



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΕΙΡΗΝΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Δ. ΜΟΝΟΠΩΛΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ
Αν. Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2003

αφιερώνεται

*στη μητέρα μου Χρυσάνθη,
στον αδερφό μου Βασίλη,
στη Τζένη και στον Κώστα*

***ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΕΙΡΗΝΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ***

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ***

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Δ. ΜΟΝΟΠΩΛΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ

Αν. Καθηγητής Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2003

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της “Περιβαλλοντικής Γεωτεχνολογίας” και έχει θέμα: “Παραμετρική ανάλυση ευσταθείας πρανών με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων”.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο καθορισμός της διαδικασίας μοντελοποίησης προβλημάτων ευστάθειας πρανών για την εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειάς τους. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Plaxis (Version 7.0), το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις. Για το λόγο αυτό, έγινε μια απλή προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας εδαφικών πρανών με την κατασκευή ενός θεωρητικού μοντέλου και διαδοχικών επιμέρους επιλύσεων ίδιας εξωτερικής γεωμετρίας, αλλά με διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των υλικών και στην εσωτερική γεωμετρία τους.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίθηκαν έπειτα με τα αποτελέσματα της επίλυσης του αντίστοιχου μοντέλου με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Η διαδικασία επίλυσης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας περιγράφεται σε σχετική ενότητα και προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Δεδομένου του καθορισμού της διαδικασίας επίλυσης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα με το λογισμικό πακέτο Plaxis, πραγματοποιήθηκαν επίσης κάποιες πιο σύνθετες επιλύσεις μοντέλων εδαφικών πρανών και προέκυψαν σχετικά συμπεράσματα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση ορισμένων προσώπων του ιδρύματος τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Επιβλέποντα της παρούσας εργασίας Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Διονύσιο Μονόπωλη, για την ανάθεση του θέματος και την αξιολόγηση της εργασίας.

Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, για την συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε καθώς και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τον Επιστημονικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Εμμανουήλ Στειακάκη για τη συμβολή του στην εκμάθηση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε καθώς και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του πάνω στο κείμενο και στα αποτελέσματα. Τον κ. Χρυσάνθο Στειακάκη για τη συμβολή του στον προβληματισμό και τη βοήθειά του στην αντιμετώπιση του προβλήματος με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και συνεργάτη μου κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο για την υπομονή που έδειξε καθώς και την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Την μητέρα μου Χρυσάνθη και τον αδερφό μου Βασίλη που με στήριξαν ψυχολογικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Την Τζένη και τον Κώστα, χωρίς τη βοήθεια των οποίων οι μεταπτυχιακές σπουδές θα ήταν απλά ένα όνειρο και τέλος τον Χρίστο, για την υπομονή του, το άγχος του και τις ατέλειωτες ώρες που σπατάλησε στο γραφείο Β 1.3 μαζί μου μέχρι να «τρέξουν» τα μοντέλα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
----------------------	----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ.....	4
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	4
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	5
2.3 ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	6
2.3.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	6
Ένας όγκος / Ένα επίπεδο ολίσθησης.....	8
Ένας όγκος / Κλιμακωτά επίπεδα ολίσθησης.....	8
Πολλαπλοί όγκοι / Πολλαπλά επίπεδα ολίσθησης.....	8
Απλή σφήνα / Δύο τεμνόμενα επίπεδα.....	9
Απλή σφήνα / Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα.....	9
Πολλαπλές σφήνες / Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα.....	9
Ένας όγκος / Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης.....	9
2.3.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ.....	9
2.3.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑΒΥΘΙΣΗΣ.....	10
2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ.....	10
2.4.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ.....	11
Διάβρωση.....	11
Υπόγεια νερά.....	12
Θερμοκρασία.....	12
Τασική κατάσταση.....	13
Σεισμοί.....	13
Γεωλογικά χαρακτηριστικά πρανούς.....	13
2.4.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ.....	14
Εξωτερικά αίτια.....	14
Κατασκευαστικές δραστηριότητες.....	14
Απότομη ταπείνωση στάθμης δεξαμενής.....	14
2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	17
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	17
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	18
3.2.1 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	18
Ανάλυση πρανών μεγάλου μήκους (Απειροστική ανάλυση).....	19
Ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους.....	20

<i>Μέθοδος $\Phi u = 0$</i>	21
<i>Σουηδική μέθοδος</i>	22
3.2.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ.....	23
<i>Μέθοδος Bishop</i>	24
<i>Μέθοδος Janbu</i>	26
<i>Μέθοδος Spencer</i>	28
<i>Μέθοδος Morgenstern and Price</i>	30
3.3 ΈΚΦΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΣΩ	
ΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	33
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	33
4.2.1 ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ.....	34
4.2.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	36
4.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ	37
4.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.....	37
4.3.2 ΕΙΔΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	38
4.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΛΙΟΥ.....	39
4.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	40
4.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	44
4.6 ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	47
4.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ...	49
4.7.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG.....	50
4.7.2 ΛΟΓΟΣ POISSON.....	50
4.7.3 ΣΥΝΟΧΗ.....	51
4.7.4 ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	52
4.7.5 ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	52
4.8 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	53
4.9 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ	54
4.9.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ MOHR – COULOMB.....	55
4.9.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ TRESCA (ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ).....	57
4.9.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ VON MISES.....	59
4.9.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ DRUCKER – PRAGER.....	60
4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ	
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	62
4.10.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	63
4.10.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΗ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΟΥ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ	
ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΗΣ ΕΝΣΤΡΩΣΗΣ.....	64

4.10.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΟΥ ΕΔΡΑΖΕΤΑΙ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΣ ΕΔΑΦΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PLAXIS.....	70
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	70
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	71
5.2.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	71
<i>Γενικές ρυθμίσεις</i>	71
<i>Τύποι στοιχείων</i>	72
<i>Βαρύτητα και επιτάχυνση της βαρύτητας</i>	72
<i>Μονάδες</i>	73
<i>Διαστάσεις</i>	73
<i>Κάνναβος</i>	73
5.2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	73
5.2.3 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	74
<i>Προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις</i>	75
<i>Μηδενικές μετατοπίσεις</i>	75
<i>Φορτίσεις</i>	76
5.2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	76
<i>Μοντέλα εδαφικής συμπεριφοράς</i>	76
<i>Ιδιότητες υλικών</i>	77
5.2.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	86
<i>Ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων</i>	87
<i>Ολική πύκνωση</i>	88
<i>Τοπική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων</i>	88
<i>Τοπική πύκνωση</i>	88
<i>Προτεινόμενη τακτική δημιουργίας δικτυώματος στοιχείων</i>	88
5.2.6 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	89
<i>Υδρολογικές συνθήκες</i>	89
<i>Προσδιορισμός αρχικής γεωμετρίας</i>	91
5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	92
5.3.1 ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΜΙΑ ΝΕΑ ΦΑΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	92
<i>Γενικές ρυθμίσεις</i>	93
<i>Παράμετροι υπολογισμών</i>	97
5.3.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	108
5.3.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	108
<i>Αριθμός βήματος και επανάληψη</i>	108
<i>Συνολικό σφάλμα</i>	109
<i>Ανεκτικότητα</i>	109
<i>Σημεία αστοχίας</i>	109

<i>Σημεία αστοχίας διεπιφανειών.....</i>	109
<i>Ανακριβή τασικά σημεία.....</i>	110
<i>Ανεκτός αριθμός ανακριβών τασικών σημείων.....</i>	110
<i>Σημεία εφελκυσμού.....</i>	110
<i>Σημεία Cap/Hard.....</i>	110
<i>Σημεία Apex.....</i>	110
5.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	111
5.4.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ.....	112
<i>Παραμορφωμένο δικτύωμα στοιχείων.....</i>	112
<i>Συνολικές μετατοπίσεις.....</i>	112
<i>Συνολικές παραμορφώσεις.....</i>	112
5.4.2 ΤΑΣΕΙΣ.....	113
<i>Ενεργές τάσεις.....</i>	113
<i>Συνολικές τάσεις.....</i>	114
<i>Σημεία αστοχίας.....</i>	114
<i>Ενεργή πίεση πόρων.....</i>	114
<i>Υπερπίεση των πόρων.....</i>	115
5.4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.....	115
5.4.4 ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	115
<i>Πίνακες μετατοπίσεων.....</i>	115
<i>Πίνακες τάσεων και παραμορφώσεων.....</i>	115
5.4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ.....	116
5.5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΩΝ.....	116
5.5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ.....	116
<i>Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης.....</i>	117
<i>Καμπύλες χρόνου – μετατόπισης.....</i>	118
<i>Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης.....</i>	118
<i>Τασικές διαδρομές και διαδρομές παραμορφώσεων.....</i>	119
5.5.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ.....	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....

6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	120
6.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	122
6.2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ.....	122
6.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	123
6.2.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	124
6.2.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	124
<i>Υπερκείμενος ψαμμίτης.....</i>	125

<i>Αργίλος</i>	127
<i>Υποκείμενος ψαμμίτης</i>	128
6.2.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ	129
6.2.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	129
6.2.7 ΕΠΙΛΥΣΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	132
6.2.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PLAXIS	136
<i>Περίπτωση 1^η</i>	137
<i>Περίπτωση 2^η</i>	139
<i>Περίπτωση 3^η</i>	141
6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ PLAXIS	143
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	144
6.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ	145
6.5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΦΗΝΑΣ	146
<i>Περίπτωση 1^η</i>	147
<i>Περίπτωση 2^η</i>	148
<i>Περίπτωση 3^η</i>	149
6.5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	150
6.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ	152
6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	152
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ	159
7.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΤΙ ΛΕΠΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΡΓΙΛΟΥ	160
7.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η	160
7.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η	162
7.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3^η	164
7.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4^η	165
7.1.5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5^η	166
7.1.6 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6^η	167
7.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΠΟΥ ΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΑΝ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	168
7.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΟΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΣΥΝΟΧΗ & ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ	169
7.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η	169
7.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η	171
7.4 ΕΛΔΑΦΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΛΕΠΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ	172
7.4.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η	173
7.4.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η	174

7.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	180
8.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΌΣΟ ΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS.....	180
8.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΌΣΟ ΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	181
8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	182
8.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ.....	188
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	193
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	195

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας παρουσιάζει ποικίλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά όχι μόνο λόγω της διαδικασίας διάβρωσης των πετρωμάτων και ενός πλήθους άλλων παραγόντων αλλά και λόγω του ότι η διατμητική αντοχή των εδαφών και των πετρωμάτων υπερβαίνει τις διατμητικές τάσεις που επιβάλλονται λόγω βαρύτητας ή φόρτισης σε αυτά. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες εδαφικών πρανών, τα φυσικά και τα τεχνητά. Τα φυσικά πρανά εμφανίζονται στη φύση με τη μορφή μιας κεκλιμένης εδαφικής μάζας η οποία είναι συνήθως κάποια πλαγιά λόφου ή όχθη ποταμού ή λίμνης. Τα τεχνητά πρανά δημιουργούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες και προέρχονται συνήθως είτε από εκσκαφές, είτε από επιχωματώσεις.

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 για την εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειάς τους, με ταυτόχρονη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση ευστάθειας με τη επίλυση διαφόρων εναλλακτικών περιπτώσεων εδαφικού προτύπου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ουσιαστικά πραγματοποιήθηκε μια απλή προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας εδαφικών πρανών με την κατασκευή μιας σειράς θεωρητικών επιλύσεων ίδιας εξωτερικής γεωμετρίας, αλλά με διαφοροποιήσεις στις

ιδιότητες των υλικών και στην εσωτερική γεωμετρία τους. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Plaxis (Version 7.0), το οποίο επιλύει γεωτεχνικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ακολουθεί περιγραφή της διάρθρωσης της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια αναφορά στο πρόβλημα της ευστάθειας πρανών και μια ιστορική αναδρομή όσο αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος της ευστάθειας. Περιγράφονται οι τύποι αστοχίας πρανών καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια. Τέλος αναφέρεται εν συντομία η διαδικασία ανάλυσης της ευστάθειας, η οποία καθορίζει κάτω από ποιες συνθήκες ένα συγκεκριμένο πρανές θα μείνει σταθερό.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης οριακής ισορροπίας, οι οποίες διαχωρίζονται σε γραμμικές (με επίλυση εξισώσεων α' βαθμού με μονοσήμαντη τιμή του αγνώστου) και μη γραμμικές (η επίλυση των οποίων ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία) μεθόδους. Στο ίδιο κεφάλαιο εξετάζεται η εγκυρότητα έκφρασης της ευστάθειας ενός εδαφικού πρανούς μέσω ενός συντελεστή ασφάλειας που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου οριακής ισορροπίας.

Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στη περιγραφή της θεωρίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφει κάποια από τα σημαντικότερα κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται κάποια παραδείγματα εφαρμογών από τη βιβλιογραφία, της ανάλυσης ευστάθειας εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 5^ο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου Plaxis, μέρος των οποίων χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης του εδαφικού προτύπου που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση. Η διαδικασία προσομοίωσης και επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα της επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται έπειτα με τις αντίστοιχες επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Η διαδικασία επίλυσης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας περιγράφεται σε σχετική ενότητα του κεφαλαίου αυτού και προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Δεδομένου του καθορισμού της διαδικασίας επίλυσης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Plaxis, πραγματοποιήθηκαν κάποιες επιπλέον επιλύσεις μοντέλων εδαφικών πρανών με πιο σύνθετη γεωμετρία και με τη χρήση κάποιων χαρακτηριστικών του λογισμικού που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί κατά την παραμετρική ανάλυση. Στο Κεφάλαιο 7 λοιπόν περιγράφονται τα μοντέλα αυτά καθώς και τα αποτελέσματα της επίλυσής τους.

Στο 8^ο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αυτής, αναφέρονται κάποιες παρατηρήσεις που έγιναν κατά την επίλυση των εναλλακτικών περιπτώσεων του εδαφικού προτύπου με τις δύο μεθόδους. Επίσης αναφέρονται κάποια σχόλια για τις επιπλέον επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 7 και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα σχετικά με την προσέγγιση του προβλήματος της ευστάθειας εδαφικών πρανών με τις δύο αυτές μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ****2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Εκτός από τη διαδικασία της διάβρωσης των πετρωμάτων καθώς και ενός μεγάλου πλήθους άλλων παραγόντων, τα ποικίλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου της γήινης επιφάνειας είναι αποτέλεσμα του ότι η διατμητική αντοχή των εδαφών και των πετρωμάτων υπερβαίνει τις διατμητικές τάσεις που επιβάλλονται λόγω βαρύτητας ή φόρτισης σε αυτά.

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

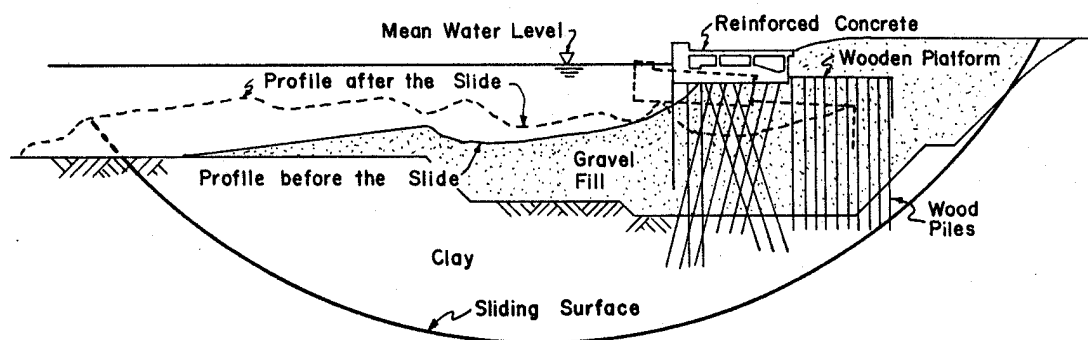
Στη μεταλλευτική δραστηριότητα, ο κύριος στόχος κατά την εκσκαφή είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου της εδαφικής μάζας προς απομάκρυνση από το πεδίο, με σκοπό την οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση. Με βάση λοιπόν τους παράγοντες κόστος και ασφάλεια, επιλέγεται η μέγιστη κλίση του πρανούς η οποία θα εξασφαλίζει τη σταθερότητά του.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή σχετικά με την ανάπτυξη των μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας πρανών στο πέρασμα των ετών. Η εξασφάλιση της σταθερότητας ενός εδαφικού πρανούς, προϋποθέτει την πρόβλεψη

του πιθανού τύπου αστοχίας που αυτό μπορεί να έχει. Έτσι, περιγράφονται οι τύποι αστοχίας που συνήθως παρουσιάζουν τα πρηνή καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθειά τους. Επίσης παρουσιάζεται συνοπτικά η ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρανών και γίνεται αναφορά στον συντελεστή ασφάλειας και στις μεθόδους επίλυσης που θα χρησιμοποιηθούν και στην παρούσα εργασία.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ανάπτυξη των μεθόδων οριακής ισορροπίας που βασίζονται στην πλαστική ισορροπία, ξεκίνησε από τη Σουηδία το 1916, έπειτα από αστοχία μιας σειράς από τοίχους αντιστήριξης σε αποβάθρα του λιμανιού του Gothenburg. Οι Peterson (1955) και Hultin (1916) ανέφεραν, σε διαφορετικές δημοσιεύσεις ο καθένας, ότι οι επιφάνειες αστοχίας στη μαλακή άργιλο του λιμανιού του Gothenburg προσομοιάζονται με κυκλικά τόξα (Σχήμα 2.1) (Dunn et al, 1980). Τα χρόνια που ακολούθησαν επινοήθηκε μια νέα μέθοδος ανάλυσης, η μέθοδος ολίσθησης κύκλου, ενώ άρχισαν να χρησιμοποιούνται με σχετική επιτυχία στην πρόβλεψη της ευστάθειας αποτελέσματα από απλές δοκιμές διάτμησης χωρίς αποστράγγιση. Έτσι παρουσιάστηκε η μέθοδος των λωρίδων από το Fellenius το 1927 και το 1936 (Dunn et al, 1980).



Σχήμα 2.1: Η επιφάνεια ολίσθησης της αποβάθρας του Stigberg, 1916, στο λιμάνι του Gothenborg, (Pettersson, 1955) (Πηγή: Dunn et al, 1980).

Η ιδέα της πίεσης των πόρων και της μεθόδου ανάλυσης της ενεργής τάσης παρουσιάστηκε από τον Terzaghi το 1936. Αναπτύχθηκαν επίσης καλύτερες μέθοδοι δειγματοληψίας εδάφους με αποτέλεσμα να προκύπτουν πλέον πιο αξιόπιστες μετρήσεις της αντοχής του. Παράλληλα αναπτύχθηκε η τριαξονική δοκιμή θλίψης από όπου βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα όσο αφορά την αντοχή σε διάτμηση και η

μέτρηση της πίεσης των πόρων. Ξεκινώντας από τον Bishop (1955) εξελίχθηκαν οι μέθοδοι ανάλυσης που περιλαμβάνουν τις πλευρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων. Σήμερα, με την ευρεία διάδοση της χρήσης ψηφιακών υπολογιστών είναι πλέον διαθέσιμες αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων ευστάθειας πρανών, όπως είναι για παράδειγμα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Dunn et al, 1980).

Παρόλα αυτά, αν και αναπτύχθηκαν πιο αυστηρές μέθοδοι ανάλυσης και βελτιωμένες τεχνικές δοκιμών στα εδάφη, παραμένουν αρκετά κενά στην πρόβλεψη της ευστάθειας των πρανών. Τα κενά αυτά, συνδέονται κυρίως με τη μέτρηση της αντοχής του εδάφους και την πρόβλεψη της πίεσης των πόρων (Dunn et al, 1980).

2.3 ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

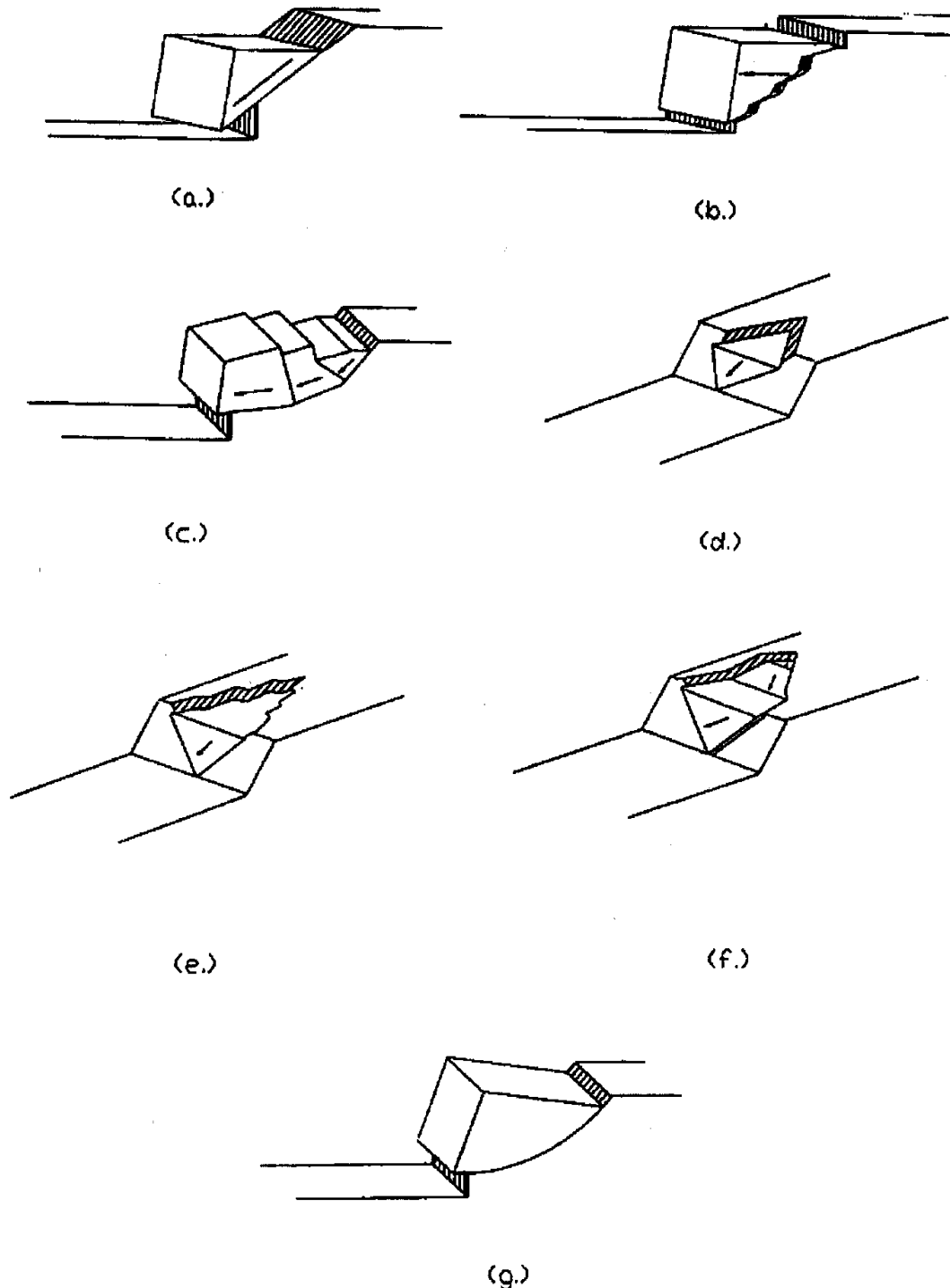
Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια αναφορά γενικά στους τύπους αστοχίας οι οποίοι δύναται να εμφανιστούν σε βραχώδη ή εδαφικά πρανή. Λόγω της γεωμετρίας τους, τα πρανή έχουν δύο ή τρεις ελεύθερες επιφάνειες. Έτσι, ετερογενείς όγκοι που περιέχονται μέσα στην κύρια μάζα του υλικού, δημιουργούν σχετικά υψηλή 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: ολίσθησης, κατάπτωσης και καταβύθισης. Καθένας από τους τύπους αυτούς μπορεί να περιγραφεί με έναν ή παραπάνω μηχανισμό αστοχίας (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει επτά διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας που μπορούν να χαρακτηριστούν ως αστοχία ολίσθησης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι οι πιο αντιπροσωπευτικοί στην κατηγορία αυτή, χωρίς βεβαίως να αποκλείεται η εμφάνιση κάποιου

άλλου. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των συνθηκών κάτω από τις οποίες εμφανίζεται καθένας από τους μηχανισμούς αστοχίας ολίσθησης (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).



