής εκσκαφής, μοντέλου συμπεριφοράς **Mohr- Coulomb με και χωρίς νερό**, σε όλους τους συνδυασμούς τιμών μέτρου ελαστικότητας των υλικών.

Στο γράφημα του Σχήματος 6.46 συγκρίθηκε το προσομοίωμα των σταδιακών εκσκαφών με και χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας. Παρατηρήθηκε ότι οι μετατοπίσεις του προσομοιώματος με νερό, μειώθηκαν συγκριτικά με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του προσομοιώματος χωρίς νερό.

Στον τύπο συμπεριφοράς Hardening Soil οι τιμές του μέτρου παραμορφωσιμότητας και των δύο υλικών (μάργα, λιγνίτη) δεν ήταν αρκετές, έτσι ώστε να παρατεθούν σε κάποιο γράφημα. Αυτό που όμως μπορεί να σημειωθεί για το συγκεκριμένο τύπο, είναι ότι οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μια σημαντική μείωση συγκριτικά με τον τύπο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επίλυσης προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής.

Αρχικά παρατηρήθηκε, ότι οι μετατοπίσεις στα προσομοιώματα, όπου χρησιμοποιήθηκε ο τύπος συμπεριφοράς Hardening Soil είναι μικρότερες από αυτές του μοντέλου εδαφικής συμπεριφοράς Mohr-Coulomb και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Hardening Soil προσομοιάζει πιο ρεαλιστικά τις ιδιότητες της πραγματικότητας.

Μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων, (αυτό των σταδιακών εκσκαφών και το αρχικό προσομοίωμα), παρατηρήθηκε μια αυξημένη τιμή του συντελεστή ευστάθειας και μειωμένη των ολικών μετατοπίσεων για το πρώτο, σε σχέση με το δεύτερο. Για παράδειγμα για τις ίδιες συνθήκες και ιδιότητες, ο συντελεστής ευστάθειας για το αρχικό μοντέλο ήταν 1,90 και για το μοντέλο των σταδιακών εκσκαφών 1,94.

Έτσι, είναι σαφές ότι είναι προτιμότερη η επίλυση ενός γεωτεχνικού μοντέλου με την χρήση εκσκαφών.

Η υδροφορία μείωσε τον συντελεστή ευστάθειας και στους δύο τύπους προσομοιωμάτων (αρχικό και προσομοίωμα σταδιακών εκσκαφών).

Έτσι, στο αρχικό προσομοίωμα χωρίς νερό ο συντελεστής ευστάθειας είχε την τιμή 1,90, ενώ με την εισαγωγή του νερού η τιμή του συντελεστή για την ίδια πάντα επίλυση μειώθηκε στο 1,30. Αντίστοιχα στο προσομοίωμα των σταδιακών εκσκαφών ο συντελεστής ευστάθειας για επίλυση χωρίς νερό ήταν 1,94 και μειώθηκε σε 1,41 με την εισαγωγή της υδροφορίας.

Η μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας δεν επηρέασε πολύ το συντελεστή ευστάθειας. Και στα δύο μοντέλα συμπεριφοράς το εύρος των τιμών του συντελεστή ευστάθειας κυμάνθηκε για το αρχικό προσομοίωμα από 1,83 ως 1,96 και από 1,94 έως 1,96 για το προσομοίωμα σταδιακών εκσκαφών. Παρατηρείται λοιπόν μια σταθερότητα ειδικά στις τιμές του συντελεστή ευστάθειας για το προσομοίωμα των σταδιακών εκσκαφών.

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας επηρέασε θετικά τη μεταβολή των μετατοπίσεων. Παρατηρήθηκε μείωση των ολικών μετατοπίσεων σχεδόν στο

μισό και για τα δύο μοντέλα συμπεριφοράς για το αρχικό προσομοίωμα και μια ακόμα μεγαλύτερη μείωση για το προσομοίωμα σταδιακών εκσκαφών, με αύξηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας.

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας, του λιγνίτη δεν επηρέασε σημαντικά τη μεταβολή του συντελεστή ευστάθειας και των μετατοπίσεων. Στο μικτό μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb & Hardening Soil (προσομοίωμα Γ) οι μετατοπίσεις και ο συντελεστής δεν διαφοροποιήθηκαν ιδιαίτερα από το μοντέλο, όπου και τα δύο υλικά υπακούουν στον τύπο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb (προσομοίωμα Α).

Αντίθετα στο μικτό μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil & Mohr-Coulomb (προσομοίωμα Δ) παρατηρήθηκε μείωση των μετατοπίσεων και μια σταθερή τάση τιμών για το συντελεστή ευστάθειας. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στο απλό μοντέλο (προσομοίωμα Β) όπου και τα δύο υλικά υπακούουν στον τύπο συμπεριφοράς Hardening Soil.

Η αύξηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας της μάργας, συνέβαλε στη μείωση των μετατοπίσεων σε όλους τους συνδυασμούς μοντέλων εδαφικής συμπεριφοράς και για τα δύο προσομοιώματα. Και σε αυτή την ομάδα συνδυασμών, η υδροφορία συνέβαλε θετικά στη μείωση των μετατοπίσεων. Σε μια επίλυση για παράδειγμα, οι μετατοπίσεις για το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb ($E_{\text{μάργας}}=150 \text{ kN/m}^2$ και $E_{\text{λιγνίτη}}=80 \text{ kN/m}^2$, γιατί το $E_{\text{undrained}}$ διαφοροποιείται από το E_{drained}) χωρίς νερό ήταν της τάξης των 8,20 m, ενώ για την ίδια επίλυση με νερό οι μετατοπίσεις, ήταν της τάξης των 6,70 m. Στο αντίστοιχο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil της αντίστοιχης επίλυσης, οι μετατοπίσεις για την επίλυση χωρίς νερό ήταν 8,20 m και στην επίλυση με νερό 6,79 m.

Η αύξηση της συνοχής και των δύο υλικών επηρέασε θετικά το συντελεστή ευστάθειας και σχεδόν καθόλου τις μετατοπίσεις. Στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb (προσομοίωμα Α) και στο Mohr-Coulomb-Hardening Soil (προσομοίωμα Γ) οι μετατοπίσεις για 21 επιλύσεις, όπου η συνοχή της μάργας κυμάνθηκε από 150-350 kN/m^2 και του λιγνίτη από 100-300 kN/m^2 , δεν μεταβλήθηκε καθόλου και παρέμεινε σταθερή στην τιμή 8,20 m. Στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil- Hardening Soil (προσομοίωμα Β) και στο μοντέλο Hardening Soil - Mohr-Coulomb (προσομοίωμα Δ) οι μετατοπίσεις για εύρος μάργας από 200 έως 350 kN/m^2 και λιγνίτη 100-250 kN/m^2 , μειώθηκαν

από 4,80 m σε 4,55 m. Βέβαια όταν αυξάνεται η συνοχή του λιγνίτη και της μάργας παραμένει σταθερή οι μετατοπίσεις αυξάνονται. Με αύξηση της συνοχής της μάργας παρατηρείται μείωση των μετατοπίσεων, ενώ με αύξηση της συνοχής του λιγνίτη, αυξάνονται οι μετατοπίσεις καθώς και ο συντελεστής ευστάθειας.

Στα αντίστοιχα προσομοιώματα με νερό οι μετατοπίσεις μειώθηκαν αισθητά (Mohr-Coulomb) ενώ στα μοντέλα συμπεριφοράς Hardening Soil αυξήθηκαν.

Το προσομοίωμα των σταδιακών εκσκαφών όπως είναι φυσικό επηρέασε θετικά το συντελεστή ευστάθειας. Οι τιμές του για ένα εύρος συνοχών και των δύο υλικών, κυμάνθηκαν από 1,64 έως 2,22 για τις επιλύσεις χωρίς νερό και 1,16 έως 2,75 για τις επιλύσεις με νερό.

Η αύξηση της συνοχής των εδαφικών υλικών συνέβαλε στην αύξηση του συντελεστή ευστάθειας δεδομένου ότι αυξάνοντας κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητες ενός εδαφικού σχηματισμού, ενισχύεται η σταθερότητά του.

Οι μετατοπίσεις, σε σχέση με τη μεταβολή της συνοχής των εδαφικών υλικών, ήταν πιο μικρές στις επιλύσεις με την παρουσία υδροφορίας συγκριτικά με τις αντίστοιχες επιλύσεις χωρίς την παρουσία υδροφορίας και στα δύο είδη προσομοιωμάτων (αρχικό, σταδιακών εκσκαφών). Επίσης μεταξύ των δύο μοντέλων συμπεριφοράς (Mohr-Coulomb και Hardening Soil) οι μετατοπίσεις στο δεύτερο μοντέλο ήταν πιο μικρές και πιο κοντά σε αυτές της παραγωγικότητας (0,98 m). Ακόμα και στα μικτά μοντέλα συμπεριφοράς (προσομοιώματα Γ,Δ) οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μείωση ειδικά σε αυτό όπου η μάργα υπακούει στο μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil.

Τέλος για την τελευταία ομάδα επιλύσεων, όπου μεταβλήθηκαν τα μοναδιαία βάρη (ξηρά και υγρά) των υλικών παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή ευστάθειας με την αύξηση των ξηρών βαρών των υλικών και κυρίως της μάργας. Η αύξηση του μοναδιαίου βάρους του λιγνίτη φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή ευστάθειας. Γενικά κατά την επίλυση των προσομοιωμάτων προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

- ✓ Ο συντελεστής ευστάθειας στις επιλύσεις όπου μεταβλήθηκε το μέτρο παραμορφωσιμότητας των υλικών, δεν μεταβλήθηκε σημαντικά.
- ✓ Οι μεταβολές του μέτρου παραμορφωσιμότητας του λιγνίτη δεν επηρέασαν το συντελεστή ευστάθειας όσο αυτές της μάργας, αλλά ούτως η άλλως η διακύμανση αυτή ήταν αμελητέα.

- ✓ Η αύξηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας των δύο εδαφικών υλικών (κυρίως αυτού της μάργας) συνέβαλε στη μείωση των μετατοπίσεων και ιδιαίτερα στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου εδαφικής συμπεριφοράς Hardening Soil.
- ✓ Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του μοντέλου εδαφικής συμπεριφοράς Hardening Soil, προσεγγίζουν καλύτερα τις πραγματικές τιμές μετατοπίσεων.
- ✓ Το μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil υπολογίζει το συντελεστή ασφαλείας με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, με αποτέλεσμα να μην διαφοροποιείται από το αντίστοιχο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb στο κομμάτι υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας.
- ✓ Ο συντελεστής ευστάθειας συγκρίθηκε στο μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb και παρατηρήθηκε μια αύξηση αυτού κατά την αύξηση της συνοχής των υλικών και μείωσή του κατά την αύξηση των μοναδιαίων βαρών. Η μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας δεν επηρέασε αισθητά την τιμή του συντελεστή ευστάθειας.
- ✓ Με την εισαγωγή της υδροφορίας παρατηρήθηκε αισθητή μείωση του συντελεστή ευστάθειας σε όλες τις επιλύσεις.
- ✓ Επίσης, με την εισαγωγή της υδροφορίας οι μετατοπίσεις αυξήθηκαν, γεγονός που οφείλεται στο επιπλέον βάρος που ασκεί το νερό στο σύνολο του βάρους των υλικών.
- ✓ Οι τιμές των μετατοπίσεων του προσομοιώματος των σταδιακών εκσκαφών είναι πιο ρεαλιστικές από τις αντίστοιχες του αρχικού προσομοιώματος.

Προτάσεις

Στο σημείο αυτό συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται οι προτάσεις βελτίωσης που προέκυψαν κατά την επίλυση όλων των μοντέλων.

- ✓ Απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός των τιμών των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών προκειμένου να πραγματοποιηθούν επιλύσεις σε πραγματικά πρηνή.
- ✓ Δεδομένης της επίδρασης της υδροφορίας στη συμπεριφορά των εδαφικών πρηνών κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός της θέσης

του υδροφόρου ορίζοντα και η εκτίμηση της πίεσης των πόρων προκειμένου τα αποτελέσματα της επίλυσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά.

- ✓ Για την μοντελοποίηση πραγματικού πρανούς απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός της γεωμετρίας των εδαφικών σχηματισμών καθώς και των γεωλογικών-τεκτονικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.
- ✓ Αποσαφήνιση του μοντέλου συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά την επίλυση μέσω εργαστηριακών δοκιμών προκειμένου να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, κυρίως όσο αφορά τις μετατοπίσεις.
- ✓ Σε περίπτωση ύπαρξης υδροφορίας, προτείνεται η αποστράγγιση του πρανού, δεδομένου ότι το νερό επηρεάζει κατά πολύ την ευστάθειά του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Αγιουτάντης, Ζ.**, (2002). “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις “ΙΩΝ”, Αθήνα.
2. **Αναστασόπουλος και Κούκουζας**, (1972). “Γεωλογικά Στοιχεία και Τεκτονική περιγραφή της Μαυροπηγής”, Αθήνα.
3. **Βαλαλάς, Β.**, (1981). “Εδαφομηχανική”, Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
4. **Δ.Ε.Η.** (2002). Ιστοσελίδα
5. **Δημόπουλος, Γ.**, (1986). “Τεχνική Γεωλογία με βασικές έννοιες βραχομηχανικής και γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων”, Εκδόσεις “Γιαχούδη-Γιαπούλη”, Θεσσαλονίκη
6. **Διαμαντόπουλος, Α.**, (2003) “Τεκτονική δραστηριότητα Μαυροπηγής”, Θεσσαλονίκη.
7. **Έκθεση Εργαστηριακών Δοκιμών**, (2000), ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
8. **Ελπέκος, Σ.Η.**, (2000). “Η Παραμένουσα αντοχή Συνεκτικών εδαφών”. Θεσσαλονίκη.
9. **Εξαδάκτυλος, Γ.**, (2001). “Ανάλυση Ευστάθειας Υπαίθριων και Υπόγειων Έργων”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
10. **Καββαδάς, Μ.**, (2000). “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα.
11. **Καλογήρου, Ε.**, (2000). “Εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και υπολογισμός της αναθόλωσης του δαπέδου της εκσκαφής του Τομέα 6 (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας)”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. **Καλογήρου, Ε.**, (2003). Παραμετρική Ανάλυση Εδαφικών Πρανών με τη των Πεπερασμένων Στοιχείων, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
13. **Κανάρης, Δ.**, (2006). Ανάλυση Παραγόντων που συνέβαλαν στη κατολίσθηση της περιοχής του Αγ.Φωκά της Κω, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
14. **Κολέτσος**, (2004). Γεωτεχνική Μηχανική Εκδόσεις University, studio press, Θεσσαλονίκη.