Σχήμα 2.2: Τύποι αστοχίας για την περίπτωση της αστοχίας ολίσθησης: α) ένας όγκος/ένα επίπεδο ολίσθησης, β) ένας όγκος/κλιμακωτά επίπεδα ολίσθησης, γ) πολλαπλοί όγκοι/πολλαπλά επίπεδα ολίσθησης, δ) απλή σφήνα/δύο τεμνόμενα επίπεδα, ε) απλή σφήνα/πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα, ς) πολλαπλές σφήνες/πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα, ζ) ένας όγκος/κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Ένας όγκος / Ένα επίπεδο ολίσθησης

Ο απλούστερος μηχανισμός αστοχίας ολίσθησης αναφέρεται σε έναν όγκο υλικού που ολισθαίνει πάνω σε ένα και μοναδικό επίπεδο (Σχήμα 2.2α). Ο μηχανισμός αυτός είναι πιθανός σε περιπτώσεις όπου μια τουλάχιστον ομάδα διακλάσεων έχει σχεδόν παράλληλη παράταξη με αυτή του πρανούς και κλίνει προς την ελεύθερη επιφάνεια αυτού. Αν το επίπεδο των διακλάσεων τέμνει αυτό του πρανούς και η κλίση τους είναι μεγαλύτερη από τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) της επιφάνειάς τους, τότε είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση αστοχίας (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Ένας όγκος / Κλιμακωτά επίπεδα ολίσθησης

Η περίπτωση αυτή (Σχήμα 2.2b), είναι πιθανή σε περιπτώσεις όπου μια σειρά από πυκνές παράλληλες διακλάσεις έχουν παράλληλη παράταξη με αυτή του πρανούς και κλίνουν προς την ελεύθερη επιφάνεια αυτού. Οι παράλληλες διακλάσεις μπορεί να είναι συνεχείς ή μη, όμως τουλάχιστον ένα από τα επίπεδα αυτών πρέπει να τέμνει το επίπεδο του πρανούς. Στην περίπτωση των συνεχών, παράλληλων διακλάσεων, είναι απαραίτητη μια δεύτερη ομάδα αυτών, η οποία πρέπει επίσης να έχει κλίση σχεδόν παράλληλη με αυτή του πρανούς και μέγεθος και διεύθυνση κλίσης τέτοια, ώστε το επίπεδό της να μην τέμνει το μέτωπο του πρανούς (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Πολλαπλοί όγκοι / Πολλαπλά επίπεδα ολίσθησης

Πρόκειται για την πιο περίπλοκη μορφή αστοχίας ολίσθησης σε επίπεδο (Σχήμα 2.2c). Ο μηχανισμός της έχει να κάνει με δύο ή περισσότερες ομάδες διακλάσεων που έχουν σχεδόν παράλληλη παράταξη με αυτή του πρανούς και κλίνουν προς το μέτωπο αυτού. Τουλάχιστον ένα από τα επίπεδα αυτών πρέπει να τέμνει το επίπεδο του πρανούς. Για την εμφάνιση αστοχίας, η κλίση του επιπέδου των ασυνεχειών που βρίσκονται υψηλότερα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) του επιπέδου της ασυνέχειας. Ακόμη, τα επιπλέον συστήματα ασυνεχειών πρέπει να είναι επίσης σχεδόν παράλληλα στη διεύθυνση του πρανούς και είτε να κλίνουν σχεδόν κατακόρυφα κοντά στο επίπεδο του πρανούς, ή απότομα, μακριά από αυτό (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Απλή σφήνα / Δύο τεμνόμενα επίπεδα

Αυτού του τύπου η αστοχία (Σχήμα 2.2d) εμφανίζεται σε περίπτωση που δύο ή περισσότερες ομάδες διακλάσεων τέμνονται σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση του πρανούς και κλίνουν προς το επίπεδο αυτού. Ακόμη, αυτός ο τύπος αστοχίας προϋποθέτει ότι η κλίση τουλάχιστον μιας από τις ομάδες διακλάσεων που τέμνονται είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής (ϕ) του υλικού της επιφάνειας των ασυνεχειών. Τέλος η τομή των επιπέδων των ασυνεχειών πρέπει να διέρχεται από το επίπεδο του μετώπου του πρανούς (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Απλή σφήνα / Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα

Η περίπτωση ολίσθησης μιας απλής σφήνας που σχηματίζεται από την τομή δύο τουλάχιστον ομάδων ασυνεχειών με πυκνές διακλάσεις (Σχήμα 2.2e) είναι σχεδόν η ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην περίπτωση της απλής σφήνας με δύο τεμνόμενα επίπεδα (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Πολλαπλές σφήνες / Πολλαπλά τεμνόμενα επίπεδα

Πολλαπλές σφήνες σχηματίζονται από την τομή τουλάχιστον τεσσάρων ομάδων ασυνεχειών (Σχήμα 2.2f). Αν και θεωρητικά είναι δυνατή, αστοχία ολίσθησης ενός συστήματος πολλαπλών σφηγών εμφανίζεται σπάνια (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Ένας όγκος / Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης

Αστοχίες ολίσθησης αυτού του είδους (Σχήμα 2.2g), συνδέονται κυρίως με εδαφικά πρανή. Παρόλα αυτά, αστοχία σε κυκλική επιφάνεια είναι δυνατό να εμφανιστεί και σε πετρώματα εξαιρετικά αποσαθρωμένα, με μεγάλο αριθμό διακλάσεων ή σε ασθενή πετρώματα όπως αργιλικόι σχιστόλιθοι και ψαμμίτες χαλαρά συγκολλημένοι (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

Αυτού του είδους η αστοχία αφορά ανατροπή ή ολίσθηση βραχωδών τεμαχών πάνω σε επιφάνεια κυκλικού τομέα. Απαραίτητες προϋποθέσεις για κατάπτωση θεωρούνται τα

πυκνά και με απότομη κλίση συστήματα ασυνεχειών που κλίνουν μακριά από την επιφάνεια του πρανούς. Απουσία τομής των ασυνεχειών, κάθε στρώμα τείνει να στραφεί προς τα κάτω, κάτω από την επίδραση του ίδιου του βάρους, δημιουργώντας ρωγμές που προέρχονται από διπλή κάμψη. Η κατάπτωση συνήθως ξεκινάει με διαχωρισμό των στρωμάτων και κίνησή τους προς την κατεύθυνση της εκσκαφής. Ο διαχωρισμός των στρωμάτων μπορεί να είναι σταδιακός ή στιγμιαίος. Ο στιγμιαίος διαχωρισμός συνδέεται κυρίως με το βάρος του όγκου που αποκόπτεται ή/και την ανακούφισή του από τις τάσεις που ασκούνταν σε αυτόν πριν την εκσκαφή. Ο σταδιακός διαχωρισμός συνδέεται συνήθως με περιβαλλοντικές διαδικασίες όπως είναι οι κύκλοι ψύξης/θέρμανσης (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑΒΥΘΙΣΗΣ

Αστοχίες αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται γενικά από περιστασιακές πτώσεις λίθων λόγω διάβρωσης. Αυτές εμφανίζονται όταν τμήματα βράχων χαλαρώνουν και αποκόπτονται λόγω αποσάθρωσης και διάβρωσης. Κάποια πετρώματα θρυμματίζονται λόγω των καιρικών συνθηκών στις οποίες εκτίθενται και μετατρέπονται σε υλικό το οποίο παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με ένα έδαφος. Αυτό το υλικό μπορεί να αστοχήσει με έναν από τους κλασσικούς μηχανισμούς αστοχίας για εδάφη (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Η πτώση λίθων αποτελεί περισσότερο ένα πρόβλημα συντήρησης παρά μια απειλή για αστάθεια πρανών. Παρόλα αυτά, πρανή ιζηματογενών πετρωμάτων στα οποία υπάρχουν ενδιαστρώσεις σχιστολίθων, μπορούν να υποστούν αστοχία λόγω τοπικής επιδείνωσης του σχιστολιθικού σχηματισμού. Η επιδείνωση αυτή προκαλεί την υπονόμηση και συνεπώς αστοχία του πιο ισχυρού υπερκείμενου στρώματος (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

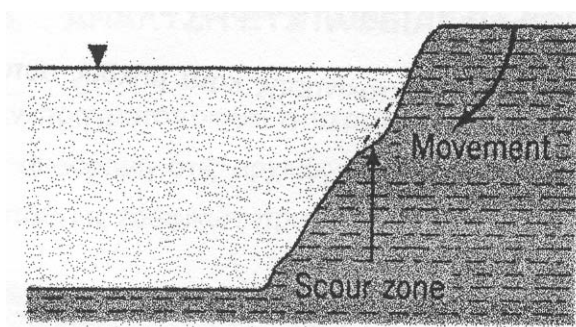
Όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρανές λόγω της βαρύτητας υπερβούν τη διατμητική αντοχή του υλικού, τότε παρουσιάζονται φαινόμενα αστάθειας. Στην περίπτωση των εκσκαφών, η αφαίρεση υλικού προκαλεί απελευθέρωση των «παραμένουσων» τάσεων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία.

Τα γεωμετρικά όρια που υποδεικνύονται από τη διεύθυνση, την απόσταση και την συνέχεια των διακλάσεων καθώς και τα όρια των ελεύθερων επιφανειών που καθορίζονται από την εκσκαφή, ορίζουν τον πιθανό τύπο αστοχίας. Παρόλα αυτά, η αστοχία καθορίζεται και από επιπλέον παράγοντες που δεν συνδέονται άμεσα με τη γεωμετρία. Οι παράγοντες αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους φυσικούς και τους τεχνητούς. Οι μεν πρώτοι οφείλονται στην επίδραση φυσικών διαδικασιών, ενώ οι δεύτεροι σε ανθρώπινη παρέμβαση.

2.4.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

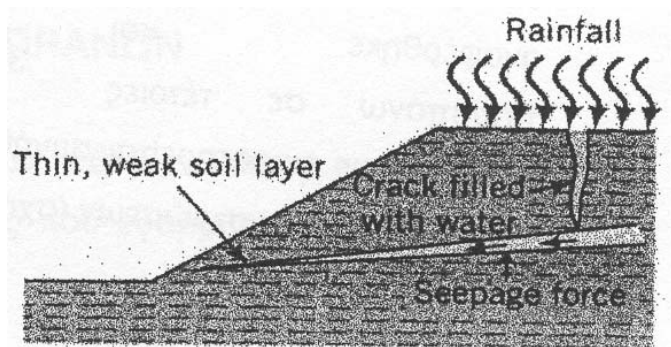
Διάβρωση

Τα φυσικά ή τα τεχνητά πρανή διαβρώνονται από την κίνηση ύδατος σε επαφή με το πρανές, όπως συμβαίνει όταν αυτό βρίσκεται στα όρια ποταμών ή λιμνών, ή από την κίνηση υπόγειου ύδατος. Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται διάβρωση μεγάλης κλίμακας, που συνοδεύεται από αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς (Σχήμα 2.3). Η απομάκρυνση υλικού από το πόδι της πλαγιάς μειώνει τις δυνάμεις συγκράτησης που διατηρούν την ισορροπία (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).



Σχήμα 2.3: Διάβρωση παραλίμνιων και παραποτάμιων πρανών.

Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται εσωτερική διάβρωση που οφείλεται σε κίνηση υπόγειων υδάτων ή σε διείσδυση νερού από την επιφάνεια μέσω ρωγμών (Σχήμα 2.4). Η εσωτερική διάβρωση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών μειώνει σημαντικά την αλληλοεμπλοκή μεταξύ γειτονικών όγκων πετρώματος. Η απώλεια της αλληλοεμπλοκής με τη σειρά της, συνεπάγεται μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού με αποτέλεσμα ένα αρχικά υγιές και σταθερό πέτρωμα να αρχίζει να παρουσιάζει κίνηση. Τέλος, η εσωτερική διάβρωση μπορεί επίσης να επιφέρει αύξηση



Σχήμα 2.4: Το νερό της βροχής εισέρχεται μέσω επιφανειακών ρωγμών στη μάζα του πρανούς προκαλώντας εσωτερική διάβρωση σε ασθενή εδαφικά στρώματα.

της διαπερατότητας του πετρώματος και της κίνησης του υπόγειου ύδατος (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Το νερό λοιπόν επιδρά στη γεωμετρία, τα φυσικά, χημικά ή/και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Εκτός από το νερό, ικανότητα διάβρωσης παρουσιάζει και ο αέρας, σε μικρότερο βαθμό βέβαια.

Υπόγεια νερά

Εκτός από την ικανότητα διάβρωσης, το υπόγειο νερό που διέρχεται από ρωγμές του πετρώματος μειώνει σημαντικά την ευστάθεια ενός πρανού και με άλλο 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 πρανού, αυξάνει επίσης τις κινητήριες δυνάμεις που δρουν πάνω στη μάζα του πετρώματος (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Θερμοκρασία

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ευστάθεια ενός πρανού είναι αρκετά σημαντική. Υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν θρυμματισμό του πετρώματος λόγω φαινομένων συστολής – διαστολής. Το νερό που παγώνει στο εσωτερικό των ασυνεχειών προκαλεί πολύ σημαντική ζημιά, με ρήξη της μάζας του πετρώματος. Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης/θέρμανσης έχουν σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της αντοχής. Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι επιφανειακό φαινόμενο και συνήθως δεν χρήζουν ανησυχίας για μόνιμα πρανή. Παρόλα αυτά, σε

κάποιες περιπτώσεις η επιφανειακή φθορά θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγαλύτερης κλίμακας αστάθεια (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Τασική κατάσταση

Μέσα στη μάζα του πετρώματος πολλές φορές αναπτύσσονται υψηλές τάσεις. Υψηλές οριζόντιες τάσεις που δρουν κατακόρυφα στο επίπεδο του πρανού είναι πιθανό να προκαλέσουν κίνηση όγκων εδαφικού υλικού λόγω της εκτόνωσης των τάσεων που προκαλεί η εκσκαφή. Υψηλές οριζόντιες τάσεις μπορούν επίσης να προκαλέσουν θρυμματισμό της επιφάνειας του μετώπου ενός πρανού. Οι αποθηκευμένες τάσεις είναι πιθανό να εκτονωθούν σε κάποιο βαθμό κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Για μεγάλου βάθους εκσκαφές είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η τασική κατάσταση μέσα στη μάζα του πετρώματος και τι επίδραση αυτή έχει στην ανοιχτή εκσκαφή (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

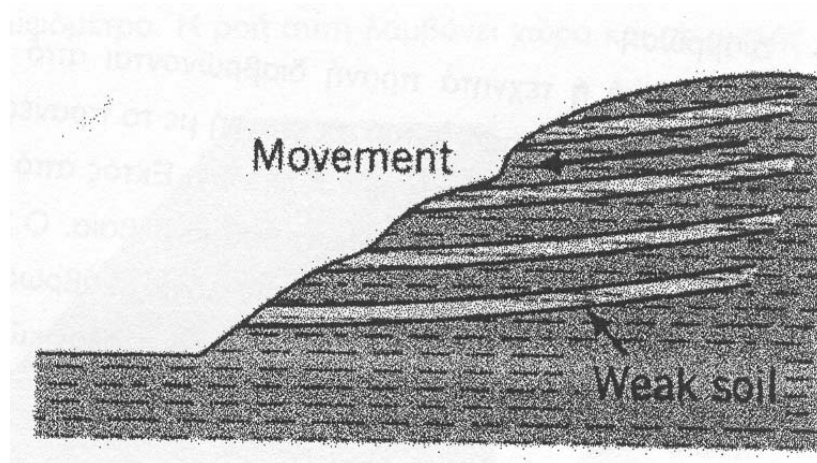
Σεισμοί

Οι σεισμοί επιφέρουν δυναμικές φορτίσεις στα πρανή. Από αυτές τις φορτίσεις ιδιαίτερη επικινδυνότητα παρουσιάζουν η διατμητική η οποία ελαττώνει τη διατμητική αντοχή και το μέτρο δυστροπίας του εδάφους. Πολλές φορές σε αδρομερή κορεσμένα εδάφη (άμμος) είναι δυνατόν η πίεση των πόρων λόγω της σεισμικής δράσης να φτάσει σε τιμές ίσες με την ολική τάση του εδάφους και να το οδηγήσει σε βισκοειδή συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται δυναμική ρευστοποίηση (dynamic liquefaction) και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για κατασκευές που έχουν θεμελιωθεί πάνω ή μέσα σε τέτοια εδάφη.

Γεωλογικά χαρακτηριστικά πρανούς

Πολλές κατολισθήσεις πρανών προέρχονται από γεωλογικά χαρακτηριστικά που δεν έχουν αναγνωριστεί κατά την γεωλογική ή γεωτεχνική έρευνα. Μια λεπτή στρώση ιλύος (μερικά χιλιοστά πάχους) που υπόκειται ενός στρώματος αργίλου μεγάλου πάχους, μπορεί εύκολα να παραβλεφθεί σε μια γεωλογική ή γεωτεχνική έρευνα. Είναι όμως ικανή να προκαλέσει αστοχία του πρανού πάνω σε αυτό τον αρμό επαφής

(Σχήμα 2.5). Σε τέτοιες περιπτώσεις λοιπόν, παρατηρείται συνήθως κατολίσθηση μετακίνησης κατά μήκους αυτών των αδύναμων ενστρώσεων.



Σχήμα 2.5: Επίδραση της ύπαρξης λεπτών/ασθενών εδαφικών στρωμάτων στην ευστάθεια ενός πρανούς.

2.4.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ

Εξωτερικά αίτια

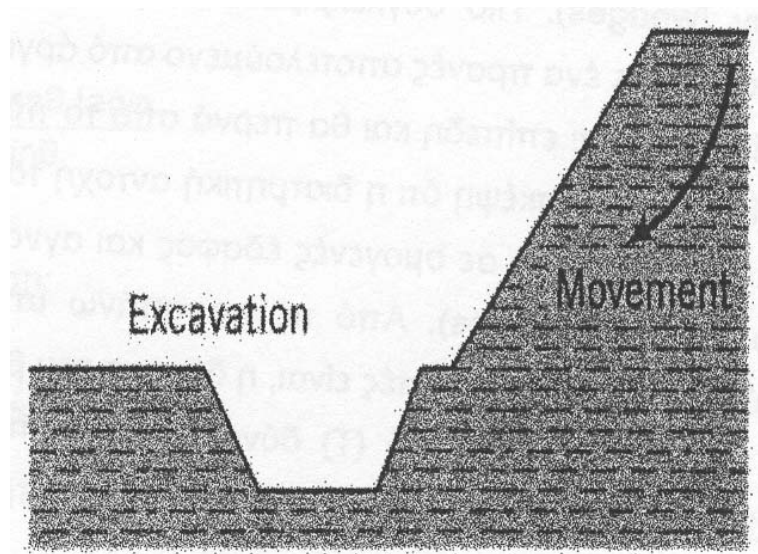
Φορτία τα οποία τοποθετούνται στην κορυφή του πρανούς αυξάνουν τις δυνάμεις που τείνουν να επιφέρουν κατολίσθηση. Το αντίθετο, δηλαδή εφαρμογή φορτίων στο πόδι του πρανούς, βοηθά στην ευστάθειά του. Όταν πραγματοποιούνται θεμελιώσεις και κατασκευές στην κορυφή του πρανούς και κοντά στο φρύδι πρέπει να πραγματοποιείται προσεκτική και λεπτομερής ανάλυση για να αποφεύγονται υπερβολικές αυξήσεις των φορτίων που οδηγούν σε αστάθεια και τελικά σε αστοχία του πρανούς.

Κατασκευαστικές δραστηριότητες

Όταν αναπτύσσονται κατασκευαστικές δραστηριότητες κοντά στο πόδι του πρανούς υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν καταστάσεις που θα οδηγήσουν σε αστάθεια αυτού (Σχήμα 2.6). Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εκσκαφές, οι δονήσεις από βαριά μηχανήματα ή η χρήση εκρηκτικών κοντά στο πόδι του πρανούς.

Απότομη ταπείνωση στάθμης δεξαμενής

Πολλές φορές είναι δυνατόν σε ταμιευτήρες νερού να υπάρξει απότομη ταπείνωση της στάθμης του νερού. Η δύναμη που ασκεί το νερό στο πρανές απομακρύνεται και η



Σχήμα 2.6: Επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα με κατασκευαστικές δραστηριότητες (εκσκαφή) στην ευστάθεια πρανούς.

πίεση των πόρων δεν προλαβαίνει να εκτονωθεί ταυτόχρονα με την ταπείνωση της στάθμης. Έτσι, λόγω υπερβολικής πίεσης των πόρων που συνεπάγεται μείωση της διατμητικής αντοχής, παρουσιάζεται αστοχία.

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η ανάλυση της ευστάθειας καθορίζει κάτω από ποιες συνθήκες, ένα συγκεκριμένο πρανές θα μείνει σταθερό. Η ευστάθεια εκφράζεται με τον συντελεστή ασφάλειας FS (factor of safety). Ο συντελεστής ασφάλειας παρουσιάζει το λόγο της ολικής διατμητικής τάσης του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας, προς την ολική διατμητική αντοχή που απαιτείται για την ευστάθεια του πρανούς. Διαφορετικά, ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται σε σχέση με τις ασκούμενες δυνάμεις από τη σχέση:

$$FS = \frac{\text{δυνάμεις αντίστασης}}{\text{δυνάμεις ολίσθησης}} \quad [2.1]$$

Καθώς η τιμή του FS αυξάνεται πέραν της μονάδας, αυξάνεται και η ευστάθεια του πρανούς. Αστάθεια παρατηρείται όταν αναπτύσσονται επιφάνειες ολίσθησης και εκδηλώνονται κινήσεις μέσα στη μάζα του εδάφους ή του βράχου. Σκοπός της εφαρμογής όλων των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας είναι ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας (limit equilibrium methods), ενώ τα τελευταία χρόνια

έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί και άλλες μέθοδοι, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, που είναι γενικά πιο σύνθετες (Στεικάκης Στ., 2000).

Η βασική παραδοχή στις μεθόδους οριακής ισορροπίας είναι να ικανοποιείται το κριτήριο θραύσης κατά Coulomb κατά μήκος της πιθανολογούμενης επιφάνειας θραύσης. Έτσι θεωρείται μια ελεύθερη μάζα εδάφους από το πρανές και ξεκινώντας από γνωστές ή υποθετικές τιμές των δυνάμεων που επενεργούν πάνω σε αυτή, υπολογίζεται η διατμητική αντίσταση που απαιτείται για να ισορροπεί η μάζα. Η διατμητική αυτή αντίσταση, συγκρίνεται τότε με την εκτιμώμενη ή διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους, ώστε να προκύψει μια ένδειξη του συντελεστή ασφάλειας. Η μέθοδος αυτή δίνει γενικά ικανοποιητικά αποτελέσματα παρόλο που το πρόβλημα αντιμετωπίζεται στις δύο μόνο αντί στις τρεις διαστάσεις (Στεικάκης Στ., 2000).

Ο συντελεστής ασφάλειας FS στις μεθόδους οριακής ισορροπίας είναι ο συντελεστής εκείνος κατά τον οποίο πρέπει να ελαττωθούν οι παράμετροι (c ή/και ϕ) της διατμητικής αντοχής του υλικού, ώστε να ισορροπεί το πρανές κάτω από μια κατάσταση οριακής ισορροπίας κατά μήκος δεδομένης επιφάνειας ολίσθησης. Δηλαδή ο συντελεστής ασφάλειας συνδέεται όχι με την ίδια την αντοχή του πρανούς αλλά και με τις παραμέτρους αντοχής, που στην περίπτωση ανάλυσης της ενεργούς τάσης, εξαρτώνται από την ορθή τάση (Στεικάκης Στ., 2000).

Στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ για λόγους σύγκρισης, θα γίνει ανάλυση και με την κλασική μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Ακολουθούν δύο κεφάλαια που αναλύουν τη μέθοδο οριακής ισορροπίας και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεχωριστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ****3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Για την επίλυση του προβλήματος της ανάλυσης της ευστάθειας των εδαφικών πρανών έχουν μέχρι στιγμής αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι από διακεκριμένους επιστήμονες (Bishop, 1955; Morgenstern and Price, 1965; Lo and Lee, 1973; Miao, 1985; Zhang and Chen, 1987; Espinoza et al., 1992; Michalowski, 1995; Duncan, 1996), όπως αυτή της οριακής ισορροπίας, η μέθοδος της επιφάνειας ολίσθησης, των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και συνδυασμοί αυτών. Μεταξύ αυτών των προσεγγίσεων, η μέθοδος της οριακής ισορροπίας είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη, κυρίως λόγω της απλότητάς της (Miao et al., 1999).

Η ιδέα της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη συμβατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών (Bishop, 1955; Morgenstern and Price, 1965). Η προσέγγιση αυτή θεωρεί μια συνεχή επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα συμπαγές σώμα που ικανοποιεί το κριτήριο του Mohr – Coulomb. Η υπόθεση αυτή, σε συνδυασμό με άλλες, οδηγεί σε μια λύση που εκφράζεται μέσω του συντελεστή ασφάλειας. Αυτή η συμβατική μέθοδος, αποδείχτηκε υψηλής πρακτικής σημασίας ειδικά σαν ένα σχεδιαστικό εργαλείο για εδαφικά πρανή που παρουσιάζουν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Όταν εφαρμόζεται σε ψαθυρά εδάφη, η ίδια μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα (Miao et al., 1999).

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

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

- A. Στις μεθόδους εκείνες στις οποίες η επίλυση γίνεται με πρώτου βαθμού εξισώσεις με μονοσήμαντη τιμή του αγνώστου (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:
- ✓ Την απειροστική ανάλυση (μέθοδος του πρανούς μεγάλου μήκους)
 - ✓ Την ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους
 - ✓ Τη μέθοδο $\Phi_u = 0$
 - ✓ Τη Σουηδική μέθοδο
- B. Σε εκείνες τις μεθόδους, όπου η λύση προκύπτει από εξισώσεις με διαδοχικές επαναλήψεις για διάφορες τιμές του β' αγνώστου με σκοπό την προσέγγιση του συντελεστή ασφάλειας (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως μη γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:
- ✓ Τη μέθοδο του Bishop
 - ✓ Την απλοποιημένη μέθοδο Janbu
 - ✓ Τη μέθοδο Spencer
 - ✓ Τη μέθοδο Morgenstern and Price

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

3.2.1 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας εδαφικών πρανών που είναι απλές στην επίλυση και έχουν λύση η οποία ορίζεται μονοσήμαντα, είναι οι γραμμικές μέθοδοι. 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).

Ανάλυση πρανών μεγάλου μήκους (απειροστική ανάλυση)

Η απειροστική ανάλυση (μέθοδος του πρανούς μεγάλου μήκους), μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε κατολισθήσεις στις οποίες η εδαφική μάζα ολισθαίνει σε μια επίπεδη επιφάνεια σχεδόν παράλληλη στο επίπεδο του πρανούς. Σε αυτή τη μέθοδο, το μήκος του πρανούς θεωρείται πολύ μεγάλο σε σχέση με το ύψος του, ενώ η κλίση του σε σχέση με την οριζόντιο είναι ίση με β . Θεωρείται επίσης ότι τα χαρακτηριστικά του εδάφους καθώς και του υδροφόρου ορίζοντα δεν μεταβάλλονται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (Nash, 1987).

Στη γενικότερη περίπτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, οι δυνάμεις που δρουν στη λωρίδα του εδάφους είναι το ίδιο το βάρος της, οι διατμητικές δυνάμεις στις κάθετες πλευρές της, καθώς και οι ορθές δυνάμεις. Ο συντελεστής ασφάλειας στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - u) \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad [3.1]$$

όπου: c' = η συνοχή του εδάφους

γ = το ειδικό βάρος του εδάφους

z = το πάχος του στρώματος του εδάφους

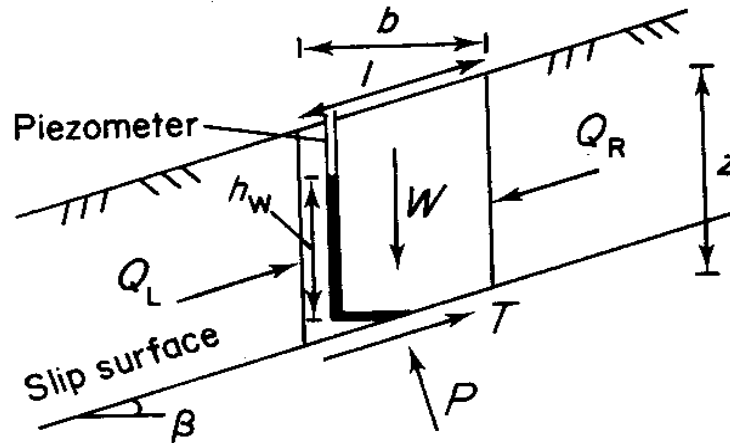
β = η κλίση του πρανούς και της επιφάνειας ολίσθησης

u = η πίεση των πόρων στη βάση του πρανούς

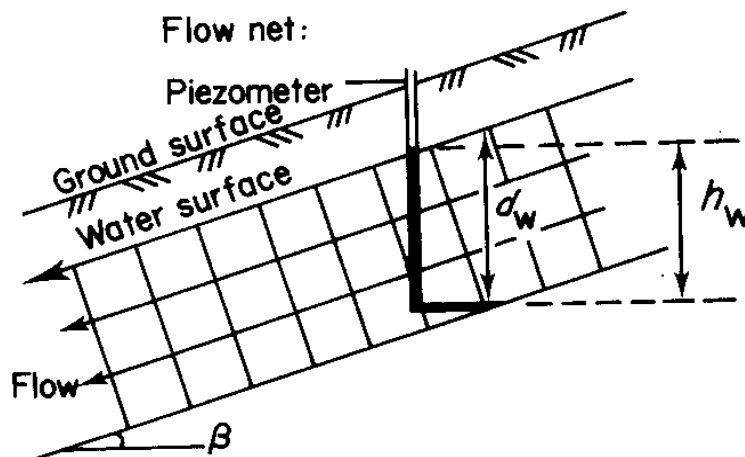
ϕ' = η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

Σε φυσικά αργιλικά πρανή, οι κατολισθήσεις εμφανίζονται συνήθως σε περιόδους υψηλών βροχοπτώσεων. Ο υδροφόρος ορίζοντας τότε ανυψώνεται και στην περίπτωση που εμφανίζονται δυνάμεις διαρροής, γίνεται η υπόθεση ότι η διαρροή επενεργεί παράλληλα στο εδαφικό πρανές οπότε $c' = 0$ και η εξίσωση του συντελεστή ευστάθειας γίνεται:

$$FS = (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad [3.2]$$



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα δυνάμεων στην περίπτωση ανάλυσης με τη μέθοδο του πρανούς μεγάλου μήκους (Nash, 1987).

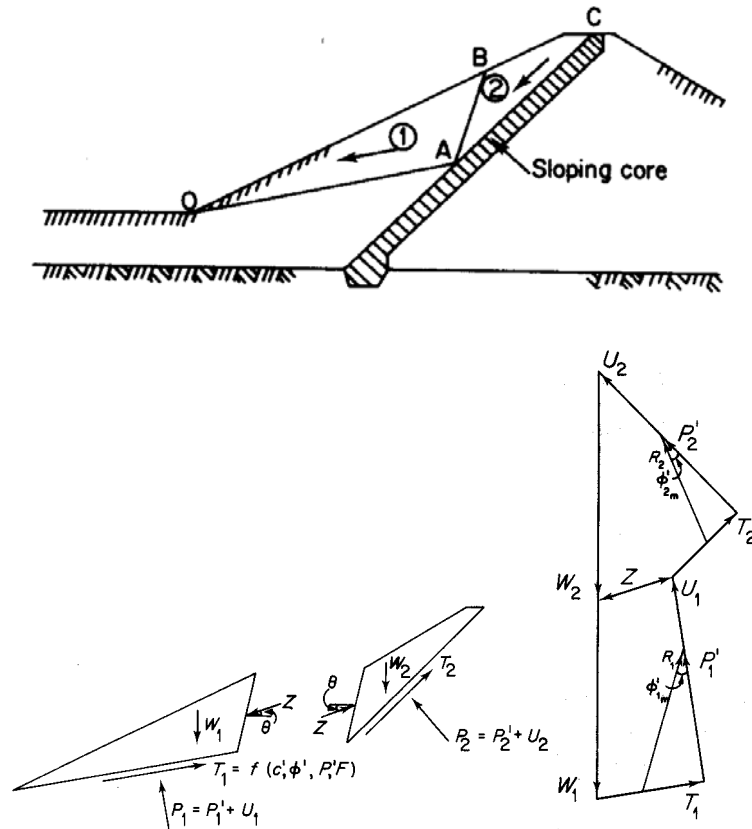


Σχήμα 3.2: Γραφική απεικόνιση του πρανούς μεγάλου μήκους στην περίπτωση που παρατηρούνται δυνάμεις διαρροής (Nash, 1987).

Όταν $\beta = \phi/2$ είναι φανερό ότι $FS = 1$. Η γραφική απεικόνιση του πρανούς στην περίπτωση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η επιφάνεια ολίσθησης προβαλλόμενη στο επίπεδο μπορεί να προσεγγιστεί με δύο ή τρεις γραμμές. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που το πρανές εδράζεται πάνω σε κάποιο στρώμα υψηλής αντοχής (π.χ. κάποιο πέτρωμα), ή όταν ένα ασθενές στρώμα παρεμβάλλεται στη μάζα του πρανούς. Η ευστάθεια στην περίπτωση αυτή μπορεί να εξεταστεί, αν το πρανές χωριστεί σε ένα αριθμό τμημάτων και μελετηθεί η ισορροπία καθενός από τα τμήματα αυτά ξεχωριστά. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης σφηνοειδούς τεμάχους σε ένα φράγμα. Οι εξισώσεις ισορροπίας είναι λιγότερες από τους αγνώστους, αλλά το πρόβλημα μπορεί



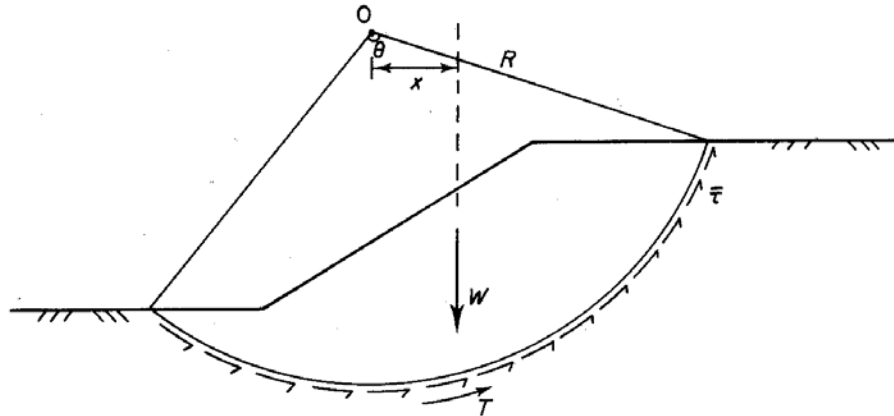
Σχήμα 3.3: Μέθοδος ανάλυσης σφηνοειδούς τεμάχους στην περίπτωση φράγματος. Πολύγωνα και ισορροπία δυνάμεων (Nash, 1987).

να οριστεί αν γίνουν κάποιες υποθέσεις σχετικά με την κατεύθυνση των δυνάμεων μεταξύ των τεμαχών και θεωρώντας ότι η διατμητική αντοχή του υλικού είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Για την επίτευξη ενός συντελεστή ευστάθειας για τον οποίο κλείνει το πολύγωνο των δυνάμεων, απαιτούνται συνήθως αρκετές δοκιμές (Nash, 1987).

Μέθοδος $\Phi_u = 0$

Είναι η απλούστερη από τις μεθόδους ανάλυσης που θεωρούν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 3.4). Η αστοχία θεωρείται ότι εμφανίζεται λόγω περιστροφής ενός συμπαγούς εδαφικού όγκου πάνω σε μια επιφάνεια που αποτελεί τόξο κύκλου. Η ευστάθεια της εδαφικής μάζας εξετάζεται κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις σχετικά με τη θέση του κέντρου του κύκλου (Nash, 1987).

Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται η τιμή της διατμητικής αντοχής που υπολογίζεται σε συνθήκες μη αποστράγγισης, γεγονός που υποδεικνύει ότι στην περίπτωση αυτή η πίεση των πόρων και οι ενεργές τάσεις δεν έχουν το χρόνο να ισορροπήσουν κάτω από την επιβολή ενός φορτίου. Με το ίδιο σκεπτικό, σε αυτή την κατάσταση η γωνία



Σχήμα 3.4: Μέθοδος $\Phi_u = 0$ (Nash, 1987).

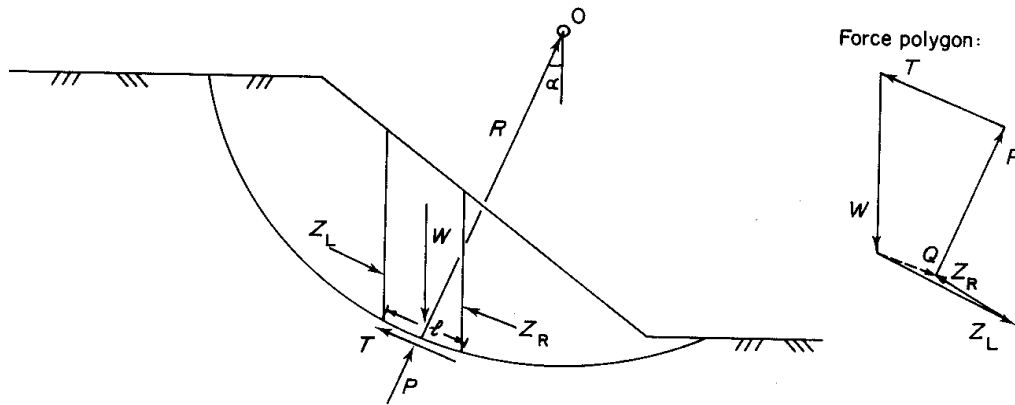
εσωτερικής τριβής λαμβάνεται ίση με το μηδέν ($\Phi_u = 0$). Έτσι, μπορεί να εφαρμοστεί σε συνθήκες που προκύπτουν μετά από την κατασκευή ενός τεχνικού έργου, ενώ δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της στην ανάλυση ευστάθειας φυσικών πρανών, εκτός αν υπάρχει απότομη μεταβολή της εντατικής τους κατάστασης λόγω επιβολής φορτίου (Nash, 1987).

Σουηδική μέθοδος

Η μέθοδος αυτή, είναι η απλούστερη στη χρήση από τις μεθόδους των λωρίδων, μια και επιλύεται εύκολα και χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η αστοχία θεωρείται ότι εμφανίζεται με περιστροφή ενός εδαφικού τεμάχους πάνω σε μια κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με κέντρο το O , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5. Ο συντελεστής ευστάθειας υπολογίζεται εξετάζοντας την ισορροπία ροπών που σχηματίζονται εξαιτίας των εφαρμοζόμενων δυνάμεων στο πρανές, μεταβάλλοντας τη θέση του κέντρου O και επομένως και τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης.

Η υπόθεση που πραγματοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενικές, οπότε το πρόβλημα μεταπίπτει στον υπολογισμό των δυνάμεων που δρουν στη βάση καθεμιάς από αυτές. Το άθροισμα των ροπών που εμφανίζονται εξαιτίας των διατμητικών δυνάμεων σε κάθε λωρίδα κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας πρέπει να ισούται με το άθροισμα των ροπών που δημιουργούνται εξαιτίας του βάρους της κάθε λωρίδας της εδαφικής μάζας. Ο συντελεστής ασφάλειας για όλο το εδαφικό πρανές δίνεται από τη σχέση:

$$FS = \frac{\sum (c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad [3.3]$$



Σχήμα 3.5: Σουηδική μέθοδος ανάλυσης (Nash, 1987).

όπου: c' = η συνοχή του εδάφους

l = το μήκος βάσης της εδαφικής λωρίδας

W = το βάρος κάθε εδαφικής λωρίδας

α = η γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην βάση της λωρίδας ακτίνα με την κατακόρυφο

u = η πίεση των πόρων στη βάση του πρανούς

φ' = η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

Και σε αυτή την περίπτωση, για να βρεθεί η επιφάνεια αστοχίας με το μικρότερο συντελεστή ασφάλειας πρέπει να πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών σε υποθετικές επιφάνειες.

3.2.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ

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, δεδομένων πάντοτε κάποιων υποθέσεων που γίνονται εξαρχής και έχουν να κάνουν με:

- ✓ Τη συμβολή των κύριων τάσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας
- ✓ Τη θέση της γραμμής ώθησης των δυνάμεων μεταξύ των εδαφικών λωρίδων
- ✓ Την διεύθυνση των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων

Από τη στιγμή που σε όλες τις μεθόδους γίνονται υποθέσεις, καμία από αυτές δεν συγκλίνει στην πραγματική τιμή του συντελεστή ευστάθειας αλλά σε κάποια τιμή που θεωρείται αποδεκτή (Nash, 1987).

Μέθοδος Bishop

Η απλοποιημένη μέθοδος του Bishop (Σχήμα 3.6) μοιάζει αρκετά με τη Σουηδική διότι και σε αυτή την περίπτωση γίνεται η παραδοχή της αστοχίας σε τόξο κυκλικής επιφάνειας κέντρου O και ακτίνας R . Η επίλυση πραγματοποιείται με την ίδια μεθοδολογία όπως και στη Σουηδική. Και πάλι εξετάζεται η οριακή ισορροπία των ροπών που σχηματίζονται εξαιτίας των εφαρμοζόμενων δυνάμεων στο πρηνές. Οι διαφορές των δύο μεθόδων από άποψη παραδοχών, είναι ότι μεταξύ των λωρίδων, ασκούνται μόνο οι οριζόντιες δυνάμεις, ενώ οι κατακόρυφες θεωρούνται αμελητέες και λαμβάνουν μηδενικές τιμές.

Με βάση το Σχήμα 3.6 και λόγω του ότι οι κατακόρυφες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων θεωρούνται μηδενικές προκύπτει ότι:

$$X_R = X_L = 0 \quad [3.4]$$

Το κριτήριο αστοχίας του Mohr – Coulomb δίνει:

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad [3.5]$$

όπου: c' = η συνοχή του εδάφους

σ = η ορθή τάση στη βάση της εδαφικής λωρίδας

u = η πίεση των πόρων

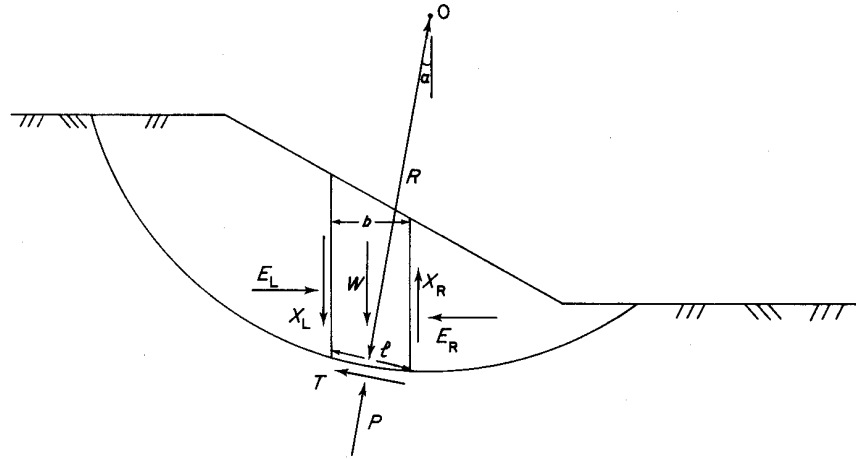
φ' = η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

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

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad [3.6]$$

όπου: s = η διατμητική αντοχή του εδάφους

τ = η διατμητική τάση στη βάση της κάθε εδαφικής λωρίδας



Σχήμα 3.6: Μέθοδος Bishop (Nash, 1987).

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

$$P = \sigma l \quad [3.7]$$

$$T = \tau l \quad [3.8]$$

όπου l = το μήκος της βάσης των επιμέρους λωρίδων.