15. **Λέκκας, Ευθ.**, (1996). “Φυσικές και Τεχνολογικές καταστροφές”, Εκδόσεις Access Pre – Press, Αθήνα.
16. **Λεονάρδος, Μαρ.**, (2004). “Μέθοδοι και διαδικασίες παρακολούθησης, εκτίμησης και βελτίωσης της ευστάθειας των πρανών των εκσκαφών των βαθέων Ελληνικών λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
17. **Μαρκέτος, Ε.Γ.**, (1992). “Τεχνική Μηχανική, Τόμος II, Αντοχή των Υλικών”, Εκδόσεις “Συμμετρία”, Αθήνα.
18. **Παπαζάχος, Β. και Κ. Παπαζάχου**, (1989). “Οι σεισμοί της Ελλάδας”, Θεσσαλονίκη.
19. **Παπακωνσταντίνου, Δ.**, (2006). “Ανάλυση ευστάθειας πρανούς στην περιοχή του Αγίου Φωκά της Κω με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
20. **Στειακάκης, Εμμ.**, (1996). “Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
21. **Τίκα,Θ.**, (2002). “Εκτίμηση των Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής”, μετακινήσεων του εδάφους θεμελίωσης του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και του Βιομηχανικού Συγκροτήματος ΛΚΠ-Α λόγω της προώθησης του μετώπου εκσκαφής κατά τις εργασίες διάνοιξης του Ορυχείου Μαυροπηγής, Ερευνητικό Πρόγραμμα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη.
22. **Τσόγκας, Χ.Ε. και Ε.Χ. Τσόγκα**, (2000). Υδροδυναμικά Έργα-Φράγματα Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
23. **Τσότσος, Σ.**, (1991). Εδαφομηχανική-Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη.
24. **Bishop**, (1955). The use of slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique5, pp 7 -17.
25. **Brinkgreve, R.B.J. and H.L. Bakker** (1991). “Non-linear, finite element analysis of safety factors”, Computer Methods and Advances in Geomechanics. Beer, Booker & Carter (eds), Balkema, Rotterdam.
26. **Chen, W.F. and D.J. Han**, (1988). “Plasticity for Structural Engineering”, Springer- Verlag, New York.
27. **Craig, R.F.**, (1997). “Soil Mechanics”, Department of Civil Engineering, University of Dundee.

28. **Desai**, (1979), "Some aspects of constitutive models for geologic media and Introduction, numerical methods and special topics, *Numerical Methods in Geomechanics* ", McGraw-Hill, New York.
29. **Duncan J.M.**, (1996), "State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes", Journal of Geotechnical Engineering.
30. **Fagan**, (1996), "Finite Element Analysis, Theory and Practice", Longman.
31. **IGE**, (2003) "Modelling in Geotechnics, Finite Element Method (FEM) in Geotechnical Engineering, Chapter 8", Institute of Geotechnical Engineering, ETH Zurich. Last accessed: June 2004.
32. **Kim, J.Y. and S.R. Lee**, (1997). "An Improved Search Strategy for the Critical Slip Surface using Finite Element Stress Fields", Computers and Geotechnics, vol. 21, No. 4, pp. 295-313.
33. **Morgenstern and Price, 1965 Nash, D.**, (1987). "A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis", Slope Stability-Geotechnical Engineering and Geomorphology, M.G. Anderson and K.S. Richards (editors), John Wiley and Sons Ltd.
34. **Plaxis**, (1998). User's Manual for Version 7.0, Balkema, Rotterdam.
35. **U.S. Army Corps of Engineers**, (1994). "Engineering and Design—Rock Foundations, Chapter 8: Cut Slope Stability", Department of the Army, P.N.: EM 1110-1-2908, Washington.
36. **Zaruba and Menci**, (1982), "Landslides and their control", Elsevier, Amsterdam; Academia, Prague.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

1^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.1: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς στο αρχικό μοντέλο χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα E_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης E_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
120.000	50.000	10,25	1,13	10,25	1,90
120.000	65.000	10,26	1,13	10,26	1,90
120.000	80.000	10,26	1,13	10,26	1,90
150.000	50.000	8,21	0,9	8,21	1,92
150.000	65.000	8,20	0,9	8,20	1,90
150.000	80.000	8,20	0,9	8,20	1,90
200.000	50.000	6,19	0,67	6,19	1,95
200.000	65.000	6,16	0,68	6,16	1,92
200.000	80.000	6,15	0,68	6,15	1,91
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα E_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης E_{50}^{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
120.000	69.614	10,25	1,11	10,25	1,96
120.000	75.000	10,25	1,11	10,25	1,96
150.000	69.614	8,20	0,89	8,20	1,82
150.000	75.000	8,20	0,89	8,20	1,97
200.000	69.614	6,15	0,67	6,15	1,96
200.000	75.000	6,15	0,67	6,15	1,96
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα E_{50}^{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης E_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
232.200	50.000	4,72	0,81	4,71	1,95
232.200	65.000	4,66	0,81	4,66	1,96
232.200	80.000	4,63	0,81	4,63	1,96
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα E_{50}^{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης E_{50}^{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
232.200	69.614	4,66	0,81	4,66	1,96
232.200	75.000	4,76	0,81	4,76	1,96

2^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.2: Μεταβολή συνοχής στους τέσσερις τύπους συμπεριφοράς επίλυσης του αρχικού μοντέλου χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα c_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης c_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
150	100	8,20	0,89	8,20	1,60
150	200	8,20	0,89	8,20	1,62
150	300	8,20	0,89	8,20	1,66
200	100	8,20	0,89	8,20	1,70
200	200	8,20	0,89	8,20	1,77
200	300	8,20	0,89	8,20	1,81
250	100	8,20	0,89	8,20	1,73
250	200	8,20	0,89	8,20	1,90
250	300	8,20	0,89	8,20	1,97
300	100	8,20	0,89	8,20	1,77
300	200	8,20	0,89	8,20	2,10
300	300	8,20	0,89	8,20	2,09
350	100	8,20	0,89	8,20	1,80
350	200	8,20	0,89	8,20	2,23
350	300	8,20	0,89	8,20	2,25
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα c_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης c_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
150	100	8,20	0,89	8,20	1,60
150	200	8,20	0,89	8,20	1,63
250	100	8,20	0,89	8,20	1,76
250	200	8,20	0,89	8,20	1,93
350	100	8,20	0,89	8,20	1,81
350	200	8,20	0,89	8,20	2,24
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα c_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης c_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
200	150	4,49	0,78	4,47	1,80
200	200	4,49	0,78	4,47	1,80
200	250	4,49	0,78	4,47	1,81
300	150	4,77	0,81	4,75	1,97
300	200	4,77	0,81	4,75	2,13
300	250	4,77	0,81	4,75	2,12
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα c_{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης c_{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
250	100	4,55	0,79	4,54	1,72
250	150	4,58	0,79	4,57	1,73
300	200	4,68	0,80	4,67	1,75
300	250	4,68	0,80	4,67	2,10
350	150	4,73	0,80	4,72	2,00
350	250	4,83	0,83	4,82	2,24