Η ορθή δύναμη θεωρείται ότι εφαρμόζεται στο μέσο της βάσης κάθε λωρίδας και ορίζεται επιλύοντας τις δυνάμεις σε κάθε λωρίδα κατά την κατακόρυφη έννοια. Αντικαθιστώντας τις [3.5], [3.7] και [3.8] στην [3.6] τελικά προκύπτει ότι:

$$T = \frac{1}{FS} (c'l + (P - ul) \tan \phi') \quad [3.9]$$

Επιλύοντας ως προς την κατακόρυφο προκύπτει ότι:

$$P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L) \quad [3.10]$$

Αντικαθιστώντας την σχέση [3.9] στην [3.10] τελικά για την ορθή δύναμη στη βάση της επιφάνειας αστοχίας προκύπτει ότι:

$$P = [W - \frac{1}{FS} (c'l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha)] / m_\alpha \quad [3.11]$$

όπου:

$$m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{FS} \right) \quad [3.12]$$

Με βάση τη σχέση [3.11], υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας για μια μόνο λωρίδα εδάφους, όπως αυτή έχει αναλυθεί στο Σχήμα 3.6.

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

$$\sum WR \sin \alpha = \sum TR \quad [3.13]$$

Αντικαθιστώντας την [3.9], η οποία αναφέρεται σε επίπεδο εδαφικής λωρίδας, στην [3.13], η οποία αναφέρεται στο σύνολο του πρηνούς, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$FS = \frac{\sum (c'l + (P - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad [3.14]$$

Η εξίσωση αυτή περιέχει το συντελεστή ασφάλειας και στα δύο μέλη της, δεδομένου ότι το P περιέχεται στο δεύτερο σκέλος της εξίσωσης, οπότε επιλύεται με διαδοχικές επαναλήψεις όπου το ένα FS θεωρείται και το άλλο υπολογίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τα δύο FS εξισωθούν. Η σύγκλιση γίνεται σχετικά εύκολα, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας να μπορεί να γίνει και χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, παρόλο που πρόκειται για μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία (Nash, 1987).

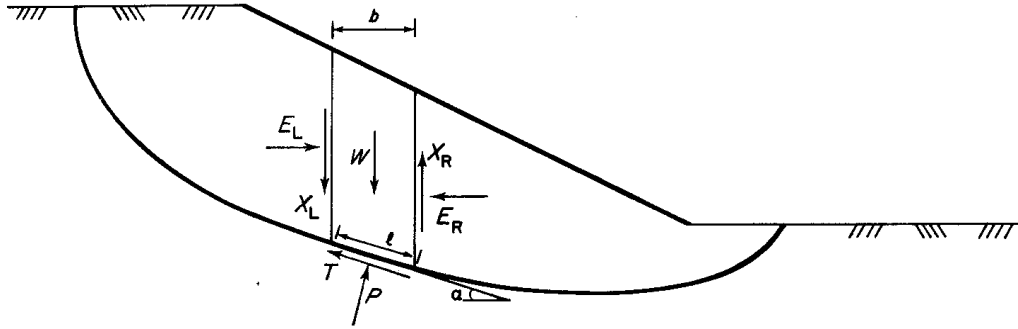
Μέθοδος Janbu

Οι Janbu et al., (1956) παρουσίασαν μια από τις πρώτες μεθόδους ανάλυσης μη κυκλικών επιφανειών αστοχίας (Σχήμα 3.7). Στη μέθοδο αυτή, η υπόθεση που λαμβάνει χώρα είναι ότι οι μεταξύ των λωρίδων δυνάμεις είναι μηδενικές και έτσι η σχέση που προκύπτει για την ολική ορθή δύναμη στη βάση κάθε λωρίδας είναι η ίδια που προκύπτει από τη μέθοδο του Bishop (Nash, 1987).

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

Στη βάση της λωρίδας του Σχήματος 3.7, ασκούνται η ορθή τάση σ , η διατμητική τάση τ και η πίεση των πόρων u . Το κριτήριο αστοχίας που εφαρμόζεται είναι:

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad [3.15]$$



Σχήμα 3.7: Μέθοδος Janbu (Πηγή: Nash, 1987).

Όπως και στην περίπτωση Bishop, για την ορθή δύναμη στη βάση της επιφάνειας αστοχίας προκύπτει ότι:

$$P = [W - \frac{1}{FS}(c'l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha)] / m_a \quad \text{με} \quad m_a = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{FS} \right)$$

Στην περίπτωση Janbu όμως, πραγματοποιείται και δεύτερη επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας αυτή τη φορά για διεύθυνση παράλληλη προς τη βάση της λωρίδας. Έτσι:

$$T + (E_R - E_L) \cos \alpha = [W - (X_R - X_L)] \sin \alpha \quad [3.16]$$

Όπως και προηγουμένως, οι δυνάμεις X_R και X_L μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενικές ($X_R = X_L = 0$). Από τις σχέσεις [3.16] και [3.9], προκύπτει ότι:

$$E_R - E_L = W \tan \alpha - \frac{1}{FS} [c'L + (P - ul) \tan \phi'] \sec \alpha \quad [3.17]$$

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

$$\sum (E_R - E_L) = 0 \quad [3.18]$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις [3.17] και [3.18] για ολόκληρο το εδαφικό πρηνές λαμβάνεται η σχέση:

$$\sum W \tan \alpha - \frac{1}{FS} \sum [c'L + (P - ul) \tan \phi'] \sec \alpha = 0 \quad [3.19]$$

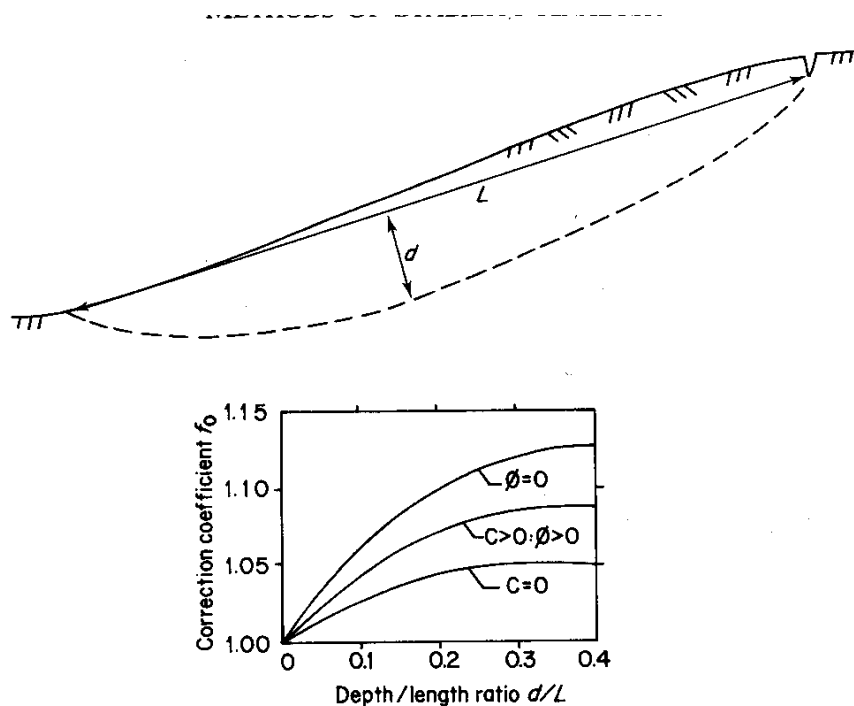
Αρα τελικά ο συνολικός συντελεστής ασφάλειας (FS_o) δίνεται από τη σχέση:

$$FS_o = \frac{\sum [c'L + (P - ul) \tan \phi'] \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha} \quad [3.20]$$

Εξαιτίας της υπόθεσης ότι οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενικές, ένας διορθωτικός παράγοντας f_0 πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή ασφαλείας που υπολογίζεται από τη σχέση [3.20], ώστε τελικά να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι:

$$FS = f_0 \cdot FS_0 \quad [3.21]$$

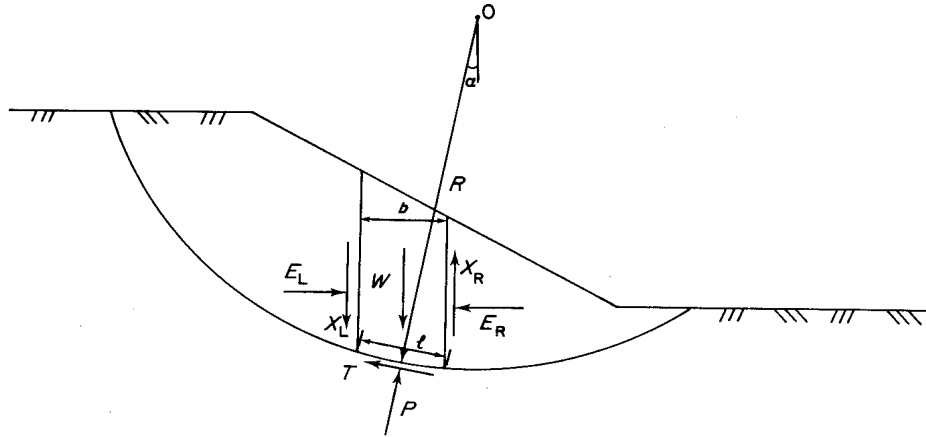
Για τη βαθμονόμηση αυτού του συντελεστή ο Janbu εξέτασε αρκετά εδαφικά πρανή και διαπίστωσε ότι αυτός εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρία του πρανούς, όσο και από την κατάσταση του εδάφους. Τελικά, το 1956 οι Janbu et al. κατέληξαν έπειτα από εξέταση μεγάλου αριθμού εδαφικών πρανών σε πρότυπες καμπύλες (Σχήμα 3.8) από τις οποίες προκύπτει ο συντελεστής f_0 βάση του λόγου του μήκους του εδαφικού τεμάχους που αποκόπτεται προς το μέγιστο πάχος αυτού (Nash, 1987).



Σχήμα 3.8: Πρότυπος καμπύλη και γεωμετρικά στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης f_0 στη μέθοδο του Janbu (Πηγή: Nash, 1987).

Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) αρχικά παρουσίασε τη μέθοδό του για την ανάλυση κυκλικών επιφανειών ολίσθησης (Σχήμα 3.9), η οποία όμως μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης θεωρώντας ένα φανταστικό κέντρο περιστροφής. Στη μέθοδο αυτή θεωρείται ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων έχουν σταθερή κλίση στο εσωτερικό του πρανούς, έτσι ώστε:



Σχήμα 3.9: Μέθοδος Spencer (Nash, 1987).

$$\frac{X}{E} = \tan \theta \quad [3.22]$$

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

$$P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L) \quad [3.23]$$

Τελικά με αντικατάσταση της σχέσης [3.9] στην σχέση [3.23], η ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας δίνεται από τη σχέση:

$$P = \left[W - (X_R - X_L) - \frac{1}{F} (c'l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha) \right] / m_a \quad [3.24]$$

όπου το m_a δίνεται από τη σχέση [3.12]. Από την ισορροπία δυνάμεων ως προς τον οριζόντιο άξονα προκύπτει ότι:

$$T \cos \alpha - P \sin \alpha + E_R - E_L = 0 \quad [3.25]$$

Αντικαθιστώντας το T από τη σχέση [3.9], είναι:

$$E_R - E_L = P \sin \alpha - \frac{1}{FS} [c'L + (P - ul) \tan \phi'] \cos \alpha \quad [3.26]$$

Από την ισορροπία δυνάμεων για το σύνολο του πρανούς και δεδομένου ότι δεν υπάρχει επιφανειακή φόρτιση σε αυτό, είναι:

$$\sum (E_R - E_L) = 0 \quad [3.27]$$

οπότε αντικαθιστώντας στην σχέση [3.27] τη σχέση [3.26] προκύπτει η σχέση:

$$\sum E_R - E_L = \sum P \sin \alpha - \frac{1}{F_f} \sum [c' L + (P - ul) \tan \phi'] \cos \alpha \quad [3.28]$$

Επιλύοντας την [3.28] ως προς F_f , που είναι ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την επίλυση με βάση την ισορροπία δυνάμεων, και δεδομένης της σχέσης [3.22] εξάγεται τελικά η σχέση:

$$F_f = \frac{\sum [c' L + (P - ul) \tan \phi'] \sec \alpha}{\sum [W - (X_R - X_L)] \tan \alpha} \quad [3.29]$$

Αντίστοιχα από την ισορροπία ροπών (σε σχέση με το σημείο Ο του Σχήματος 3.9), προκύπτει:

$$\sum WR \sin \alpha = \sum TR \quad [3.30]$$

Αντικαθιστώντας και πάλι το T από τη σχέση [3.9] προκύπτει ο συντελεστής F_m από την ισορροπία ροπών:

$$F_m = \frac{\sum (c' l + (P - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad [3.31]$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, θεωρώντας ολική ισορροπία δυνάμεων και ροπών, προκύπτουν δύο τιμές του συντελεστή ασφάλειας. Η επίλυση γίνεται με επαναληπτική μέθοδο. Αρχικά θεωρείται ότι $X_R - X_L = 0$. Έπειτα υπολογίζονται οι τιμές των E , X με βάση τις σχέσεις [3.26] και [3.22]. Για τη σύγκλιση των δύο τιμών στον πραγματικό συντελεστή ευστάθειας του πρανούς, επιλέγονται διάφορες τιμές για τη γωνία θ . Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς δίνεται τελικά για εκείνη την τιμή της γωνίας θ για την οποία οι σχέσεις [3.29] και [3.31] εξισώνονται.

Τελικά, με βάση σχετικές παρατηρήσεις του Spencer σε απλά προβλήματα, ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την ισορροπία ροπών, επηρεάζεται σχετικά λίγο από τη διατμητική δύναμη μεταξύ των λωρίδων. Το γεγονός αυτό συμφωνεί και με την άποψη του Bishop και δικαιολογεί την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου του (Nash, 1987).

Μέθοδος Morgenstern and Price

Οι Morgenstern and Price (1965) περιγράφουν μια μέθοδο ανάλυσης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και σε κυκλικές και σε μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Θεώρησαν ότι

οι δυνάμεις και οι τάσεις ποικίλουν κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, και επιλύοντας κάθετα και παράλληλα στη βάση κάθε λωρίδας, προσδιόρισαν τις εξισώσεις ισορροπίας αρκετά γενικά. Έπειτα έγινε η θεώρηση ότι οι διατμητικές δυνάμεις X μεταξύ των λωρίδων, σχετίζονται με τις κύριες δυνάμεις E :

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x) \quad [3.32]$$

όπου $f(x)$ είναι μια συνάρτηση που μεταβάλλεται συνεχώς κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και λ ένας συντελεστής. Για δεδομένη $f(x)$, προκύπτουν τιμές για τα λ και FS , για τις οποίες ικανοποιείται η ισορροπία δυνάμεων αλλά και η ισορροπία ροπών. Οι Morgenstern and Price υποστηρίζουν ότι ο συντελεστής ασφάλειας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την επιλογή του $f(x)$. Η επιλογή της συνάρτησης $f(x)$, μπορεί να γίνει πιο εύκολα με την υπόθεση ότι οι κύριες τάσεις εφαρμόζονται στα όρια – διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων (Nash, 1987).

3.3 ΕΚΦΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

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

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

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

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

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ****4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

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

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

4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

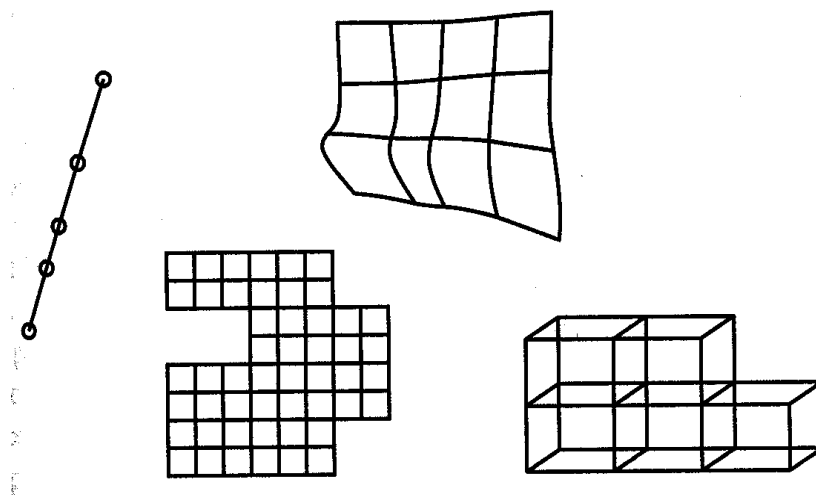
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950. Από τότε βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών. Σήμερα αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων σε πολλούς θεωρητικούς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

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

4.2.1 ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

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

Αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών (Σχήμα 4.1) γνωστών ως «στοιχεία» (elements). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται «κόμβοι» (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση.



Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση σώματος (Αγιουτάντης, 2002)

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

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

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad [4.1]$$

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

Η επίλυση της εξίσωσης [4.1] ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων θα αποδώσει τις τιμές των αγνώστων μεταβλητών. Πριν όμως πραγματοποιηθεί η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας και η επίλυση της εξίσωσης, πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Για παράδειγμα σε προβλήματα στατικών υπολογισμών η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών εμποδίζει ένα σώμα να μετατοπίζεται κατά την εφαρμογή δυνάμεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η λύση της εξίσωσης [4.1] δεν είναι μια απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για να περιγράψουν το μεγάλο αριθμό κόμβων. Δεν είναι υπερβολή να αναφερθεί ότι κάποια προβλήματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται πάνω από 50.000 εξισώσεις. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας δεν είναι εύκολη διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών μεθόδων έχει γίνει εφικτή η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε ικανοποιητικά χρονικά όρια.

Από τη στιγμή που θα λυθεί η εξίσωση [4.1], και θα βρεθούν οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε κόμβο, είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και στη συνέχεια των τάσεων στα στοιχεία. Από αυτές γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων σε όλο το σώμα.

4.2.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

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

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

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των σταδίων που περιγράφηκαν παραπάνω για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

4.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

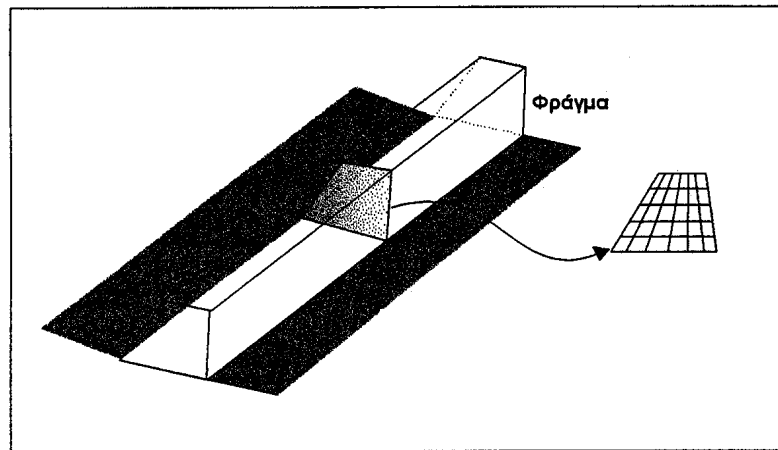
Η διακριτοποίηση αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διακριτοποίησης είναι ο διαμερισμός του υπό εξέταση σώματος σε μικρότερα στοιχεία με τέτοιο τρόπο, ώστε η άγνωστη μεταβλητή να εκπροσωπείται με ικανοποιητικό τρόπο στη μάζα αυτού.

4.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

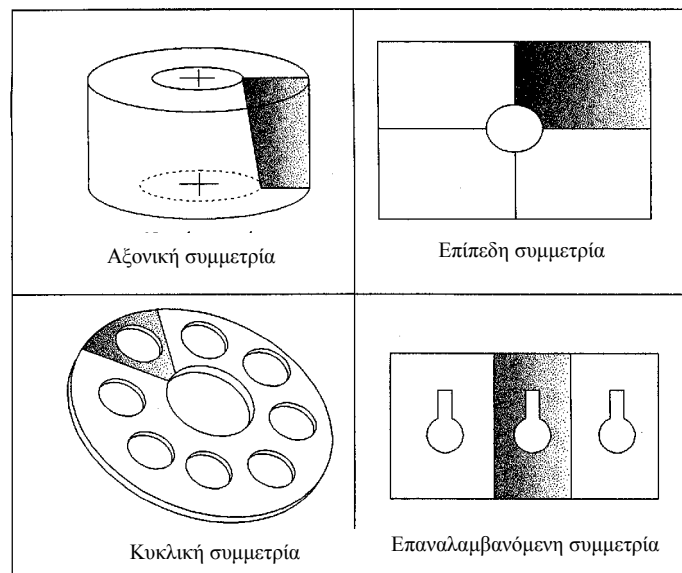
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη διαδικασία της διακριτοποίησης ώστε το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να προσφέρει όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια, στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, οικονομία πεπερασμένων στοιχείων, άρα και του χρόνου ανάλυσης, μπορεί να επιτευχθεί από τη χρήση απλοποιημένης γεωμετρίας και την παρουσία συμμετρίας σ' ένα μοντέλο.

Όλα τα σώματα και οι κατασκευές στην πραγματικότητα αποτελούνται από τρεις διαστάσεις. Πολλές φορές όμως, για λόγους απλότητας και ευκολίας, προβλήματα τριών διαστάσεων ανάγονται στο επίπεδο με μικρή μείωση της ακρίβειας της ανάλυσης. Αν η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε κάποιο σώμα μπορούν να παρασταθούν σε ένα επίπεδο τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο διαστάσεις. Τέτοιου είδους σώματα είναι αυτά που διαθέτουν μια μεγάλη διάσταση σε σχέση με τις άλλες και σε αυτή τη διάσταση η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε αυτή δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Η ανάλυση αυτών μπορεί να γίνει με τη μοντελοποίηση σε επίπεδη τάση ή επίπεδη παραμόρφωση (Σχήμα 4.2).

Εκτός από τη γεωμετρική απλοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο σώμα που μελετάται, υπάρχει και η απλοποίηση λόγω συμμετρίας. Υπάρχουν κυρίως τέσσερα είδη συμμετρίας που συναντώνται στα προβλήματα μηχανικής: η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η επαναλαμβανόμενη (Σχήμα 4.3). Αν η γεωμετρία του σώματος και οι εξωτερικοί παράγοντες όπως είναι τα φορτία που δέχεται το σώμα παρουσιάζουν κάποιο από τα παραπάνω είδη συμμετρίας, μπορεί να αναλυθεί μέρος του σώματος που παρουσιάζει συμμετρία και όχι ολόκληρο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις



Σχήμα 4.2: Μετατροπή προβλήματος τριών διαστάσεων σε δύο.

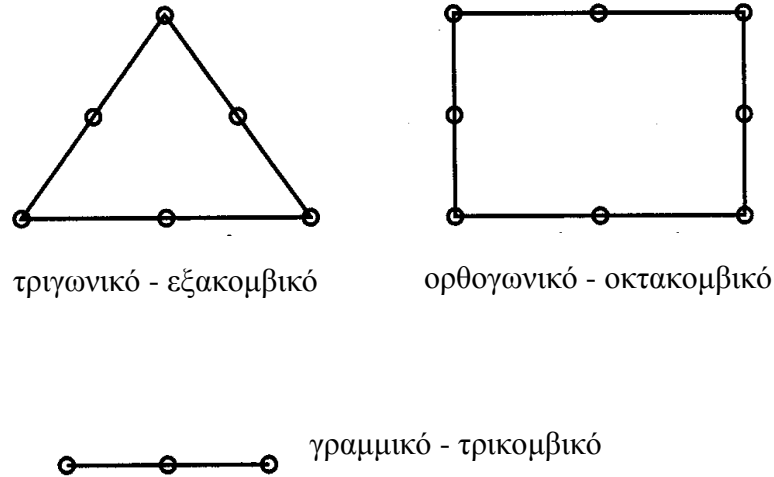


Σχήμα 4.3: Είδη συμμετρίας

συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο μέρος του σώματος που αναλύεται ώστε πραγματικά να αντικατοπτρίζεται η συμμετρία του σώματος.