3^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.3: Μεταβολή ξηρού ειδικού μοναδιαίου βάρους (γ_{dry}) του αρχικού μοντέλου, στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς εδαφών χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
γ_{dry} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	6,00	0,63	6,00	2,33
9,5	12	6,05	0,66	6,05	2,17
9,5	13	6,09	0,67	6,09	2,14
12	5	7,57	0,80	7,57	2,12
12	12	7,57	0,82	7,57	2,03
12	13	7,57	0,83	7,57	2,00
13	5	8,21	0,86	8,21	2,05
13	12	8,20	0,89	8,20	1,96
13	13	8,20	0,89	8,20	1,94
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
γ_{dry} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	6,00	0,64	6,00	2,31
9,5	12	6,01	0,66	6,01	2,16
9,5	13	6,05	0,67	6,05	2,15
12	5	7,57	0,80	7,57	2,08
12	12	7,57	0,83	7,57	2,00
12	13	7,57	0,83	7,57	1,98
13	5	8,21	0,86	8,21	2,03
13	12	8,20	0,89	8,20	1,95
13	13	8,20	0,90	8,20	1,93
13	15	8,20	0,90	8,20	1,91
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
γ_{dry} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	3,56	0,60	3,55	2,31
9,5	12	3,78	0,63	3,77	2,17
9,5	13	3,82	0,63	3,81	2,15
12	5	4,28	0,73	4,28	2,10
12	12	4,46	0,76	4,45	2,00
12	13	4,50	0,76	4,48	1,99
13	5	4,56	0,78	4,56	2,03
13	12	4,72	0,81	4,71	1,96
13	13	4,76	0,81	4,74	1,95
13	15	4,83	0,82	4,81	1,93
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
γ_{dry} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	3,55	0,60	3,55	2,33
9,5	12	3,73	0,63	3,72	2,27
9,5	13	3,78	0,64	3,77	2,17
12	5	4,27	0,72	4,27	2,12

12	12	4,40	0,76	4,38	1,99
12	13	4,43	0,76	4,42	1,98
13	5	4,55	0,78	4,55	2,02
13	12	4,66	0,81	4,64	1,97
13	13	4,69	0,82	4,68	1,94

4^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.4: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς στο αρχικό προσομοίωμα με υδροφορία.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα E_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης E_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
120.000	50.000	8,40	3,80	8,02	1,30
120.000	65.000	8,37	3,79	8,00	1,30
120.000	80.000	8,36	3,79	7,99	1,30
150.000	50.000	6,74	3,04	6,44	1,34
150.000	65.000	6,72	3,04	6,42	1,29
150.000	80.000	6,70	3,03	6,40	1,30
200.000	50.000	5,10	2,28	4,87	1,33
200.000	65.000	5,06	2,28	4,83	1,32
200.000	80.000	5,04	2,28	4,82	1,30
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα E_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης E_{50}^{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
120.000	69.614	8,42	4,11	8,08	1,19
120.000	75.000	8,42	4,11	8,07	1,19
150.000	69.614	6,79	3,29	6,50	1,19
150.000	75.000	6,79	3,29	6,50	1,18
200.000	69.614	5,17	2,47	4,94	1,18
200.000	75.000	5,16	2,47	4,93	1,18
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα E_{50}^{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης E_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
232.200	50.000	4,90	2,35	4,66	1,32
232.200	65.000	4,84	2,35	4,61	1,32
232.200	80.000	4,81	2,35	4,58	1,31
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα E_{50}^{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης E_{50}^{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
232.200	69.614	4,94	2,47	4,66	1,31
232.200	75.000	4,94	2,47	4,67	1,30

5^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.5: Μεταβολή συνοχής στους τέσσερις τύπους συμπεριφοράς επίλυσης του αρχικού προσομοιώματος με υδροφορία.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
150	100	7,87	3,90	7,41	1,02
150	200	7,83	3,87	7,47	1,03
150	300	7,82	3,86	7,45	1,03
200	100	7,43	3,57	7,08	1,14
200	200	7,39	3,54	7,06	1,13
200	300	7,40	3,54	7,06	1,13
250	100	7,07	3,32	6,75	1,25
250	200	7,03	3,29	6,72	1,24
250	300	7,03	3,29	6,72	1,24
300	100	6,74	3,10	6,45	1,33
300	200	6,72	3,09	6,44	1,35
300	300	6,71	3,09	6,43	1,36
350	100	6,49	2,95	6,20	1,32
350	200	6,48	2,94	6,21	1,45
350	300	6,47	2,93	6,20	1,36
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
150	100	8,09	4,16	7,68	0,99
150	200	8,04	4,03	7,68	1,00
250	100	7,16	3,55	6,80	1,20
250	200	7,11	3,44	6,78	1,22
350	100	6,58	3,23	6,25	1,25
350	200	6,53	3,09	6,21	1,42
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
200	150	5,26	2,87	4,87	1,13
200	200	5,24	2,87	4,86	1,12
200	250	5,24	2,87	4,86	1,13
300	150	5,19	2,71	4,85	1,34
300	200	5,18	2,71	4,85	1,34
300	250	5,18	2,70	4,84	1,34
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
		Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
250	100	5,14	2,85	4,77	1,23
250	150	5,10	2,77	4,77	1,24
300	200	5,10	2,70	4,76	1,35
300	250	5,06	2,66	4,73	1,35

350	150	5,10	2,69	4,77	1,45
350	250	5,10	2,64	4,77	1,44

6^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.6: Μεταβολή ξηρού και υγρού ειδικού μοναδιαίου βάρους (γ_{dry} & γ_{wet}) του αρχικού μοντέλου, στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς εδαφών.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb							
γ_{dry} (kN/m ³)		γ_{wet} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	15	12	5,08	4,34	3,90	1,06
9,5	12	15	15	5,12	4,15	4,29	1,12
9,5	13	15	17	5,17	4,06	4,44	1,14
12	5	15	12	5,07	4,16	4,10	1,08
12	12	15	15	5,18	4,03	4,46	1,15
12	13	15	17	5,29	3,98	4,61	1,16
13	5	18	12	6,52	3,71	6,23	1,11
13	12	18	15	6,81	3,68	6,56	1,14
13	13	18	17	7,02	3,67	6,75	1,14
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil							
γ_{dry} (kN/m ³)		γ_{wet} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	15	12	5,51	4,42	5,61	1,05
9,5	12	15	15	6,33	4,54	5,61	1,10
9,5	13	15	17	6,40	4,41	5,69	1,12
12	5	15	12	5,64	4,26	4,72	1,06
12	12	15	15	6,30	4,34	5,59	1,73
12	13	15	17	6,44	4,25	5,76	1,14
13	5	18	12	6,80	3,66	6,42	1,11
13	12	18	15	7,40	3,85	6,95	1,14
13	13	18	17	7,16	3,66	6,77	1,14
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb							
γ_{dry} (kN/m ³)		γ_{wet} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	15	12	5,46	3,97	4,53	1,11
9,5	12	15	15	5,28	3,66	4,57	1,15
9,5	13	15	17	5,30	3,60	4,66	1,17
12	5	15	12	5,16	3,65	4,47	1,13
12	12	15	15	5,14	3,43	4,55	1,18
12	13	15	17	5,16	3,35	4,60	1,19
13	5	18	12	5,11	2,87	4,73	1,16
13	12	18	15	5,18	2,79	4,83	1,19
13	13	18	17	5,25	2,79	4,90	1,19
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil							
γ_{dry} (kN/m ³)		γ_{wet} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
9,5	5	15	12	6,39	4,40	5,47	1,05
9,5	12	15	15	6,35	4,38	5,44	1,09

9,5	13	15	17	6,13	4,19	5,26	1,11
12	5	15	12	5,97	4,33	5,10	1,06
12	12	15	15	5,84	4,01	5,08	1,07
12	13	15	17	5,74	3,91	5,01	1,12
13	5	18	12	5,66	3,40	5,19	1,09
13	12	18	15	5,51	3,17	5,09	1,12
13	13	18	17	5,51	3,14	5,11	1,13

7^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.7: Μεταβολή μέτρου παραμορφωσιμότητας στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς στο προσομοίωμα σταδιακών εκσκαφών χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
E _{ref} (kN/m ²)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης				
120.000	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,05	0,37	2,05	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,67	0,69	3,67	2,70
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,95	0,97	4,95	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		5,67	1,18	5,67	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,00	0,37	2,00	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,56	0,68	3,56	2,75
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,77	0,97	4,77	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		5,43	1,17	5,43	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,96	0,37	1,96	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,49	0,68	3,49	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,67	0,96	4,66	2,20
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		5,29	1,17	5,29	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,56	3,04	2,68
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,79	4,12	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,63	0,30	1,63	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,92	0,55	2,92	2,73
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,94	0,78	3,94	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,50	0,94	4,50	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,60	0,30	1,60	4,05

2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,85	0,55	2,85	2,73
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,83	0,77	3,83	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,36	0,94	4,35	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,33	0,23	1,33	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,40	0,42	2,40	2,68
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,29	0,60	3,29	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,82	0,72	3,82	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,27	0,23	1,27	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,29	0,42	2,29	2,74
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,10	0,59	3,10	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,58	0,71	3,58	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,24	0,22	1,24	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,22	0,41	2,22	2,73
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,99	0,58	2,99	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,43	0,71	3,43	1,94
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil				
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
E_{ref} (kN/m²)	E_{50^{ref}} (kN/m²)			
120.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,84	0,36	1,84	4,01
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,24	0,66	3,24	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,29	0,94	4,29	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,80	1,15	4,80	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
120.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,84	0,36	1,84	4,03
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,24	0,66	3,24	2,70
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,29	0,94	4,29	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,80	1,15	4,80	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
150.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,48	0,29	1,48	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,61	0,53	2,61	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,46	0,75	3,46	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,87	0,92	3,87	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
150.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,48	0,29	1,48	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,61	0,53	2,61	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,46	0,75	3,46	2,21
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,87	0,92	3,87	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,12	0,22	1,12	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,97	0,40	1,97	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,61	0,59	2,61	2,21

4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,93	0,70	2,93	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,12	0,22	1,12	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,97	0,40	1,97	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,59	2,61	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,93	0,70	2,93	1,94
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
E₅₀^{ref} (kN/m²)	E_{ref} (kN/m²)				
232.200	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,46	0,15	0,46	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,85	0,18	0,85	2,66
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,23	0,16	1,23	2,15
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,54	0,19	1,53	1,95
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
232.200	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,13	0,40	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,73	0,16	0,73	2,66
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,04	0,14	1,04	2,15
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,28	0,14	1,27	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
232.200	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,36	0,11	0,36	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,66	0,14	0,66	2,66
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,92	0,13	0,13	2,15
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,12	0,12	0,12	1,94
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
E₅₀^{ref} (kN/m²)	E₅₀^{ref} (kN/m²)				
232.200	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,01
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,09	0,40	2,73
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,52	0,09	0,52	2,22
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,09	0,59	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
232.200	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,03
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,09	0,40	2,70
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,52	0,09	0,52	2,17
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,09	0,59	1,94

8^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.8: Μεταβολή συνοχής στους τέσσερις τύπους συμπεριφοράς επίλυσης του προσομοιώματος σταδιακών εκσκαφών χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
C _{ref} (kN/m ²)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης				
150	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	3,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,55	3,04	2,11
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,78	4,12	1,71
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,75	0,95	4,74	1,61
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,99	1,76	3,99	2,99
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,46	1,66	2,46	2,07
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,73	1,72	0,98	1,91
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,77	1,77	0,38	1,64
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,99	1,76	3,99	2,98
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,46	1,66	2,46	2,08
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,73	1,72	0,98	1,91
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,77	1,77	0,38	1,68
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,99	1,74	3,99	3,52
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,46	1,64	2,46	2,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	1,68	0,98	1,77
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,73	1,72	0,28	1,67
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	3,57
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,55	3,04	2,41
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,79	4,12	2,03
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,80
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	3,50
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,55	3,04	2,39
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,79	4,12	2,15
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,83
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	3,99
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,55	3,04	2,48
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,79	4,12	1,83
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,72
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	

1 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,99	1,74	3,99	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,46	1,63	2,46	2,69
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,68	1,66	$976,46 \cdot 10^{-3}$	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,71	1,70	$275,28 \cdot 10^{-3}$	1,95
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
250	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,99	1,74	3,99	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,46	1,63	2,46	2,67
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,68	1,67	$976,46 \cdot 10^{-3}$	2,29
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,71	1,71	$275,28 \cdot 10^{-3}$	1,98
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,99	1,74	3,99	4,58
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,46	1,63	2,46	2,62
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,67	1,66	$976,44 \cdot 10^{-3}$	1,86
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,71	1,70	$275,72 \cdot 10^{-3}$	1,76
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,69	0,30	1,69	4,53
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,04	0,55	3,04	2,87
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,12	0,79	4,12	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,74	0,95	4,74	2,09
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,69	0,30	1,69	4,52
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,04	0,55	3,04	2,99
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,12	0,79	4,12	2,39
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,74	0,95	4,74	2,12
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,69	0,30	1,69	5,00
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,04	0,55	3,04	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,12	0,79	4,12	1,90
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,75	0,95	4,74	1,79
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,99	1,74	3,99	5,06
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,46	1,63	2,46	3,03
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,67	1,66	$976,66 \cdot 10^{-3}$	2,30
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,71	1,70	$274,94 \cdot 10^{-3}$	2,20
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,69	0,30	1,69	5,02
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,04	0,55	3,04	3,23
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,12	0,79	4,12	2,51
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	4,74	0,95	4,74	2,22
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil				
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)		
150	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,52	1,65	3,52	3,00
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,20	1,55	2,20	2,12

3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,58	1,57	961,43*10 ⁻³	1,76
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,68	1,67	429,97*10 ⁻³	1,60
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
150	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,29	1,48
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,46	0,75	3,45
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,93	3,87
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,28	1,48
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,60	0,53	2,60
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,44	0,75	3,44
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,85	0,92	3,85
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
250	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,29	1,48
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,45	0,75	3,45
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,92	3,87
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,29	1,48
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,44	0,75	3,44
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,85	0,92	3,85
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,29	1,48
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,45	0,75	3,45
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,92	3,87
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb				
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)		
200	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	0,84	2,14
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,70	0,66	1,70
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,19	0,68	1,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,68	0,70
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,45	0,15	0,45
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,83	0,18	0,83
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,15	1,20
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,52	0,19	1,51
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,45	0,15	0,45
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,83	0,18	0,83
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,15	1,20
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,52	0,19	1,51
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		

300	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,26	0,89	2,26	4,51
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,81	0,70	1,81	2,77
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,28	0,72	1,28	2,06
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,86	0,72	0,77	1,97
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,47	0,15	0,47	4,52
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,87	0,19	0,87	2,89
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,25	0,17	1,25	2,23
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,57	0,19	1,56	2,03
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,47	0,15	0,47	4,56
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,87	0,19	0,87	2,97
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,25	0,17	1,25	2,36
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,57	0,19	1,56	2,10
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
C_{ref} (kN/m²)	C_{ref} (kN/m²)				
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,70	0,76	1,70	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,47	0,63	1,47	2,49
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,19	0,63	1,19	1,81
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,90	0,63	0,90	1,73
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,06
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,39	0,08	0,39	2,61
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,51	0,09	0,51	2,02
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,48	0,09	0,48	1,93
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,24	0,06	0,24	4,57
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,41	0,09	0,41	2,87
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,54	0,09	0,54	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,61	0,10	0,61	2,09
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,24	0,06	0,24	4,58
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,42	0,09	0,42	2,95
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,55	0,10	0,55	2,42
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,62	0,09	0,62	2,10
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,44	0,06	0,44	5,09
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,09	0,43	2,87
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,56	0,10	0,56	2,11
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,63	0,09	0,63	2,00
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,25	0,07	0,25	5,07
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,09	0,43	3,15