4.3.2 ΕΙΔΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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



Σχήμα 4.4: Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ (Σχήμα 4.4) (Αγιουτάντης, 2002).

4.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

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

- ✓ Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- ✓ Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου
- ✓ Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου
- ✓ Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου.

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών (Αγιουτάντης, 2002).

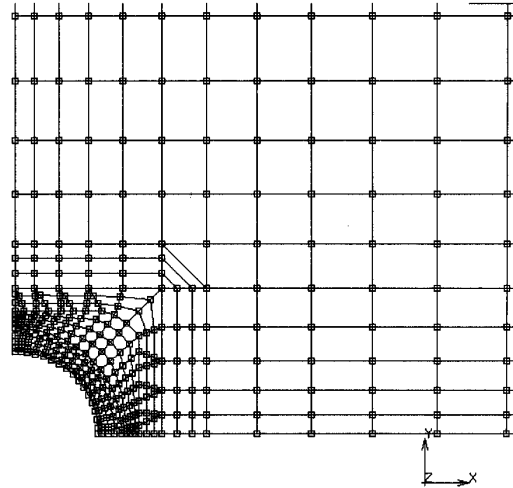
Για παράδειγμα, στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις, συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι κόμβοι σε ένα στοιχείο και να χρησιμοποιηθούν τετραπλευρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους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

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η μεταβαλλόμενη διακριτοποίηση του μέσου, στην περίπτωση προσομοίωσης κυκλικού ανοίγματος (Αγιουτάντης, 2002).

4.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι συναρτήσεις που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσεως των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους ονομάζονται συναρτήσεις μορφής. Οι συναρτήσεις μορφής δηλαδή 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. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις υπολογισμού των λεγόμενων ισοκαμπυλών (π.χ. ισοϋψών, ισοπαχών, κλπ.), με βάση τις τιμές της μεταβλητής σε δεδομένα σημεία, υπάρχουν διαφορετικές συναρτήσεις τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας ερευνητής, για να εκφράσει την επιρροή κάθε σημείου στον περιβάλλοντα χώρο (Αγιουτάντης, 2002).

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



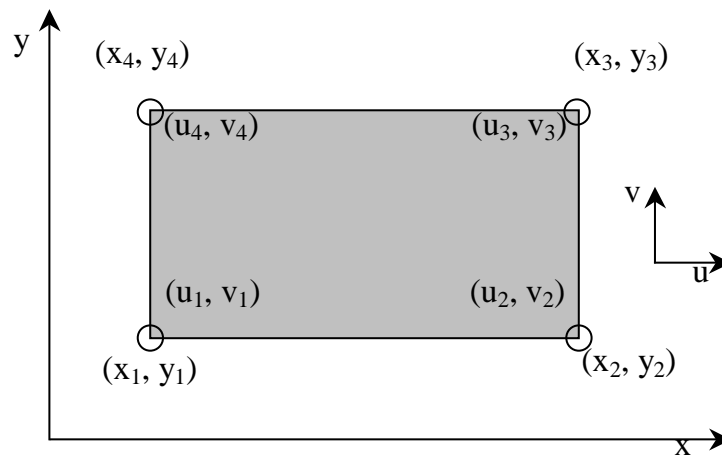
Σχήμα 4.5: Μεταβαλλόμενη γεωμετρία στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Στη γενική περίπτωση, η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των γενικευμένων συντεταγμένων (δηλαδή συντεταγμένων των κόμβων και τιμών στους κόμβους) (Σχήμα 4.6). Στην ακόλουθη σχέση εκφράζεται η μετατόπιση για ένα στοιχείο με τέσσερις κόμβους (Αγιουτάντης, 2002):

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad [4.1]$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{u\} = [\Phi]\{\alpha\} \quad [4.2]$$

Τα $a_1 \dots a_4$ περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1,2,3,4. Αντικαθιστώντας στην σχέση [4.1] τα διανύσματα u , x και y με τις επιμέρους



Σχήμα 4.6: Ενδεικτικές συντεταγμένες κόμβων και άγνωστες μεταβλητές δισδιάστατου στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002)

συνιστώσες τους (σημεία 1,2,3 και 4) προκύπτει:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 + a_4 x_1 y_1 \\ u_2 &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 + a_4 x_2 y_2 \\ u_3 &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 + a_4 x_3 y_3 \\ u_4 &= a_1 + a_2 x_4 + a_3 y_4 + a_4 x_4 y_4 \end{aligned} \quad [4.3]$$

και επομένως:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3 y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4 y_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{q\} = [A]\{a\} \quad [4.4]$$

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

$$\{u\} = [\Phi]\{a\} \Rightarrow \{u\} = [\Phi][A]^{-1}\{q\} \Rightarrow \{u\} = [N]\{q\} \quad [4.5]$$

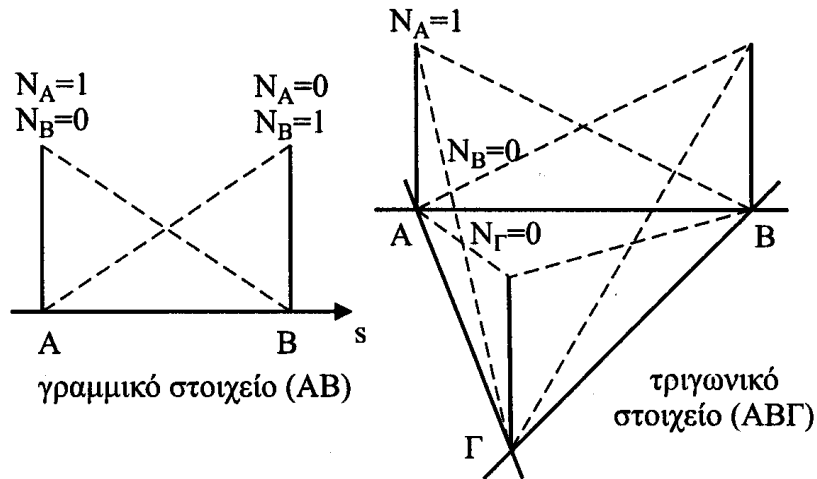
όπου $[N] = [\Phi][A]^{-1}$, δηλαδή

$$u = \sum_{i=1}^4 u_i N_i \quad [4.6]$$

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

Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι οι συναρτήσεις μορφής είναι οι συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων στη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Κατ' αρχάς αναφέρονται στις άγνωστες ποσότητες στους κόμβους αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε ποσότητα η οποία απαιτείται να μεταβληθεί στο εσωτερικό κάθε στοιχείου. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τυπικές γραμμικές συναρτήσεις μορφής. Ο υπολογισμός ή επιλογή των συναρτήσεων μορφής, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- ✓ Εμπειρικά (με επισκόπηση, με δοκιμή και λάθος κλπ.)
- ✓ Επίλυση αριθμητικών συστημάτων της μορφής που φαίνονται στη σχέση [4.5]



Σχήμα 4.7: Γραμμικές συναρτήσεις μορφής (Αγιουτάντης, 2002)

Η εξίσωση [4.7] δίνει τη βασική συνάρτηση μορφής όσον αφορά στις μετατοπίσεις στοιχείων:

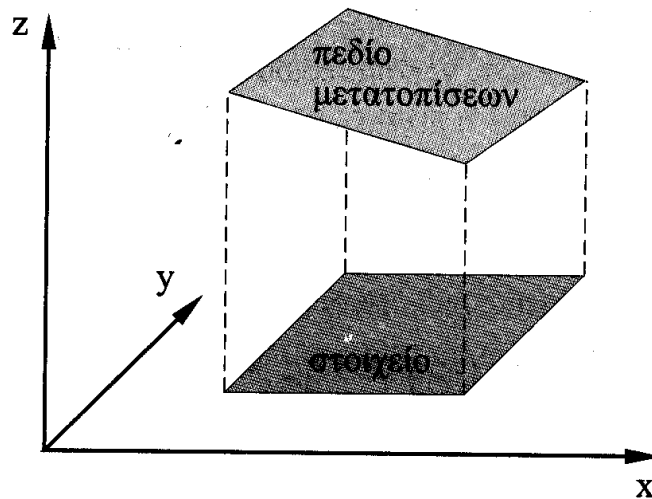
$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad [4.7]$$

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

Η σχέση αυτή πρέπει να ισχύει για όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Επίσης, από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις συναρτήσεις μορφής, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο. Η κάθε συνάρτηση μορφής έχει την ιδιαιτερότητα να μεγιστοποιείται στον κόμβο στον οποίο αντιστοιχεί και να μηδενίζεται στους υπόλοιπους (Σχήμα 4.7). Η χρήση των συναρτήσεων μορφής εξασφαλίζει την ομαλή μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε ένα στοιχείο (Σχήμα 4.8) (Αγιουτάντης, 2002).

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

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} & \text{όπου} & \quad y_{i-1} \leq y \leq y_i \\ N_i &= \frac{y_{i+1} - y}{y_{i+1} - y_i} & \text{όπου} & \quad y_i \leq y \leq y_{i+1} \end{aligned} \quad [4.8]$$



Σχήμα 4.8: Γραμμική μεταβολή μετατοπίσεων σε τετραπλευρικό στοιχείο (Αγιουτάντης, 2002)

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

$$N_i = \frac{(y - y_{i+1})(y - y_{i+2})}{(y_i - y_{i+1})(y_i - y_{i+2})} \quad [4.9]$$

4.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

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

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

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

✓ Η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους $\{u_i\}$, από τη σχέση [4.7].

✓ Η παραμόρφωση σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \quad [4.10]$$

✓ Η καταστατικές εξισώσεις συμπεριφοράς που παρίστανται από σχέσεις της μορφής:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \quad [4.11]$$

το οποίο μπορεί να γραφεί υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad [4.12]$$

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

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

$$\Delta \text{δυναμική ενέργεια} = \text{Εσωτερική ενέργεια} - \text{Έργο δυνάμεων}$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις ανήκουν σε τρεις κατηγορίες:

- ✓ δυνάμεις πεδίου (π.χ. βαρυτικές)
- ✓ τάσεις (π.χ. υδροστατική)
- ✓ σημειακές δυνάμεις

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

$$\Pi_p = \iiint \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dx dy dz - \iiint \{F\} dx dy dz - \iint \{T\} dx dy - \sum_i F_i u_i \Rightarrow$$

$$\Pi_p = \int_V \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dV - \int_V \{F\} dV - \int_A \{T\} dS - \sum_i F_i u_i \quad [4.13]$$

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

Η ελαχιστοποίηση της δυναμικής ενέργειας που υποδηλώνει ισορροπία προκύπτει από το διαφορικό της [4.13], ή καλύτερα:

$$\delta \Pi_p = 0 \Rightarrow \frac{\partial \Pi_p}{\partial \{q\}} = 0 \quad [4.14]$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις τελικά προκύπτει ότι:

$$U = \frac{1}{2} \{q\}^T [K] \{q\} \quad [4.15]$$

όπου:

$$K = h \iint_A [B]^T [C] [B] dx dy \quad [4.16]$$

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

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

h = το πάχος του στοιχείου

A = η επιφάνεια του στοιχείου

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

Η εφαρμογή της σχέσης [4.14] απαιτεί τη διαφορίση της δυναμικής ενέργειας Π_p ως προς κάθε συνιστώσα του διανύσματος $\{q\}$. Εφαρμόζοντας την παραπάνω λογική για μια από τις n αυτές εξισώσεις και για τον όρο U προκύπτει (Αγιουτάντης, 2002):

$$\frac{\partial U}{\partial q_1} = 0 \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial q_1} = 2q_1 K_{11} + \dots + 2q_n K_{n1} = 0 \quad [4.17]$$

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

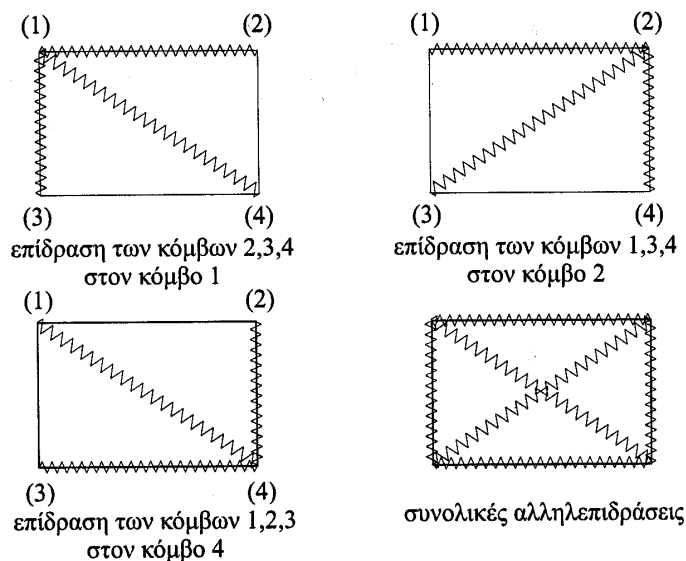
Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία για όλους τους βαθμούς ελευθερίας, που ουσιαστικά αποτελείτο κριτήριο της ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας κάθε στοιχείου (χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σώματος σε ισορροπία), προκύπτει η ακόλουθη σχέση η οποία συνδέει τη δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος και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

$$\{F\} = [K]\{q\} \quad [4.18]$$

Η φυσική σημασία του μητρώου $[K]$ δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 4.9, όπου οι συντελεστές του μητρώου K_{ij} αποτελούν ισοδύναμες σταθερές ιδεατών ελατηρίων τα οποία συνδέουν τους κόμβους (βαθμούς ελευθερίας) μεταξύ τους (Αγιουτάντης, 2002).

4.6 ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Από τη στιγμή που οι καταστατικές εξισώσεις των στοιχείων έχουν δημιουργηθεί και έχουν συσχετιστεί, για το σχηματισμό του συστήματος των εξισώσεων όλου του μοντέλου και για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να ενσωματωθούν και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Το σύστημα των εξισώσεων δεν είναι δυνατόν να λυθεί χωρίς την εφαρμογή τους, γιατί τότε το μητρώο ακαμψίας δεν μπορεί να αντιστραφεί. Η φυσική σημασία της αδυναμίας αντιστροφής του μητρώου ακαμψίας, χωρίς την εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στα προβλήματα τάσεων, είναι η ανεξέλεγκτη κίνηση με τη μορφή άκαμπτου σώματος. Πρέπει δηλαδή να εφαρμοστούν περιοριστικές δυνάμεις ώστε να κρατούν το μοντέλο σε ισορροπία.



Σχήμα 4.9: Φυσική σημασία μητρώου ακαμψίας τετραπλευρικού στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002)

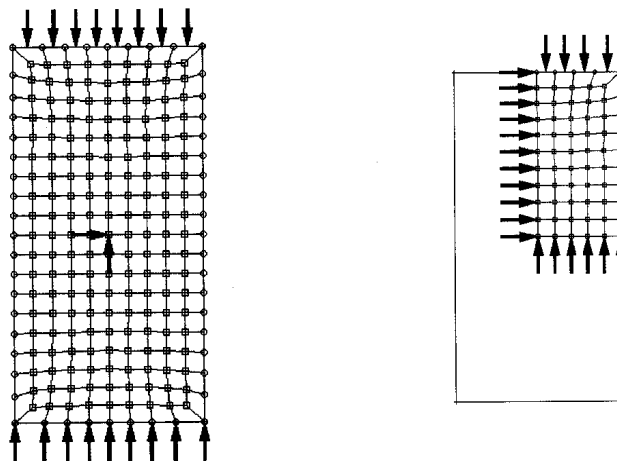
Η φόρτιση των υλικών ή αντίστοιχα η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

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

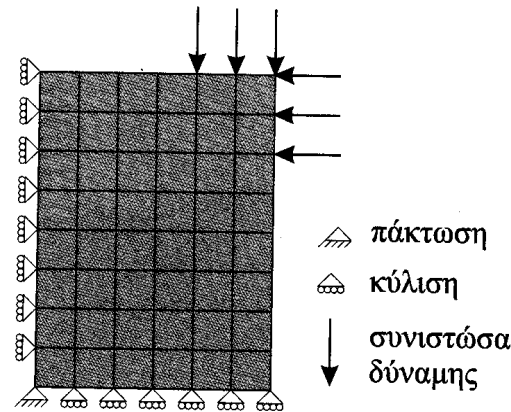
Όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν κατάλληλα σε κομβικές, οι οποίες συμμετέχουν στην επίλυση κάθε προβλήματος. Στο Σχήμα 4.10 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται κατά την προσομοίωση φόρτισης κυλινδρικού δοκιμίου σε δύο διαστάσεις, όπου με την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, μπορεί να αξιοποιηθεί η συμμετρία του ορθογωνικού μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

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



Σχήμα 4.10: Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.11: Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002).

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

$$\begin{aligned} u_x &= u_0 \\ u_y &= v_0 \end{aligned} \quad [4.19]$$

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

$$\begin{aligned} f_x &= f_0 \\ f_y &= w_0 \end{aligned} \quad [4.20]$$

όπου f_x και f_y οι κομβικές δυνάμεις και f_0 , w_0 οι αντίστοιχες συνιστώσες δυνάμεων που επιβάλλονται στον κόμβο

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται ο τυπικός συμβολισμός των συνοριακών συνθηκών στις περιπτώσεις προβλημάτων φορτίσεων - παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης.

4.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στις ενότητες που ακολουθούν, περιγράφονται κάποια από τα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών. Στο σημείο αυτό, θεωρείται απαραίτητος ο ορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα αυτά, για την πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών και δεδομένου ότι τα μεγέθη αυτά θα αναφερθούν αρκετές φορές στη συνέχεια κατά την περιγραφή της ανάλυσης που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

4.7.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG

Όταν σε ένα σώμα ασκηθούν βραδέως και προοδευτικά 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, δημιουργείται 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 (Σχήμα 4.12). Είναι:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [4.21]$$

όπου: E = το μέτρο ελαστικότητας του Young

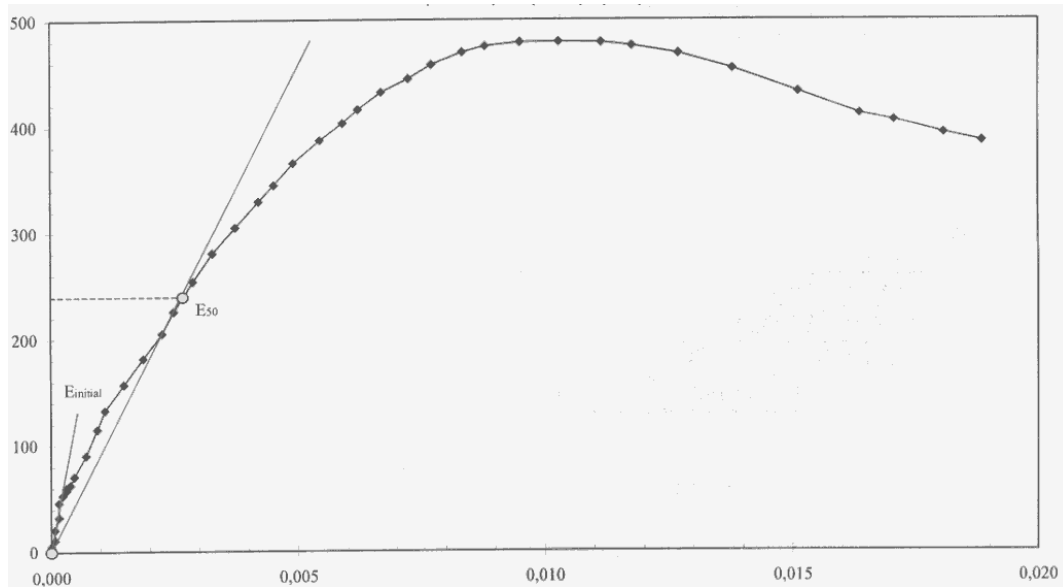
$d\sigma$ = η μεταβολή της τάσης για τη γραμμική περιοχή της καμπύλης

$d\varepsilon$ = 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 που αυτό δέχεται είναι μικρότερες του 0,002%.

4.7.2 ΛΟΓΟΣ POISSON

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 . Έχουμε συνεπώς, σε ομοιογενή και ισότροπα υλικά, ελαστικά καταπονούμενα:



Σχήμα 4.12: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας (Καλογήρου, 2000)

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad [4.22]$$

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

4.7.3 ΣΥΝΟΧΗ

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).

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 την τομή της περιβάλλουσας αστοχίας του Mohr με τον άξονα των τεταγμένων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13.

Η εξίσωση που περιγράφει την περιβάλλουσα αστοχίας του Mohr είναι:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [4.23]$$

όπου: τ = η διατμητική αντοχή του εδάφους,

c = η συνοχή του εδάφους,

σ = η κάθετη τάση στο επίπεδο διάτμησης και

φ = η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, η οποία ορίζεται στη συνέχεια.

4.7.4 ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ

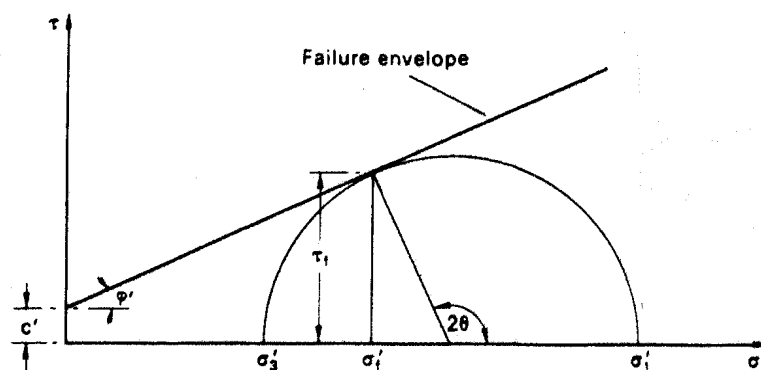
Η διατμητική αντοχή ενός εδαφικού υλικού εξαρτάται εκτός από τη συνοχή του και από την τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και την αλληλοεμπλοκή τους που οφείλεται στο σχήμα τους. Αυτό το εσωτερικό αίτιο ονομάζεται εσωτερική τριβή και το μέγεθός του εξαρτάται από το κάθετο φορτίο 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).

Γραφικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13, η γωνία εσωτερικής τριβής υπολογίζεται από την κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας του Mohr, ενώ συνδέεται με τη συνοχή με τη σχέση 4.23.

4.7.5 ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η γωνία διασταλτικότητα 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



Σχήμα 4.13: Κριτήριο Coulomb και γραφικός υπολογισμός συνοχής (Craig, 1997)

ανηγμένης παραμόρφωσης ($d\gamma$) ως ακολούθως (Craig, 1997):

$$\sin \psi = \frac{d\varepsilon_1 + d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3} = -\frac{d\varepsilon_v}{d_\gamma} \quad [4.24]$$

Σε διάγραμμα μεταβολής όγκου συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης η γωνία διασταλτικότητας υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης σε κάθε σημείο της καμπύλης. Για χαλαζιακές άμμους η σχέση μεταξύ γωνίας εσωτερικής τριβής και γωνίας διασταλτικότητας είναι $\psi = \phi - 30^\circ$. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, η γωνία διασταλτικότητας είναι μηδέν για τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής μικρότερες των 30° . Για ιδιαίτερα χαλαρές άμμους, η γωνία διασταλτικότητας μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές (Plaxis Manual, 1998).

4.8 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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

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

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad [4.25]$$

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

E = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού,

ν = ο λόγος Poisson του υλικού,

ε_{ij} = ο τανυστής των παραμορφώσεων,

ε_{kk} = το άθροισμα των κυρίων παραμορφώσεων,

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

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι:

$$\sigma = E\varepsilon \quad [4.26]$$

όπου: σ = η τάση που επιβάλλεται στο υλικό,

E = το μέτρο ελαστικότητάς του,

ε = η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται.

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

4.9 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

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

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

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

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

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

4.9.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ MOHR – COULOMB

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

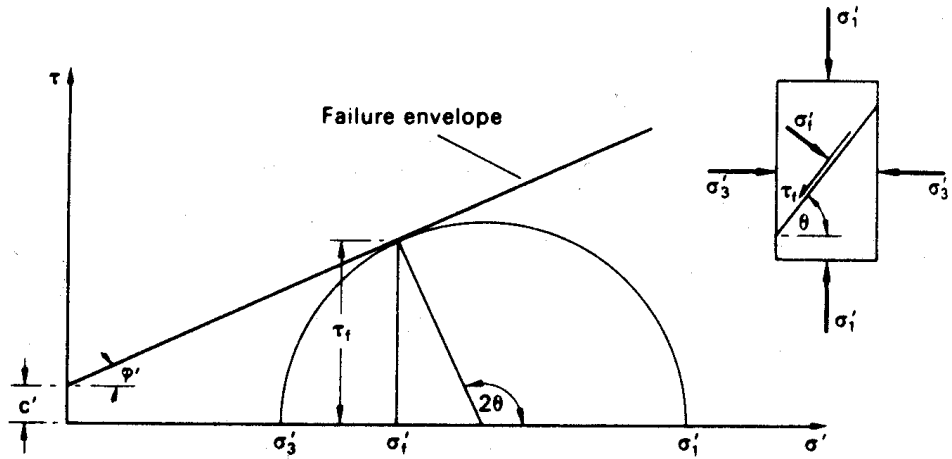
$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [4.27]$$

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

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad [4.28]$$

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

Η διατμητική αντοχή ενός εδάφους μπορεί επίσης να εκφραστεί μέσω των ενεργών μεγίστων και ελαχίστων κυρίων τάσεων (σ_1' και σ_3') κατά την αστοχία σε δεδομένο σημείο. Κατά την αστοχία η ευθεία που προκύπτει από την σχέση [4.28] θα εφάπτεται στον κύκλο του Mohr αντιπροσωπεύοντας την εντατική κατάσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12, θεωρώντας τις θλιπτικές τάσεις ως θετικές. Οι συντεταγμένες του σημείου τομής της εφαπτόμενης με τον κύκλο του Mohr είναι οι τ_f και σ_f' , όπου:



Σχήμα 4.14: Εντατική κατάσταση κατά την αστοχία (Craig, 1997)

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin 2\theta \quad [4.29]$$

$$\sigma'_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\theta \quad [4.30]$$

και θ είναι η θεωρητική γωνία μεταξύ του επιπέδου της μέγιστης κύριας τάσης και του επιπέδου αστοχίας. Είναι προφανές ότι:

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \quad [4.31]$$

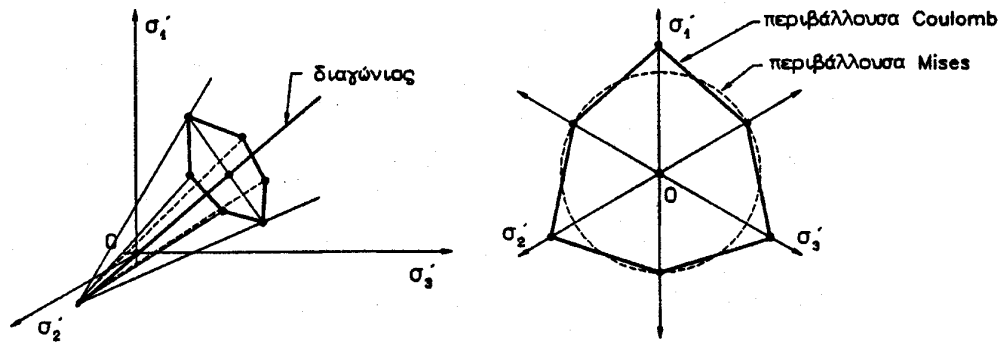
Από το Σχήμα 4.14 μπορεί να προκύψει η σχέση μεταξύ των ενεργών κυρίων τάσεων κατά την αστοχία και των παραμέτρων της διατμητικής αντοχής. Έτσι:

$$\sin \phi' = \frac{\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{c' \cot \phi' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)} \quad [4.32]$$

Οπότε,

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' + 2c' \cos \phi' \quad [4.33]$$

Η σχέση [4.33] αναφέρεται ως το κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb. Στην περίπτωση που είναι γνωστός ένας μεγάλος αριθμός εντατικών καταστάσεων που οδηγούν σε αστοχία για κάποιο υλικό, μπορεί να σχεδιαστεί μια περιβάλλουσα στους αντίστοιχους κύκλους του Mohr, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση [4.28]. Η ευθεία αυτή ονομάζεται φάκελος αστοχίας και αντιπροσωπεύει το συνδυασμό τάσεων που οδηγούν σε αστοχία. Το κριτήριο δεν λαμβάνει υπόψη του τις παραμορφώσεις πριν και κατά την αστοχία, και θεωρεί ότι η ενδιάμεση ενεργή κύρια τάση σ'_2 δεν επηρεάζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους (Craig, 1997).



Σχήμα 4.15: Κριτήριο αστοχίας Coulomb (Καββαδάς, 2000)

Στη γενική περίπτωση, κατά την οποία δεν γίνεται καμία παραδοχή ως προς τα σχετικά μεγέθη των κυρίων τάσεων, οι κρίσιμοι συνδυασμοί αστοχίας παριστάνονται γραφικά στον τρισδιάστατο χώρο των κυρίων τάσεων σ_1' , σ_2' , σ_3' με τη στρεβλή εξάπλευρη πυραμίδα που φαίνεται στο Σχήμα 4.15 (Καββαδάς, 2000).

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).

4.9.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ TRESCA (ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ)

Ιστορικά, το πρώτο κριτήριο αστοχίας προτάθηκε το 1864 από τον Tresca για μεταλλικά υλικά. Με βάση λοιπόν 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). Δηλαδή:

$$k = \text{Max} \left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right) \quad [4.34]$$

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

$$k = \frac{\sigma_o}{2} \quad [4.35]$$

όπου σ_0 είναι η μέγιστη αντοχή στην απλή δοκιμή εφελκυσμού. Υπάρχουν έξι διαφορετικές εκφράσεις της σχέσης [4.35] σε διάφορες περιοχές του επιπέδου $\sigma_1 - \sigma_2$, που εξαρτώνται από τα σχετικά μεγέθη και χαρακτηριστικά των τάσεων σ_1 και σ_2 (Σχήμα 4.16). Στο πρώτο τεταρτημόριο, μεταξύ του άξονα σ_1 και της διαγωνίου του τεταρτημορίου, ισχύει ότι (Chen and Han, 1988):

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2} \quad [4.36]$$

Έτσι, το κριτήριο αστοχίας γίνεται $\sigma_1 = \sigma_0$ και δίνει το ευθύγραμμο τμήμα AB. Στο ίδιο τεταρτημόριο, μεταξύ της διαγωνίου και του άξονα σ_2 , είναι:

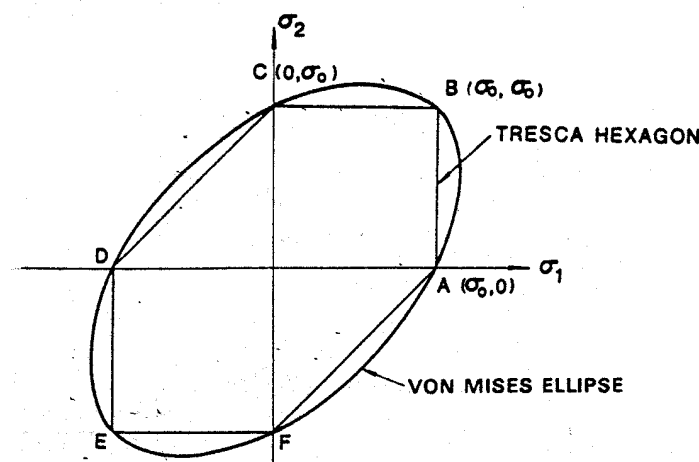
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_2}{2} \quad [4.37]$$

και το κριτήριο αστοχίας $\sigma_2 = \sigma_0$ απεικονίζεται με το ευθύγραμμο τμήμα BC. Στο δεύτερο τεταρτημόριο είναι:

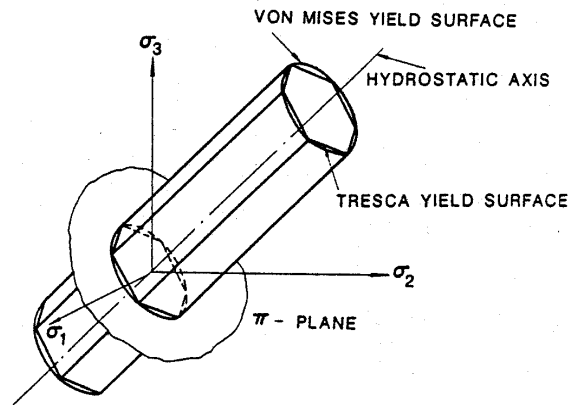
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \quad [4.38]$$

Έτσι, το κριτήριο αστοχίας γίνεται $\sigma_2 - \sigma_1 = \sigma_0$ και σχηματίζεται το ευθύγραμμο τμήμα CD. Με βάση την παραπάνω διαδικασία και δουλεύοντας ανάλογα για το τρίτο και τέταρτο τεταρτημόριο, προκύπτει ότι η περιοχή αστοχίας για επίπεδη τάση είναι το εξάγωνο ABCDEF, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.16.

Στο χώρο των κυρίων τάσεων, η επιφάνεια αστοχίας είναι ένα κανονικό εξαγωνικό πρίσμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.17. Η περιοχή αστοχίας για την περίπτωση που



Σχήμα 4.16: Κριτήρια αστοχίας στο επίπεδο $\sigma_3=0$ (Chen and Han, 1988).



Σχήμα 4.17: Επιφάνειες αστοχίας στο χώρο των κυρίων τάσεων (Chen and Han, 1988).

λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_2 είναι η τομή του πρίσματος αυτού με το επίπεδο $\sigma_3 = 0$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16 (Chen and Han, 1988).

4.9.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ VON MISES

Παρόλο που το κριτήριο της μέγιστης διατμητικής τάσης (κριτήριο Tresca) είναι απλό, δεν είναι αντιπροσωπευτικό για οποιαδήποτε επιρροή της ενδιάμεσης κύριας τάσης στο υλικό. Η οκταεδρική διατμητική τάση ή η ενέργεια παραμόρφωσης είναι μια εναλλακτική επιλογή «κλειδί» έναντι της μέγιστης διατμητικής τάσης, όσον αφορά την αστοχία υλικών. Το κριτήριο αστοχίας του Von Mises, που χρονολογείται από το 1913, αποτελεί αυτή την εναλλακτική και θεωρεί ότι η αστοχία σε ένα υλικό ξεκινά όταν η οκταεδρική διατμητική τάση αγγίζει μια κρίσιμη τιμή k . Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση (Chen and Han, 1988):

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}}k \quad [4.39]$$

ή αλλιώς, συναρτήσει των κυρίων τάσεων είναι:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad [4.40]$$

όπου k είναι η τάση αστοχίας σε διάτμηση. Η τάση αστοχίας σε μια δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού είναι $\sigma_1 = \sigma_o$, ενώ επίσης $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην σχέση [4.40], προκύπτει ότι:

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad [4.41]$$

Η σχέση μεταξύ της τάσης αστοχίας σε διάτμηση σ_o και της σταθεράς k στην περίπτωση του κριτηρίου αστοχίας του Von Mises (σχέση [4.40]) και σε αυτή του Tresca (σχέση [4.34]), διαφέρει. Στην περίπτωση που τα δύο κριτήρια συμφωνούν όσο

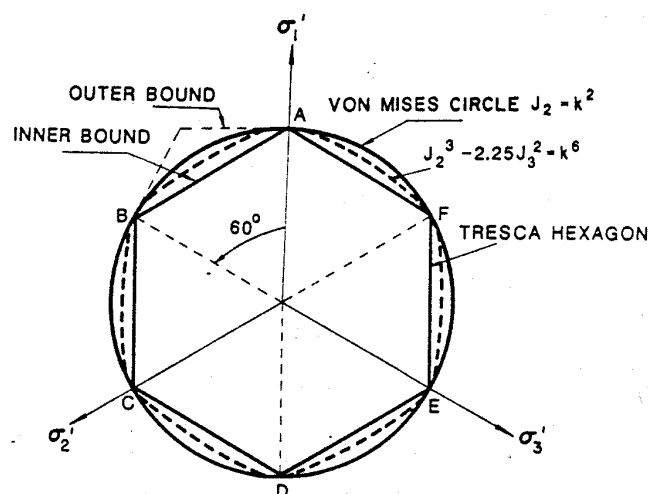
αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό σ_0 , η αναλογία της τάσης αστοχίας σε διάτμηση k , μεταξύ των κριτηρίων Von Mises και Tresca είναι $2/\sqrt{3} = 1.15$. Γραφικά ο κύκλος του κριτηρίου Von Mises περικλείει το εξάγωνο του κριτηρίου Tresca όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18. Παρ' όλ' αυτά, στην περίπτωση που 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 4.17, όπου απεικονίζονται μαζί τα κριτήρια των Tresca-Von Mises.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα κριτήρια αστοχίας των Tresca και Von Mises, είναι ανεξάρτητα της υδροστατικής πίεσης σε αντίθεση με αυτό των Mohr – Coulomb που περιγράφηκε παραπάνω και των Drucker – Prager που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

4.9.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ DRUCKER – PRAGER

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



Σχήμα 4.18: Γραφική απεικόνιση κριτηρίων αστοχίας Von Mises και Tresca στο χώρο των ενεργών τάσεων (Chen and Han, 1988).

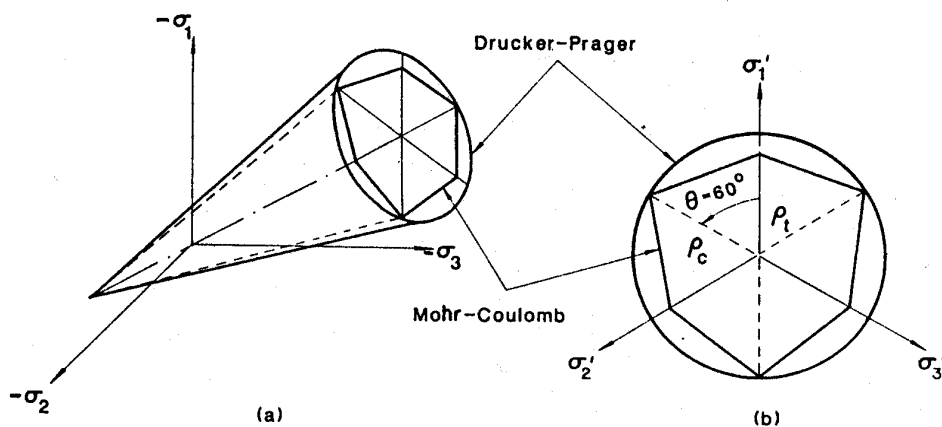
$$f(\xi, \rho) = \sqrt{6}\alpha\xi + \rho - \sqrt{2}k = 0 \quad [4.42]$$

όπου α , k σταθερές του υλικού. Όταν η παράμετρος α μηδενιστεί, η σχέση [4.42] μετατρέπεται στο κριτήριο Von Mises. Η επιφάνεια αστοχίας στο χώρο των κυρίων τάσεων είναι ένας κώνος με κυκλική βάση. Ανάλογα με τις τιμές των σταθερών α , k ο κώνος του κριτηρίου Drucker – Prager μπορεί να είναι εγγεγραμμένος ή περιγεγραμμένος του εξαγωνικού κώνου του κριτηρίου Mohr – Coulomb. Παρ' όλ' αυτά, η προσέγγιση που δίνεται είτε από τον εσωτερικό ή από τον εξωτερικό στην επιφάνεια αστοχίας του Mohr – Coulomb κώνου, μπορεί να είναι ελλιπής για ορισμένες εντατικές καταστάσεις. Στο Σχήμα 4.19 φαίνονται τα κριτήρια Drucker – Prager και Mohr – Coulomb στο χώρο των κύριων και ενεργών τάσεων.

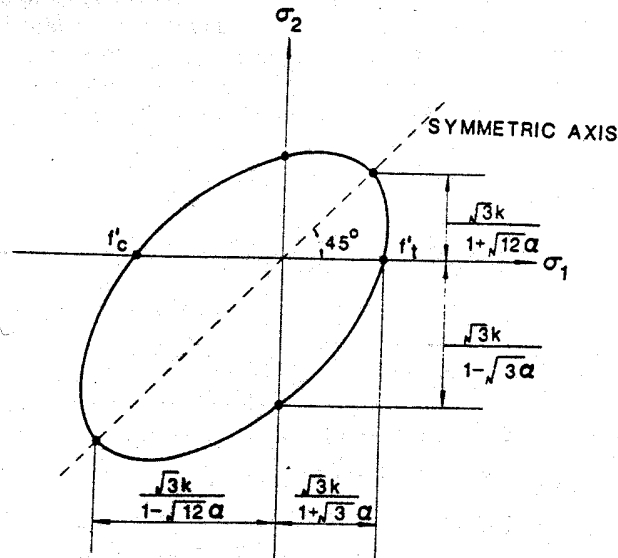
Η εξαγωνική επιφάνεια αστοχίας των Mohr – Coulomb, βολεύει μόνο σε προβλήματα στα οποία είναι προφανές ποια από τις έξι πλευρές του εξαγώνου χρησιμοποιείται. Αν αυτή η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη εξαρχής, οι γωνίες του εξαγώνου μπορεί να δημιουργήσουν σημαντική δυσκολία και να προκαλέσουν περιπλοκές στην προσπάθεια αριθμητικής επίλυσης. Το κριτήριο Drucker – Prager ως μια ομαλή προσέγγιση του κριτηρίου Mohr – Coulomb, μπορεί να συνδυαστεί με το τελευταίο, αν μεταβληθεί το μέγεθος του κώνου (Chen and Han, 1988).

Το κριτήριο Drucker – Prager σε μια διαξονική εντατική κατάσταση αντιπροσωπεύεται από την τομή του κώνου με το επίπεδο $\sigma_3 = 0$. Έτσι, η σχέση [4.42] μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των κυρίων τάσεων σ_1 και σ_2 ως:

$$\alpha(\sigma_1 + \sigma_2) + \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)} = k \quad [4.43]$$



Σχήμα 4.19: Κριτήρια Drucker – Prager και Mohr – Coulomb στο χώρο των κύριων τάσεων (Chen and Han, 1988).



Σχήμα 4.20: Κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager στο επίπεδο $\sigma_3 = 0$ (επίπεδη τάση) (Chen and Han, 1988).

ή αλλιώς:

$$(1 - 3\alpha^2)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - (1 + 6\alpha^2)\sigma_1\sigma_2 + 6k\alpha(\sigma_1 + \sigma_2) - 3k^2 = 0 \quad [4.44]$$

που είναι μια έλλειψη όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 4.20.

4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων από την άλλη, έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της παραμόρφωσης και της κατανομής των τάσεων σε ένα υλικό. Σε αντίθεση με τις απλουστευμένες μεθόδους, η προσέγγιση με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αντιμετωπίσει σύνθετες ακολουθίες φόρτισης υλικών καθώς και την ανάπτυξη μη ελαστικών ζωνών σε αυτά συναρτήσει του χρόνου. Τέτοια προβλήματα είναι τα προβλήματα ευστάθειας πρανών, για τα οποία δεν έχουν γίνει πολλές προσπάθειες επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Kim and Lee, 1997).

Ακολουθούν κάποιες εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσπάθεια ανεύρεσης κρίσιμων επιφανειών σε πρανή και εκτίμησης του αντίστοιχου συντελεστή ασφάλειας αυτών.

4.10.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΠΡΑΝΟΥΣ

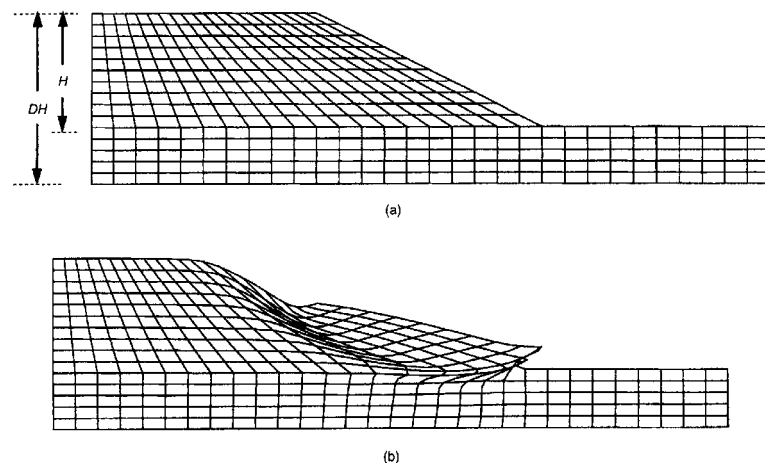
Οι Griffiths και Lane (1999), πραγματοποίησαν μια ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ενός ομογενούς εδαφικού πρανού. Στο Σχήμα 4.21, απεικονίζεται το πρανές αυτό, ενώ φαίνεται ο κάνναβος των στοιχείων που προέκυψε από τη διακριτοποίησή του.