3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,57	101,34*10 ⁻³	0,57	2,48
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,63	101,00*10 ⁻³	0,63	2,23

9^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.9: Μεταβολή μοναδιαίου ξηρού βάρους προσομοιώματος σταδιακών εκσκαφών στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς εδαφών χωρίς την παράμετρο της υδροφορίας.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
γ _{dry} (kN/m ³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης				
9,5	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,91	1,25	2,91	4,94
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,79	1,16	1,79	3,22
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,19	1,19	712,41*10 ⁻³	2,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,22	1,22	195,47*10 ⁻³	2,30
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,24	0,22	1,24	4,97
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,22	0,40	2,22	3,21
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,01	0,58	3,01	2,47
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,47	0,70	3,47	2,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,24	0,22	1,24	4,98
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,22	0,40	2,22	3,21
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,01	0,58	3,01	2,46
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,47	0,70	3,47	2,14
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,56	0,29	1,56	4,26
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,80	0,51	2,80	2,81
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,80	0,72	3,80	2,13
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,37	0,89	4,37	2,09
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,56	0,28	1,56	4,26
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,80	0,51	2,80	2,78
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,80	0,72	3,80	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,38	0,88	4,38	2,00
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,56	0,28	1,56	4,26
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,81	0,51	2,80	2,78
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,80	0,72	3,80	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,38	0,88	4,38	1,99
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,32	1,69	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,03	0,56	3,03	2,67
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,78	4,12	2,24

4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,93	4,74	2,02
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,56	3,04	2,66
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,78	4,12	2,19
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,95
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,69	0,30	1,69	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,04	0,55	3,04	2,66
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,12	0,78	4,12	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,74	0,95	4,74	1,93
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
γ_{dry} (kN/m³)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης				
9,5	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,08	0,22	1,08	4,99
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,91	0,39	1,91	3,23
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,53	0,55	2,53	2,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,84	0,67	2,84	2,31
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,09	0,21	1,09	4,96
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,91	0,39	1,91	3,22
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,53	0,55	2,53	2,47
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,84	0,68	2,84	2,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,09	0,21	1,09	4,96
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,92	0,39	1,92	3,21
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,53	0,55	2,53	2,47
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,84	0,69	2,84	2,14
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,37	0,28	1,37	4,27
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,40	0,49	2,40	2,84
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,19	0,70	3,19	2,34
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,58	0,84	3,58	2,09
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,37	0,26	1,37	4,24
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,41	0,49	2,41	2,83
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,20	0,70	3,20	2,28
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,58	0,86	3,58	2,00
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,37	0,26	1,37	4,24
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,41	0,49	2,41	2,85
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,20	0,70	3,20	2,27
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,57	0,86	3,57	1,98
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF

13	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,30	1,48	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,60	0,54	2,60	2,73
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,45	0,75	3,45	2,24
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,91	3,87	2,03
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,29	1,48	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61	2,72
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,46	0,75	3,46	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,92	3,87	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,48	0,28	1,48	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,61	0,53	2,61	2,71
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,46	0,75	3,46	2,21
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,87	0,93	3,87	1,93
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα γ_{dry} (kN/m³)	Λιγνίτης γ_{dry} (kN/m³)	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,35	0,12	0,35	4,98
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,66	0,15	0,65	3,21
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,94	0,14	0,94	2,55
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,18	0,14	1,17	2,32
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,35	0,11	0,35	4,92
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,65	0,14	0,65	3,21
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,93	0,12	0,93	2,46
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,16	0,13	1,16	2,17
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,35	0,11	0,35	4,94
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,65	0,14	0,65	3,16
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,93	0,12	0,93	2,45
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,16	0,13	1,16	2,15
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,15	0,43	4,25
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,19	0,80	2,81
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,16	0,17	1,15	2,28
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,46	0,18	1,45	2,09
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,14	0,43	4,21
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,17	0,80	2,77
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,15	0,15	1,15	2,23
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,43	0,17	1,42	2,00
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
12	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,14	0,43	4,20
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,17	0,80	2,77

3 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,15	0,15	1,15	2,23
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,43	0,17	1,42	1,98
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
13	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,46	0,16	0,46
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,85	0,20	0,85
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,24	0,18	1,24
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,56	0,20	1,55
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
13	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,46	0,15	0,46
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,85	0,18	0,85
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,23	0,16	1,23
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,54	0,19	1,53
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
13	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,46	0,15	0,46
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,85	0,18	0,85
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,23	0,16	1,23
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,54	0,18	1,53
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil				
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
γ_{dry} (kN/m³)	γ_{dry} (kN/m³)			SF
9,5	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,19	0,05	0,19
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,33	0,07	0,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,43	0,08	0,43
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,49	0,08	0,49
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
9,5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,19	0,05	0,19
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,32	0,07	0,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,42	0,07	0,42
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,48	0,07	0,48
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
9,5	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,19	0,05	0,19
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,32	0,07	0,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,42	0,07	0,42
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,48	0,07	0,48
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
12	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,22	0,06	0,22
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,38	0,09	0,38
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,50	0,09	0,50
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,08	0,59
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
12	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,22	0,06	0,22
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,38	0,08	0,38
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,50	0,09	0,50
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,08	0,59
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
				SF

12	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,22	0,06	0,22	4,25
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,38	0,08	0,38	2,83
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,50	0,09	0,50	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,56	0,08	0,56	1,98
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	5	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,04
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,09	0,40	2,71
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,53	0,09	0,53	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,60	0,09	0,60	2,02
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,05
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,09	0,40	2,71
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,52	0,09	0,52	2,25
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,09	0,59	1,94
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
13	13	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,06	0,23	4,06
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,40	0,09	0,40	2,70
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,52	0,09	0,52	2,18
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,59	0,09	0,59	1,93

10^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.10: Μεταβολή μέτρου παραμορφωσιμότητας του προσομοιώματος σταδιακών εκσκαφών στους τέσσερις τύπους συμπεριφοράς με υδροφορία.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
$E_{ref} (kN/m^2)$		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
120.000	50.000				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,47	0,88	1,42	3,83
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,59	1,72	2,52	2,35
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,45	2,70	3,27	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,09	3,40	3,74	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,43	0,88	1,38	3,83
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,51	1,71	2,45	2,34
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,35	2,67	3,15	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		4,02	3,38	3,60	1,40
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,41	0,88	1,36	3,83
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,47	1,70	2,40	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,28	2,65	3,08	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,98	3,36	3,51	1,41

Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,47	1,38	2,09	2,34
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,28	2,18	2,71	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,98	2,73	3,12	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,17	0,70	1,13	3,80
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,06	1,37	2,01	2,34
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,74	2,15	2,60	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,26	2,72	2,97	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,15	0,70	1,11	3,82
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,01	1,37	1,96	2,35
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,68	2,14	2,53	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,22	2,70	2,88	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200.000	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,95	0,54	0,92	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,68	1,04	1,65	2,35
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,25	1,65	2,16	1,58
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,60	2,06	2,50	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200.000	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,91	0,53	0,88	3,80
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,61	1,04	1,57	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,63	2,04	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,51	2,05	2,35	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200.000	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,89	0,53	0,86	3,82
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,56	1,03	1,52	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,08	1,62	1,97	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,46	2,04	2,26	1,41
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα E _{ref} (kN/m ²)	Λιγνίτης E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,32	0,84	1,28	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,31	1,63	2,23	2,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,14	2,54	2,83	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,84	3,32	3,23	1,40
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
120.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,32	0,84	1,28	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,31	1,63	2,23	2,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,14	2,54	2,83	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,84	3,31	3,22	1,40
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,68	1,03	3,79

2 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,86	1,32	1,80	2,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	2,55	2,05	2,28	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	3,08	2,65	2,59	1,40
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
150.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,68	1,03
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,86	1,32	1,80
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,55	2,05	2,28
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,08	2,64	2,59
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,51	0,78
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,41	1,00	1,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,94	1,55	1,74
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,33	1,99	196
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
200.000	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,51	0,78
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,41	1,00	1,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,93	1,55	1,74
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,33	1,99	196
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb				
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
E_{50 ref} (kN/m²)	E_{ref} (kN/m²)			
232.200	50.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,38	0,15	0,38
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,67	0,35	0,67
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,94	0,71	0,92
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,18	0,90	1,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
232.200	65.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,34	0,15	0,33
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,60	0,34	0,60
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,85	0,67	0,80
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,01	0,83	0,99
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
232.200	80.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,31	0,15	0,31
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,55	0,33	0,55
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,80	0,64	0,73
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,96	0,81	0,89
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil				
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
E_{50 ref} (kN/m²)	E_{50 ref} (kN/m²)			
232.200	69.614	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,14	0,22
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,39	0,30	0,39
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,68	0,60	0,48
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,92	0,83	0,58
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
232.200	75.000	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,23	0,14	0,22
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,39	0,30	0,39

3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,68	0,60	0,48	1,60
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,91	0,83	0,58	1,42

11^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.11: Μεταβολή συνοχής προσομοιώματος σταδιακών εκσκαφών στους τέσσερις συνδυασμούς τύπων συμπεριφοράς με υδροφορία.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
C _{ref} (kN/m ²)		Μετατοπίσεις (m)			SF
Μάργα	Λιγνίτης				
150	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	2,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,39	2,09	1,88
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,00	2,41	2,73	1,31
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,62	3,07	3,16	1,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	2,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,39	2,09	1,99
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,98	2,41	2,73	1,35
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,58	3,07	3,15	1,18
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	2,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,39	2,09	2,07
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,98	2,41	2,73	1,41
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,64	3,10	3,16	1,18
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,34
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	1,97
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,99	2,28	2,72	1,38
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,56	2,88	3,13	1,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,34
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,18
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,89	2,27	2,72	1,47
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,42	2,87	3,13	1,29
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,35
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,77
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,89	2,27	2,72	1,53
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,42	2,87	3,13	1,33
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,63
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,03
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,97	2,19	2,72	1,40

4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,34	2,75	3,12	1,38
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,85	2,18	2,71	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,34	2,73	3,12	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,43
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,85	2,18	2,71	1,65
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,34	2,73	3,12	1,43
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,83
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,12
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,94	2,13	2,71	1,43
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,46	2,65	3,11	1,48
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	4,17
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,46
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,84	2,12	2,71	1,72
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,27	2,63	3,11	1,51
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
300	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	4,19
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,60
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,84	2,12	2,71	1,76
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,27	2,63	3,11	1,53
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,21	0,71	1,17	3,99
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,14	1,38	2,09	2,20
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,90	2,13	2,71	1,43
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,41	2,59	3,11	1,59
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,30	0,23	1,30	5,69
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,10	0,38	2,10	3,50
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,74	0,52	2,74	2,76
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,10	0,62	3,10	2,70
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	300	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,30	0,23	1,30	5,70
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,10	0,38	2,10	3,97
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,74	0,52	2,74	3,15
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,10	0,62	3,10	2,75
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF

150	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,67	1,02	2,91
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,85	1,31	1,79	1,90
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,73	2,27	2,30	1,26
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,38	3,00	2,64	1,16
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
150	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,68	1,03	2,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,86	1,32	1,80	1,99
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,68	2,25	2,30	1,33
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		3,40	3,00	2,64	1,18
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,67	1,02	3,65
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,85	1,31	1,79	2,04
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,66	2,23	2,29	1,41
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,23	2,58	2,62	1,38
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
250	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,67	1,03	3,79
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,86	1,32	1,80	2,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,55	2,05	2,28	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,10	2,66	2,60	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,67	1,02	3,96
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,85	1,31	1,79	2,11
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,50	2,03	2,20	1,55
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,10	2,60	2,50	1,40
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
350	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,06	0,67	1,03	4,40
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,86	1,32	1,80	2,52
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,50	2,02	2,20	1,63
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		2,08	2,55	2,53	1,45
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb					
Μάργα C_{ref} (kN/m²)	Λιγνίτης C_{ref} (kN/m²)	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,37	0,15	0,36	3,36
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,66	0,36	0,65	2,11
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,96	0,75	0,91	1,46
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,18	0,97	1,16	1,29
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,37	0,15	0,36	3,31
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,66	0,36	0,65	2,15
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,96	0,75	0,91	1,49
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,18	0,98	1,16	1,31
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)			SF
200	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,37	0,15	0,36	3,36
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,66	0,36	0,65	2,19

3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,96	0,75	0,91	1,52
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,18	0,98	1,16	1,29
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,38	0,16	0,38	4,02
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,69	0,36	0,69	2,26
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,97	0,72	0,94	1,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,91	1,19	1,51
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,38	0,16	0,38	4,13
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,69	0,36	0,69	2,45
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,96	0,72	0,94	1,71
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,91	1,19	1,52
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,38	0,16	0,38	4,18
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,69	0,36	0,69	2,52
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,96	0,72	0,94	1,70
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,91	1,19	1,53
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil				
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
C_{ref} (kN/m²)	C_{ref} (kN/m²)			
250	100	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,38	0,16	0,37	3,60
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,68	0,37	0,67	2,03
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,97	0,74	0,93	1,39
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,23	0,97	1,21	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
250	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,38	0,16	0,37	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,68	0,37	0,67	2,20
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,97	0,74	0,93	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,97	1,18	1,41
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	200	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,39	0,17	0,38	4,19
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,69	0,36	0,69	2,45
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,96	0,72	0,94	1,71
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,91	1,19	1,52
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
300	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,39	0,16	0,38	4,28
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,69	0,36	0,69	2,52
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,96	0,72	0,94	1,71
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,20	0,91	1,19	1,53
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
350	150	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες
1 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,39	0,16	0,39	4,20
2 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,70	0,38	0,70	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής	0,98	0,73	0,96	1,64
4 ^ο στάδιο εκσκαφής	1,21	0,90	1,20	1,60
Μάργα	Λιγνίτης	Μετατοπίσεις (m)		
				SF

350	250	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,46	0,14	0,46	5,74
2 ^ο στάδιο εκσκαφής		0,76	0,16	0,76	3,71
3 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,03	0,15	1,03	3,01
4 ^ο στάδιο εκσκαφής		1,22	0,16	1,22	2,72

12^η ομάδα ιδιοτήτων

Πίνακας Α.12:Μεταβολή μοναδιαίου ξηρού και υγρού μοναδιαίου φαινομένου
βάρους προσομοιώματος σταδιακών εκσκαφών.

Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Mohr-Coulomb										
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
(kN/m³)										
Y _{dry}	Y _{wet}	Y _{dry}	Y _{wet}	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
9,5	15	5	12							
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,84	0,65	0,78	4,34
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,49	1,29	1,38	2,43
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,40	2,19	1,78	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,95	2,80	2,06	1,36			
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
9,5	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,85	0,65	0,78	4,25
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,49	1,29	1,38	2,41
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,39	2,19	1,78	1,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,90	2,77	2,06	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
9,5	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,85	0,65	0,77	4,13
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,49	1,29	1,38	2,40
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,40	2,19	1,78	1,62
4 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,91	2,77	2,04	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
12	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,88	0,65	0,81	3,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,51	1,29	1,41	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,39	2,17	1,76	1,53
4 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,95	2,77	2,05	1,36
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
12	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,88	0,66	0,81	3,93
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,51	1,30	1,41	2,35
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,39	2,18	1,75	1,60
4 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,95	2,76	2,00	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF			
12	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες				
1 ^ο στάδιο εκσκαφής							0,88	0,65	0,81	3,92
2 ^ο στάδιο εκσκαφής							1,51	1,30	1,41	2,34
3 ^ο στάδιο εκσκαφής							2,40	2,18	1,75	1,61

4° στάδιο εκσκαφής				2,92	2,75	2,01	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				1,21	0,71	1,17	3,79
2° στάδιο εκσκαφής				2,14	1,38	2,08	2,37
3° στάδιο εκσκαφής				2,84	2,15	2,72	1,52
4° στάδιο εκσκαφής				3,32	2,71	3,13	1,40
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				1,21	0,71	1,17	3,77
2° στάδιο εκσκαφής				2,14	1,39	2,09	2,34
3° στάδιο εκσκαφής				2,84	2,18	2,71	1,57
4° στάδιο εκσκαφής				3,29	2,74	3,11	1,42
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				1,21	0,71	1,17	3,77
2° στάδιο εκσκαφής				2,14	1,38	2,09	2,34
3° στάδιο εκσκαφής				2,84	2,18	2,71	1,57
4° στάδιο εκσκαφής				3,32	2,74	3,11	1,41
Μάργα Mohr-Coulomb – Λιγνίτης Hardening Soil							
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
(kN/m³)							
Ydry	Ywet	Ydry	Ywet				
9,5	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				0,76	0,62	0,69	4,29
2° στάδιο εκσκαφής				1,34	1,23	1,20	2,41
3° στάδιο εκσκαφής				2,19	2,07	1,52	1,55
4° στάδιο εκσκαφής				2,84	2,74	1,76	1,36
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				0,76	0,62	0,69	4,20
2° στάδιο εκσκαφής				1,34	1,23	1,20	2,38
3° στάδιο εκσκαφής				2,18	2,07	1,52	1,61
4° στάδιο εκσκαφής				2,76	2,69	1,74	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				0,76	0,62	0,69	4,10
2° στάδιο εκσκαφής				1,34	1,23	1,20	2,38
3° στάδιο εκσκαφής				2,19	2,07	1,51	1,62
4° στάδιο εκσκαφής				2,76	2,67	1,73	1,40
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				0,79	0,63	0,71	3,91
2° στάδιο εκσκαφής				1,35	1,23	1,22	2,35
3° στάδιο εκσκαφής				2,19	2,05	1,50	1,54
4° στάδιο εκσκαφής				2,81	2,68	1,74	1,35
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1° στάδιο εκσκαφής				0,79	0,63	0,71	3,92
2° στάδιο εκσκαφής				1,35	1,24	1,22	2,32
3° στάδιο εκσκαφής				2,18	2,06	1,49	1,57
4° στάδιο εκσκαφής				2,77	2,69	1,68	1,38

Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,79	0,63	0,71	3,89
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,35	1,24	1,22	2,32
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,18	2,06	1,49	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,78	2,68	1,70	1,38
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,06	0,68	1,02	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,86	1,32	1,79	2,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,55	2,04	2,28	1,52
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				3,11	2,65	2,61	1,38
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,06	0,68	1,03	3,76
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,86	1,32	1,80	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,54	2,06	2,28	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				3,05	2,65	2,59	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,06	0,68	1,03	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,86	1,32	1,80	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				2,54	2,05	2,28	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				3,07	2,65	2,59	1,41
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Mohr-Coulomb							
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
(kN/m ³)							
Y _{dry}	Y _{wet}	Y _{dry}	Y _{wet}				
9,5	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,27	0,17	0,26	4,28
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,48	0,41	0,47	2,40
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,97	0,92	0,69	1,58
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,34	1,27	0,83	1,37
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,27	0,17	0,26	4,21
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,47	0,41	0,46	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,94	0,90	0,67	1,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,26	1,22	0,85	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,27	0,17	0,26	4,11
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,47	0,41	0,46	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,92	0,90	0,66	1,62
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,21	1,17	0,83	1,41
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,28	0,17	0,27	3,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,48	0,41	0,47	2,35
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,97	0,93	0,86	1,54
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,34	1,27	0,94	1,36
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF

12	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,28	0,17	0,27	3,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,48	0,42	0,47	2,34
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,94	0,91	0,66	1,59
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,23	1,20	0,85	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,28	0,17	0,27	3,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,48	0,42	0,47	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,92	0,89	0,65	1,62
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,24	1,21	0,86	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,38	0,15	0,38	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,68	0,35	0,78	2,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,99	0,75	0,95	1,53
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,25	0,98	1,23	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,38	0,16	0,37	3,76
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,68	0,37	0,67	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,97	0,74	0,93	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,17	0,94	1,16	1,42
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,38	0,15	0,37	3,76
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,68	0,37	0,67	2,33
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,96	0,74	0,93	1,58
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,19	0,96	1,17	1,42
Μάργα Hardening Soil – Λιγνίτης Hardening Soil							
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
(kN/m³)							
Υdry	Υwet	Υdry	Υwet				
9,5	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,18	4,30
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,37	0,36	0,29	2,42
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,81	0,80	0,42	1,57
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,24	1,23	0,71	1,37
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,17	4,22
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,37	0,37	0,39	2,40
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,77	0,77	0,45	1,61
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,19	1,18	0,75	1,40
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
9,5	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,16	4,12
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,36	0,36	0,28	2,39
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,77	0,77	0,44	1,63
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,14	1,13	0,72	1,40

Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,17	3,90
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,37	0,37	0,29	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,80	0,80	0,45	1,52
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,22	1,21	0,70	1,36
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,17	3,94
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,37	0,37	0,29	2,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,77	0,37	0,46	1,59
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,16	1,14	0,72	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
12	15	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,19	0,16	0,17	3,93
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,36	0,36	0,29	2,36
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,77	0,77	0,46	1,60
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,13	1,11	0,72	1,39
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	5	12	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,24	0,15	0,23	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,40	0,30	0,39	2,38
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,74	0,64	0,50	1,55
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				1,01	0,92	0,65	1,40
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	12	15	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,24	0,15	0,23	3,80
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,40	0,30	0,39	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,71	0,63	0,49	1,56
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,96	0,89	0,59	1,43
Μάργα		Λιγνίτης		Μετατοπίσεις (m)			SF
13	18	13	17	Ολικές	Οριζόντιες	Κατακόρυφες	
1 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,23	0,15	0,23	3,77
2 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,39	0,30	0,39	2,37
3 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,70	0,62	0,49	1,52
4 ^ο στάδιο εκσκαφής				0,94	0,87	0,58	1,43