Όσον αφορά τη γεωμετρία αυτού, δίνονται τα σχετικά μεγέθη, οι αναλογίες δηλαδή των διαστάσεων. Συγκεκριμένα, το πάχος του στρώματος έδρασης είναι ίσο με το μισό του ύψους (H) του πρανού, η κλίση του πρανού είναι ίση με 2:1 ενώ αυτό έχει βάθος κάτω από την επιφάνεια έδρασής του ίσο με το 1,2 του ύψους του. Οι ιδιότητες των υλικών που δίνονται είναι η γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 20^\circ$ και το πηλίκο

$\frac{c}{\gamma H} = -0,05$. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο είναι η πάκτωση

της βάσης του και η κύλιση στο αριστερό κατακόρυφο όριο αυτού. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του ίδιου του βάρους του πρανού, ενώ ο συντελεστής ασφάλειας αυτού προκύπτει με βάση τη μέθοδο της σταδιακής μείωσης της διατμητικής αντοχής του, από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$c_f' = \frac{c}{FOS} \quad [4.45]$$



Σχήμα 4.21: Ομογενές πρανές κλίσης 2:1. (a) αρχικός κάνναβος (b) παραμορφωμένος κάνναβος. Συντελεστής ασφάλειας $FOS = 1,4$ (Griffiths και Lane, 1999).

$$\phi_f' = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{FOS}\right) \quad [4.46]$$

όπου: c, ϕ = οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του υλικού

c_f', ϕ_f' = οι μειούμενες παράμετροι διατμητικής αντοχής

FOS = ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς (Factor of safety)

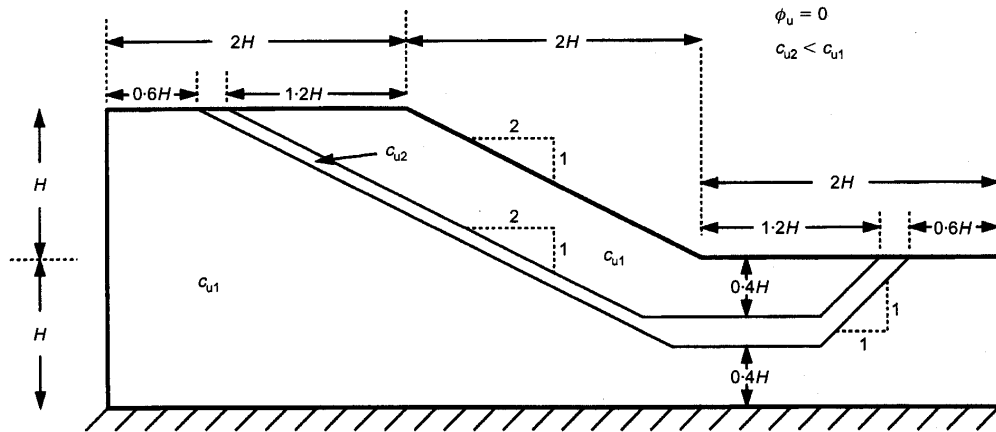
Στο Σχήμα 4.21 απεικονίζεται ο αρχικός και ο παραμορφωμένος κάρναβος του μοντέλου. Είναι εμφανές ότι ο τύπος παραμόρφωσης του πρανούς ακολουθεί το μηχανισμό της αστοχίας στη βάση αυτού. Ο συντελεστής ασφάλειας που προέκυψε για το δεδομένο πρανές είναι ίσος με $FOS = 1,4$.

Το παράδειγμα αυτό επιδεικνύει ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έναντι των συμβατικών μεθόδων, όσον αφορά την ανάλυση της ευστάθειας πρανών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν απαιτεί την εκ των προτέρων θεώρηση της θέσης και του σχήματος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Η αστοχία εμφανίζεται «φυσικά» μέσα στις ζώνες της εδαφικής μάζας στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι ανεπαρκής να αντισταθεί στη διατμητική τάση που εφαρμόζεται σε αυτό (Griffiths and Lane, 1999).

4.10.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΗ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΟΥ ΑΡΓΙΑΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΗΣ ΕΝΣΤΡΩΣΗΣ

Η επίλυση του μοντέλου αυτού, όπως και του προηγούμενου, έγινε επίσης από τους Griffiths και Lane (1999), αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιώντας ανάλυση ολικών τάσεων και με βάση το κριτήριο αστοχίας του Tresca ($\phi_u = 0$).

Το Σχήμα 4.22, απεικονίζει το μοντέλο του πρανούς της μη αποστραγγιζόμενης αργίλου. Το πρανές περιλαμβάνει ένα λεπτό στρώμα ασθενέστερου υλικού, το οποίο αρχικά έχει διεύθυνση παράλληλη με το μέτωπο του πρανούς, οριζοντιώνεται κάτω από το πόδι αυτού και τέλος βγαίνει στη οριζόντια επιφάνεια δεξιότερα της βάσης αυτού, με μια κλίση 45° . Παρόλο που το παράδειγμα αυτό μπορεί να φαίνεται απίθανο, είναι αρκετές οι περιπτώσεις στο ύπαιθρο στις οποίες εμφανίζονται λεπτές ενστρώσεις ασθενών υλικών σε εδαφικά πρανή. Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς εκτιμήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για ένα εύρος τιμών της διατμητικής



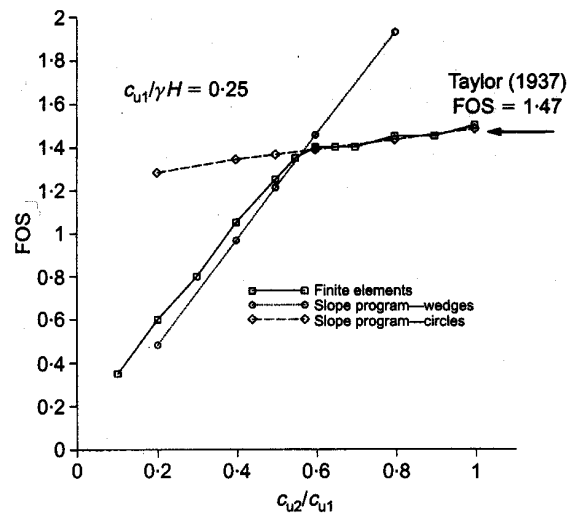
Σχήμα 4.22: Μη αποστραγγιζόμενο αργιλικό πρανές με λεπτή ασθενή ένστρωση (Griffiths and Lane, 1999).

αντοχής του λεπτού στρώματος (c_{u2}) ενώ η αντοχή της αργίλου διατηρήθηκε σταθερή και ίση με $\frac{c_{u1}}{\gamma H} = 0.25$ (Griffiths and Lane, 1999).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.23, όπου ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται με ακρίβεια 0,05. Για ομογενές πρανές, στην περίπτωση δηλαδή που $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} = 1$, ο συντελεστής ασφάλειας έχει

τιμή $FOS = 1,47$ και ο τύπος της αστοχίας ακολουθεί το μηχανισμό της κυκλικής επιφάνειας που καταλήγει στο πόδι του πρανούς. Κατά τη διαδικασία όμως της σταδιακής μείωσης της αντοχής του λεπτού στρώματος, πραγματοποιήθηκε μια έντονη μεταβολή της φύσης των αποτελεσμάτων, ειδικά όταν η αναλογία αντοχών έγινε $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} \approx 0,6$ (Griffiths and Lane, 1999).

Στο Σχήμα 4.23, φαίνονται επίσης για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα από την επίλυση των ίδιων μοντέλων με τη μέθοδο του Janbu για κυκλική και σφηνοειδή επιφάνεια ολίσθησης. Όταν η αναλογία των αντοχών είναι ίση με 0,6 φαίνεται ότι η μετάβαση από τον κυκλικό στο μη κυκλικό μηχανισμό αστοχίας εξαρτάται από το λεπτό εδαφικό στρώμα. Όταν η αναλογία αυτή είναι μεγαλύτερη του 0,6 η αστοχία ακολουθεί τον κυκλικό μηχανισμό, επομένως ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς, μένει ανεπηρέαστος από την ύπαρξη της ένστρωσης. Τέλος, στην περίπτωση που η αναλογία των αντοχών των υλικών είναι μικρότερη του 0,6 ο μηχανισμός αστοχίας



Σχήμα 4.23: Συντελεστής ασφάλειας συναρτήσει της αναλογίας $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$ (Griffiths and Lane, 1999).

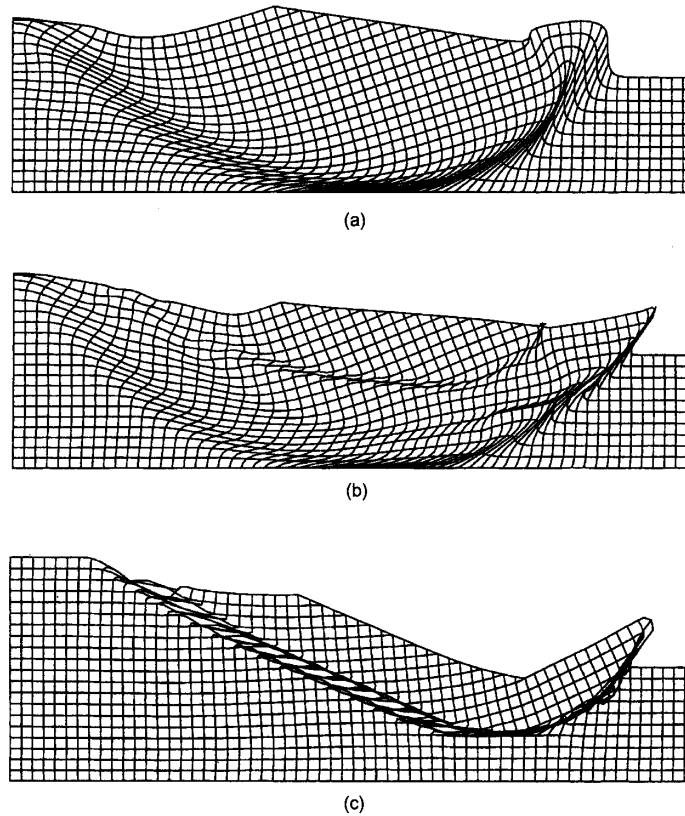
είναι μη κυκλικός και ο συντελεστής ασφάλειας μειώνεται γραμμικά (Griffiths and Lane, 1999).

Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο αντιληπτά με βάση το Σχήμα 4.24, το οποίο απεικονίζει τον παραμορφωμένο δικτύωμα στοιχείων για τρεις διαφορετικές αναλογίες αντοχών. Στο Σχήμα 4.24(a), που αντιστοιχεί στην περίπτωση του ομογενούς υλικού, η επιφάνεια ολίσθησης είναι κυκλική και εφαπτόμενη στη σταθερή βάση του μοντέλου. Στο Σχήμα 4.24(c), στο οποίο η αντοχή του λεπτού στρώματος είναι μόλις το 20% της αντοχής της υπόλοιπης εδαφικής μάζας, εμφανίζεται ένας μη κυκλικός μηχανισμός αστοχίας, ο οποίος ακολουθεί τη διαδρομή της διεύθυνσης της λεπτής ένστρωσης.

Τέλος, στο Σχήμα 4.24(b), στο οποίο η αντοχή του λεπτού στρώματος είναι το 60% της αντοχής της υπόλοιπης εδαφικής μάζας, παρουσιάζεται αξιοσημείωτη περιπλοκότητα. Τουλάχιστον δύο αντικρουόμενοι μηχανισμοί είναι παρόντες, με τον πρώτο από αυτούς να διέρχεται από τη βάση του μοντέλου και να τέμνει το λεπτό στρώμα κάτω από το πόδι του πρανούς, ενώ ο δεύτερος δημιουργεί μια επιφάνεια ολίσθησης μέσα στη μάζα του λεπτού στρώματος, η οποία καταλήγει στο πόδι του πρανούς (Griffiths and Lane, 1999).

4.10.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΟΥ ΕΔΡΑΖΕΤΑΙ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΣ ΕΔΑΦΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Στην περίπτωση αυτή, οι Griffiths και Lane χρησιμοποίησαν την ίδια γεωμετρία με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, αλλά μια διαφορετικού τύπου ανομοιογένεια όπως αυτή



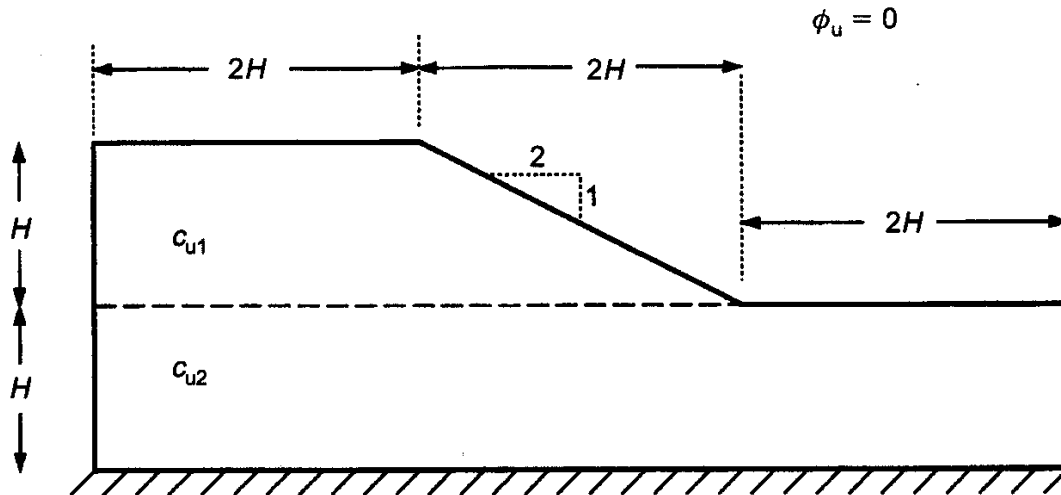
Σχήμα 4.24: Παραμορφωμένοι κάναβοι του πρανούς που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές αναλογίες αντοχής των εδαφικών υλικών: (a) $c_{u2}/c_{u1}=1$, (b) $c_{u2}/c_{u1}=0,6$ και (c) $c_{u2}/c_{u1}=0,2$ (Griffiths and Lane, 1999).

περιγράφεται στο Σχήμα 4.25. Η διατμητική αντοχή του υλικού του πρανούς διατηρήθηκε σταθερά στην τιμή $\frac{c_{u1}}{\gamma H} = 0.25$, ενώ η διατμητική αντοχή του υλικού έδρασης του πρανούς μεταβλήθηκε, παίρνοντας διάφορες τιμές. Η σχετική τιμή των δύο διατμητικών αντοχών εκφράζεται και πάλι με την αναλογία $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$.

Στο Σχήμα 4.26 απεικονίζεται το διάγραμμα του υπολογιζόμενου από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συντελεστή ασφάλειας συναρτήσει των διαφόρων αναλογιών $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση. Επίσης φαίνονται οι κλασικές λύσεις

του Taylor για τις δύο περιπτώσεις όπου $c_{u1} = c_{u2}$ και $c_{u1} \ll c_{u2}$. Σαφώς εμφανίζεται μια διαφορά στην συμπεριφορά του πρανούς στην αναλογία $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} \approx 1,5$, που

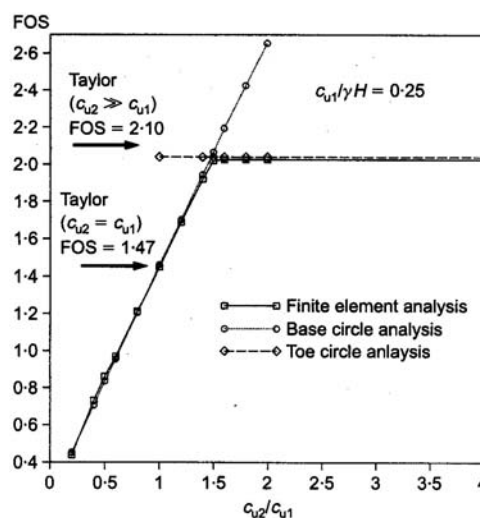
υποδεικνύεται από την επιπέδωση της καμπύλης. Στο ίδιο σχήμα επίσης απεικονίζονται οι λύσεις που προέκυψαν από την επίλυση με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας για μηχανισμούς αστοχίας που περνούν από τη βάση και το πόδι του πρανούς. Το σημείο



Σχήμα 4.25: Αργιλικό πρανές με ασθενές στρώμα έδρασης (Griffiths and Lane, 1999).

καμπής για $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} \approx 1,5$ προφανώς αντιπροσωπεύει τη μετάβαση μεταξύ των δύο αυτών θεμελιωδών μηχανισμών (Griffiths and Lane, 1999).

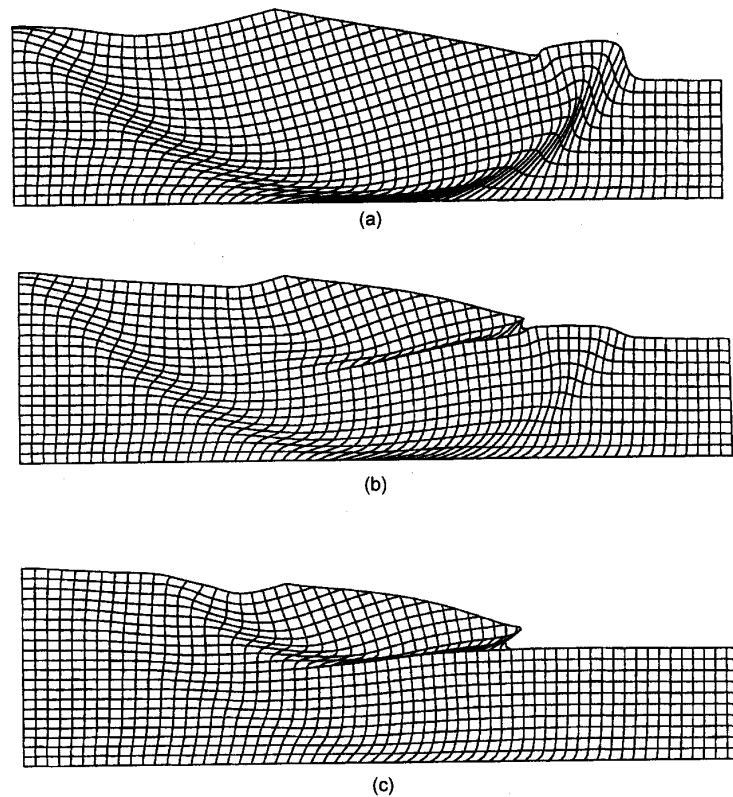
Στο Σχήμα 4.27 απεικονίζονται οι παραμορφωμένοι κάρναβοι για τρεις διαφορετικές αναλογίες $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$ όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Όταν $c_{u1} \gg c_{u2}$ (Σχήμα 4.27(a)), παρατηρείται ένας μηχανισμός αστοχίας σε μεγάλο βάθος, ενώ στην περίπτωση που $c_{u1} \ll c_{u2}$ (Σχήμα 4.27(c)), η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται σε μικρό βάθος και διέρχεται από το πόδι του πρανούς. Η λύση



Σχήμα 4.26: Συντελεστής ασφάλειας συναρτήσει της αναλογίας $\frac{c_{u2}}{c_{u1}}$ (Griffiths and Lane, 1999).

που αντιστοιχεί στην αναλογία $\frac{c_{u2}}{c_{u1}} \approx 1,5$ απεικονίζεται στο Σχήμα 4.27(b), και υποδεικνύει μια κατάσταση στην οποία και οι δύο μηχανισμοί εμφανίζονται ταυτόχρονα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το υποκείμενο εδαφικό στρώμα πρέπει να έχει αντοχή περίπου 50% πιο υψηλή από το υπερκείμενο για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αστοχίας στο πόδι του πρανούς (Griffiths and Lane, 1999).

Τα προηγούμενα παραδείγματα έδειξαν ότι ακόμη και σε αρκετά απλές καταστάσεις, μπορεί να εμφανιστούν σύνθετοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης στο εσωτερικό ανομοιογενών πρανών, οι οποίοι μπορούν να εντοπιστούν με προσέγγιση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για ακόμη πιο σύνθετα προβλήματα που αφορούν περισσότερες ομάδες εδαφικών υλικών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί εύλογα τη μόνη λογική μέθοδο επίλυσης, η οποία θα αποδώσει τον συντελεστή ασφάλειας εντοπίζοντας τη θέση και τη γεωμετρία (σχήμα) της επιφάνειας ολίσθησης (Griffiths and Lane, 1999).



Σχήμα 4.27: Παραμορφωμένοι κάνναβοι του πρανούς που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές αναλογίες αντοχής των εδαφικών υλικών: (a) $c_{u2}/c_{u1}=0,6$, (b) $c_{u2}/c_{u1}=1,5$ και (c) $c_{u2}/c_{u1}=2,0$ (Griffiths and Lane, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PLAXIS

Σημειώνεται ότι το κεφάλαιο αυτό έχει εξολοκλήρου γραφτεί με βάση το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού πακέτου Plaxis.

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

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 σε εδάφη και πετρώματα.

Το περιβάλλον εργασίας του Plaxis είναι αρκετά φιλικό προς το χρήστη, ενώ το πρόγραμμα δουλεύει σε περιβάλλον Windows 95, 98, 2000, NT και XP. Το πρόγραμμα καθεαυτό αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα:

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

Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται καθένα από τα παραπάνω υποπρογράμματα ξεχωριστά, καθώς και μέρος του μαθηματικού υποβάθρου που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για την επίλυση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Plaxis, είναι απαραίτητος αρχικά ο σχεδιασμός ενός προτύπου πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις και ο καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών καθώς και των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Οι παραπάνω εργασίες πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων (input).

Ένα πρότυπο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται ξεκινώντας από το σχεδιασμό του στις δύο διαστάσεις με σημεία και γραμμές που ορίζουν κλειστά γεωμετρικά σχήματα. Η δημιουργία του κατάλληλου δικτύωματος πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιείται αυτόματα από το Plaxis, με βάση το γεωμετρικό πρότυπο που εισάγεται. Στο σημείο αυτό ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει το δικτύωμα των στοιχείων στις ανάγκες του προβλήματος πυκνώνοντας ή αραιώνοντάς το, με σκοπό τη βέλτιστη διακριτοποίηση του γεωμετρικού προτύπου. Ακολουθεί η εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών και των συνοριακών συνθηκών. 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 προτύπου.

5.2.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο τμήμα αυτό του προγράμματος περιέχονται όλα εκείνα τα στοιχεία που χρειάζονται για το σχεδιασμό ή την τροποποίηση ενός γεωμετρικού προσομοιώματος, για τη δημιουργία του κατάλληλου δικτύωματος πεπερασμένων στοιχείων καθώς και για τη δημιουργία των αρχικών συνθηκών.

Γενικές ρυθμίσεις

Στην αρχή του προγράμματος εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο επιλέγεται η εμφάνιση ενός υπάρχοντος προτύπου ή η δημιουργία ενός νέου. Στην περίπτωση που δημιουργείται ένα νέο πρότυπο, γίνονται κάποιες γενικές ρυθμίσεις που αφορούν την ονομασία του, τον τύπο του καθώς και τον τύπο των στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Επίσης καθορίζονται οι μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου, καθώς και οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης. Όσον αφορά τον τύπο του

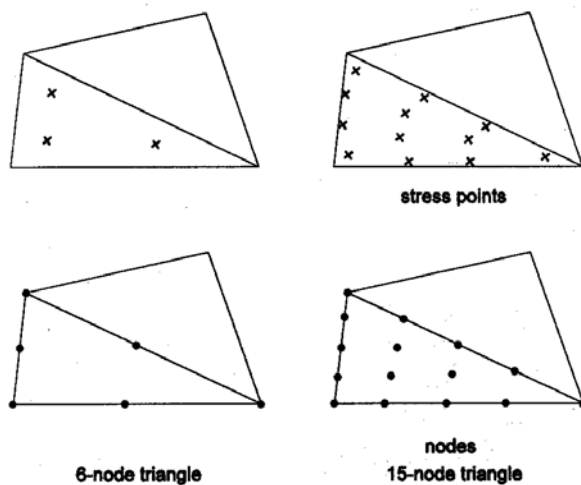
προτύπου, μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρική ανάλυση.

Τύποι στοιχείων

Με βάση τον τύπο του προτύπου, επιλέγεται και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Οι επιλογές του προγράμματος για ανάλυση προτύπου σε δύο διαστάσεις είναι τα εξακομβικά και δεκαπεντακομβικά τριγωνικά στοιχεία (Σχήμα 5.1). Το εξακομβικό τριγωνικό στοιχείο χρησιμοποιείται ευρύτερα στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις καθώς πραγματοποιεί παρεμβολή δεύτερης τάξης για τις παραμορφώσεις (τρεις κόμβοι ανά πλευρά). Ο πίνακας ακαμψίας του στοιχείου εκτιμάται με αριθμητική ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας τρία σημεία Gauss (τα σημεία τάσεων ή τασικά σημεία). Άρα τα σημεία ολοκλήρωσης όπως αυτά ορίζονται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζονται στο Plaxis τασικά σημεία (stress points). Για τα δεκαπεντακομβικά τριγωνικά στοιχεία γίνεται παρεμβολή τέταρτης τάξης και η ολοκλήρωση αφορά δώδεκα σημεία τάσης (πέντε κόμβοι ανά πλευρά).

Βαρύτητα και επιτάχυνση της βαρύτητας

Η διεύθυνση της βαρύτητας έχει οριστεί στις -90° , η οποία αντιστοιχεί στις αρνητικές τιμές του y άξονα. Η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν είναι απαραίτητο να οριστεί από το χρήστη, εφόσον εννοείται ότι συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς του βάρους του υλικού όπως αυτό προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 5.1: Εξακομβικό και δεκαπεντακομβικό τριγωνικό στοιχείο όπου εμφανίζονται οι κόμβοι και τα τασικά σημεία (Plaxis Manual, 1998).

Μονάδες

Οι μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου ορίζονται εξ αρχής, κατά την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες είναι μέτρα (m) για μήκος, kiloNewton (kN) για δύναμη και ημέρα (day) για χρόνο. Οι αντίστοιχες μονάδες τάσης και βάρους δίνονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Όλες οι υπόλοιπες τιμές που εισάγονται στο πρόγραμμα πρέπει να δίνονται σε αντίστοιχο σύστημα μονάδων.

Διαστάσεις

Στο Σχήμα 5.2 φαίνονται επίσης οι διαστάσεις τις περιοχής σχεδίασης που εισάγονται με βάση τις διαστάσεις του προτύπου που πρόκειται να σχεδιαστεί. Οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης δεν επηρεάζουν τη γεωμετρία και μπορεί να αλλάξουν κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ή τροποποίησης ενός προσομοιώματος.

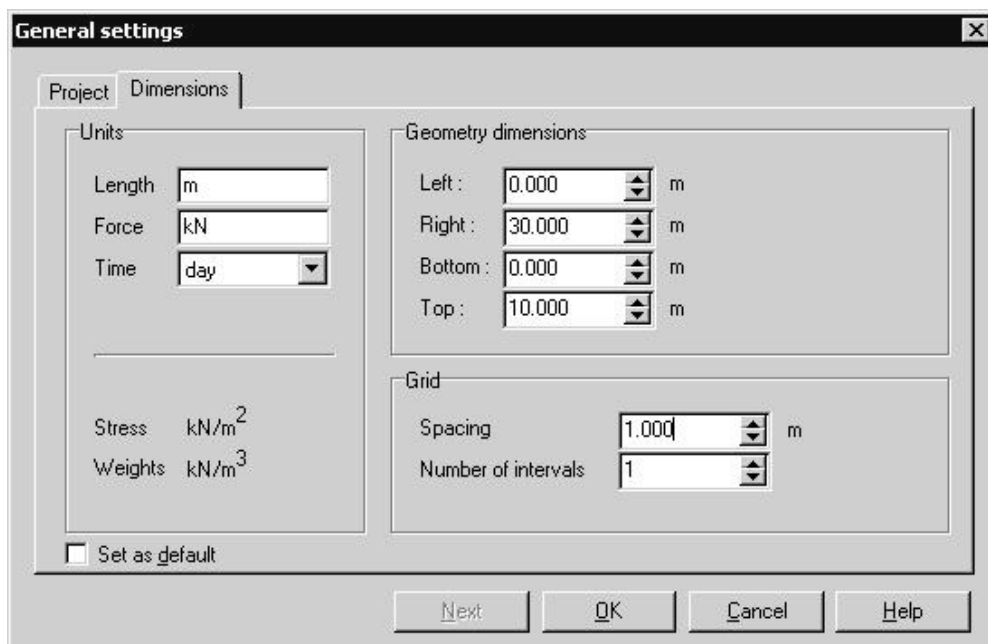
Κάνναβος

Ο κάνναβος που ορίζεται στην περιοχή σχεδίασης κατασκευάζεται έτσι ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός της γεωμετρίας με την μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια. Ο ορισμός του καννάβου γίνεται με βάση την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα υποδιαίρεση αυτού, η οποία καθορίζει και την πυκνότητά του καθώς και την υποδιαίρεση των μονάδων μήκους που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό της γεωμετρίας.

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το παράθυρο διαλόγου όπου γίνονται οι γενικές ρυθμίσεις του προτύπου που πρόκειται να σχεδιαστεί όσον αφορά τις μονάδες των παραμέτρων που εισάγονται, τις διαστάσεις του προτύπου καθώς και τη γεωμετρία του καννάβου.

5.2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Η δημιουργία ενός προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με το σχεδιασμό ενός γεωμετρικού προτύπου, το οποίο αποτελεί την απεικόνιση του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Ένα γεωμετρικό πρότυπο 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. Παράλληλα με αυτά τα βασικά στοιχεία, στο σχεδιασμό του γεωμετρικού προτύπου μπορούν να εισαχθούν και κατασκευαστικά αντικείμενα, όπως δοκοί, γεωφάσματα, αγκύρια, καθώς επίσης και ειδικές κατασκευές όπως σήραγγες κ.λ.π.



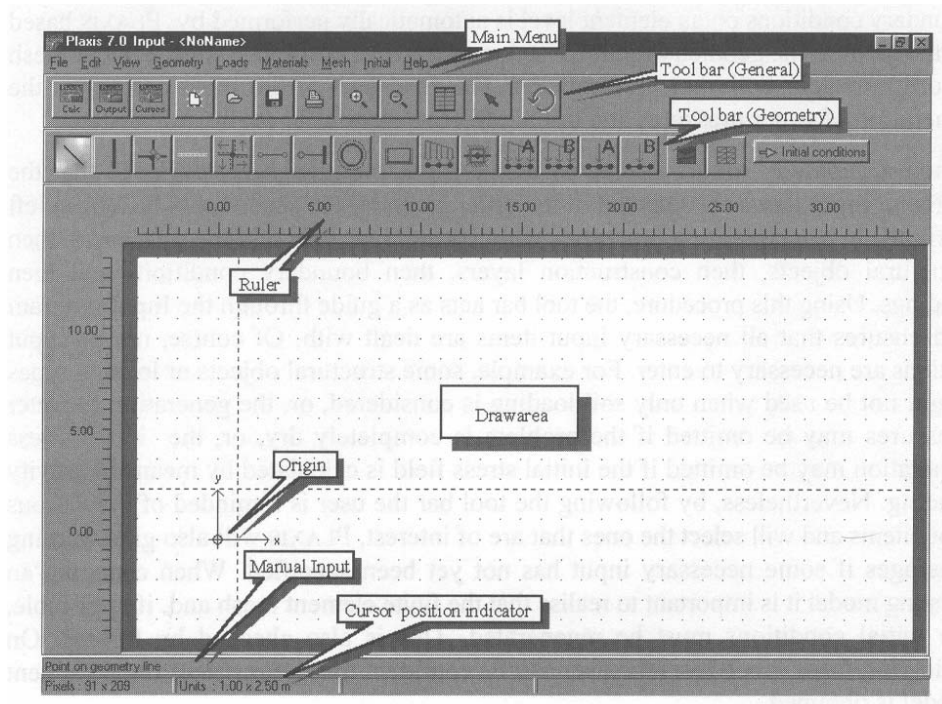
Σχήμα 5.2: Παράθυρο διαλόγου για τις γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου (Plaxis Manual, 1998).

Επίσης, ο χρήστης στο σημείο αυτό ορίζει τα εδαφικά στρώματα, τις γραμμές που αποτελούν όρια κατασκευαστικών φάσεων, τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες. Το γεωμετρικό πρότυπο δεν περιλαμβάνει μόνο την αρχική κατάσταση αλλά επίσης και τη γεωμετρία των κατασκευαστικών σταδίων που ακολουθούν ή που αποτελούν την τελική φάση αυτού. Τέλος, ο χρήστης δημιουργεί μια βάση δεδομένων για τις παραμέτρους των υλικών που περιλαμβάνονται στο πρότυπο και αντιστοιχεί τις ιδιότητες των εδαφικών υλικών στις επιφάνειες αυτού. Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της γεωμετρίας, το πρότυπο είναι έτοιμο, ώστε να δημιουργηθεί ακολούθως το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας γίνεται, με τη βοήθεια αρκετών εργαλείων σχεδιασμού, όπως αυτά που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των σχεδιαστικών προγραμμάτων (τύπου AutoCAD). Στο σημείο αυτό δεν θεωρείται απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας σχεδιασμού και θα γίνει μόνο μια αναφορά στην εισαγωγή των συνοριακών και αρχικών συνθηκών. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται το παράθυρο διαλόγου σχεδιασμού της γεωμετρίας, όπου φαίνονται το μενού του προγράμματος, ο κάνναβος και τα σχεδιαστικά εργαλεία.

5.2.3 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το υπο-μενού των φορτίσεων που μπορεί να εφαρμοστούν στο γεωμετρικό πρότυπο, περιλαμβάνει τις επιλογές που αφορούν τα κατανεμημένα φορτία, τις σημειακές



Σχήμα 5.3: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής της γεωμετρίας του μοντέλου (Plaxis Manual, 1998).

δυνάμεις και τις προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις. Οι παραπάνω επιλογές μπορούν να εφαρμοστούν στο πρότυπο παράλληλα με τις συνοριακές συνθήκες.

Προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις

Οι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις αποτελούν ειδικές συνθήκες που μπορεί να επιβληθούν σε γραμμές του γεωμετρικού προτύπου στις οποίες οι μετατοπίσεις είναι ελεγχόμενες. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, προσδιορίζονται οι δυνάμεις αντίδρασης που αντιστοιχούν στις προδιαγεγραμμένες παραμορφώσεις κατά τις διευθύνσεις x και y και δίνονται στα αποτελέσματα της επίλυσης του προσομοιώματος.

Μηδενικές μετατοπίσεις

Οι συνθήκες αυτές εφαρμόζονται σε γραμμές καθώς και σημεία του γεωμετρικού προτύπου. Γίνεται διάκριση μεταξύ των οριζόντιων μηδενικών μετατοπίσεων ($u_x = 0$), των κατακόρυφων μηδενικών μετατοπίσεων ($u_y = 0$) καθώς και των μηδενικών μετατοπίσεων και ως προς τους δύο άξονες που είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω συνθηκών ($u_x = u_y = 0$). Όταν σε κάποιο γεωμετρικό στοιχείο του προτύπου (γραμμή ή σημείο) εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση, τότε αυτή η συνθήκη υπερνικά στους υπολογισμούς όλους τους άλλους τύπους συνθηκών φόρτισης.

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται συνήθως κατά την επίλυση των διαφόρων εδαφικών μοντέλων είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Στα κατακόρυφα όρια του προτύπου εφαρμόζεται μηδενική οριζόντια μετατόπιση ($u_x = 0$), που σημαίνει ότι για τα σημεία των γραμμών αυτών επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον y άξονα. Η συντεταγμένη x των γραμμών αυτών έχει την τιμή της υψηλότερης ή χαμηλότερης συντεταγμένης x ολόκληρου του προσομοιώματος.
- ✓ Στο κάτω όριο του προτύπου (οριζόντια γραμμή), εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση και ως προς τους δύο άξονες ($u_x = u_y = 0$), που σημαίνει ότι η γραμμή αυτή είναι πακτωμένη. Τα σημεία αυτής της γραμμής έχουν συντεταγμένη y ίση με τη χαμηλότερη τιμή της συντεταγμένης y σε όλο το πρότυπο.

Οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται σαν μια εύκολη επιλογή σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Φορτίσεις

Όσο αφορά τις φορτίσεις του εδαφικού προτύπου, ο χρήστης έχει δύο επιλογές: την επιβολή επιφανειακής φόρτισης ή την επιβολή σημειακής φόρτισης. Στην πρώτη περίπτωση οι τιμές των τάσεων εισάγονται σε μονάδες τάσης (π.χ. kN/m^2), η εφαρμογή τους γίνεται σε γεωμετρικά όρια του προτύπου (γραμμές) και δεδομένου ότι το πάχος αυτού θεωρείται μοναδιαίο, η τάση αποτελεί δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές των φορτίσεων εισάγονται σε μονάδες δύναμης/μήκος (π.χ. kN/m), η εφαρμογή τους γίνεται σε σημεία της γεωμετρίας του προτύπου και η τάση αποτελεί δύναμη ανά μονάδα μήκους και πάλι λόγω του μοναδιαίου πάχους του προτύπου.

5.2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Στο Plaxis, οι ιδιότητες των εδαφών και των υλικών αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων που ο ίδιος ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει. Από τη βάση δεδομένων αυτή, οι ιδιότητες αντιστοιχίζονται στα εδαφικά στρώματα που ορίζονται σαν κλειστά γεωμετρικά σχήματα ή στα αντικείμενα του γεωμετρικού προτύπου.

Μοντέλα εδαφικής συμπεριφοράς

Τα εδάφη και τα πετρώματα τείνουν να συμπεριφέρονται μη-γραμμικά κάτω από φόρτιση. Το πολύ γνωστό μοντέλο των Mohr-Coulomb, μπορεί να θεωρηθεί ως μια πρώτη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών. Λόγω του ότι οι

εδαφομηχανικοί είναι εξοικειωμένοι με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή του μοντέλου των Mohr-Coulomb (όπως αυτές περιγράφονται παρακάτω), δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε αυτού του είδους τα εδαφικά μοντέλα. Το Plaxis υποστηρίζει και άλλα εξελιγμένα εδαφικά μοντέλα τα οποία θα αναφερθούν σε επόμενη ενότητα.

Ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών και οι παράμετροι των εδαφικών στρωμάτων των μοντέλων, εισάγονται σε ξεχωριστό παράθυρο διαλόγου. Για καθένα από τα υλικά εισάγεται μια ομάδα ιδιοτήτων η οποία και αντιστοιχεί σε κάποιο ή κάποια εδαφικά στρώματα του προτύπου. 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 προτύπου, τον τύπο της εδαφικής συμπεριφοράς και τις γενικές εδαφικές ιδιότητες όπως είναι τα φαινόμενα βάρη και η διαπερατότητα. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται το παράθυρο διαλόγου όπου εισάγονται τα γενικά χαρακτηριστικά των υλικών.

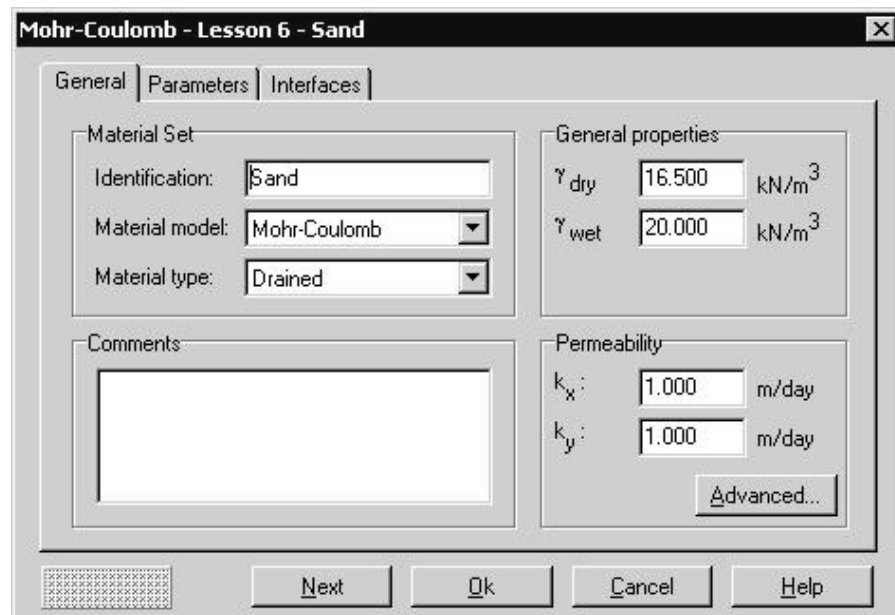
Όσο αφορά το μοντέλο του υλικού, το Plaxis υποστηρίζει διάφορα μοντέλα που προσομοιάζουν την συμπεριφορά των εδαφών αλλά και άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται κατά τη προσομοίωση.

1. Γραμμικά ελαστικό μοντέλο

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.

2. Μοντέλο Mohr-Coulomb

Όπως προαναφέρθηκε, το πολύ γνωστό μοντέλο Mohr-Coulomb, αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών. Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό το ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο, είναι όπως προαναφέρθηκε:



Σχήμα 5.4: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής γενικών χαρακτηριστικών του υλικού (Plaxis Manual, 1998).

- ✓ το μέτρο ελαστικότητας του Young (E),
 - ✓ ο λόγος του Poisson (ν),
 - ✓ η συνοχή (c),
 - ✓ η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και
 - ✓ η γωνία διασταλτικότητας (ψ).
3. 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.
 4. 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 καταστάσεις πρωτεύουσας συμπίεσης.
 5. Μοντέλο ερπυσμού μαλακών εδαφών (Soft soil model)
Το μοντέλο αυτό είναι βισκοπλαστικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μαλακών εδαφών σε συνάρτηση με το χρόνο.

Όσο αφορά τον τύπο της συμπεριφοράς του υλικού, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζει πολύ την απόκρισή του είναι η πίεση των

πόρων. Για κάθε εδαφικό υλικό, επιλέγεται ένας από τους παρακάτω τύπους συμπεριφοράς:

1. Στραγγιζόμενη συμπεριφορά

Χρησιμοποιώντας την επιλογή αυτή, δεν δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση ξηρών εδαφών καθώς επίσης και όταν παρατηρείται πλήρης αποστράγγιση λόγω υψηλής διαπερατότητας των υλικών (άμμοι) ή χαμηλού ρυθμού φόρτισης.

2. Μη στραγγιζόμενη συμπεριφορά

Αυτή η ρύθμιση χρησιμοποιείται στην περίπτωση που γίνεται πλήρης ανάπτυξη της πίεσης των πόρων. Η ροή του νερού των πόρων μπορεί να παραβλεφθεί λόγω της χαμηλής διαπερατότητας (άργιοι), και/ή 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.

1. Συμπεριφορά εδαφικών υλικών χωρίς πορώδες

Χρησιμοποιώντας αυτή τη ρύθμιση, δεν υπολογίζονται ούτε οι αρχικές αλλά ούτε και οι πρόσθετες πιέσεις των πόρων. Η συμπεριφορά αυτή εφαρμόζεται κατά τη προσομοίωση σκυροδέματος και πετρωμάτων. Συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το γραμμικά ελαστικό μοντέλο. Στην περίπτωση υλικών που δεν εμφανίζουν πορώδες, η εισαγωγή του υγρού φαινομένου βάρους δεν έχει πρακτική σημασία.

Οι γενικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού που εισάγονται επίσης στο παράθυρο διαλόγου με τα γενικά χαρακτηριστικά αυτού, είναι:

1. Ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry} και γ_{wet})

Το ξηρό και το υγρό φαινόμενο βάρος του υλικού αναφέρονται στο συνολικό βάρος της μονάδας όγκου του εδαφικού σκελετού, συμπεριλαμβανομένου και του υλικού που πληρεί τους πόρους του. Το ξηρό φαινόμενο βάρος γ_{dry} εφαρμόζεται στα υλικά που βρίσκονται πάνω από τη ζώνη κορεσμού, ενώ το υγρό φαινόμενο βάρος αναφέρεται στα υλικά που βρίσκονται κάτω από αυτή. Με βάση αυτό το

δεδομένο κατά Plaxis, το γ_{wet} αναφέρεται στο κορεσμένο βάρος του υλικού. Τα μοναδιαία βάρη εισάγονται ως δύναμη ανά μονάδα όγκου του υλικού.

2. Διαπερατότητα (k_x και k_y)

Η διαπερατότητα έχει μονάδες ταχύτητας (μονάδα μήκους ανά μονάδα χρόνου). Η εισαγωγή των παραμέτρων της διαπερατότητας είναι απαραίτητη μόνο στην περίπτωση που γίνεται ανάλυση στερεοποίησης ή υπολογισμός της υπεδάφειας ροής νερού. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητος ο καθορισμός της διαπερατότητας για όλα τα στρώματα, ακόμη και για τα αδιαπέρατα. Το Plaxis διαχωρίζει την οριζόντια k_x από την κατακόρυφη k_y διαπερατότητα, εφόσον σε ορισμένους τύπους εδάφους (π.χ. τύρφη) υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ τους.

Στις παραμέτρους του υλικού που εισάγονται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.5, συμπεριλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά ακαμψίας και αντοχής του επιλεγμένου εδαφικού στρώματος του προτύπου.

Τα χαρακτηριστικά ακαμψίας του υλικού περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητάς του και το λόγο του Poisson.

1. Μέτρο ελαστικότητας του Young (E)

Το Plaxis χρησιμοποιεί το μέτρο ελαστικότητας του Young ως τη βασική σταθερά του ελαστικού μοντέλου και του μοντέλου Mohr-Coulomb ενώ αυτόματα υπολογίζει και κάποιες εναλλακτικές σταθερές όπως είναι η σταθερά διάτμησης G και το μέτρο ελαστικότητας E_{oed} το οποίο προκύπτει από τη δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. Οι τιμές των παραμέτρων ακαμψίας χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι πολλά γεωυλικά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά από την έναρξη της φόρτισης. Στην εδαφομηχανική, η αρχική κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης ορίζεται ως το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_0 ενώ η κλίση της ευθείας που τέμνει την καμπύλη στο 50% της μέγιστης τάσης είναι το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{50} (Σχήμα 5.6). Για υπερστερεοποιημένες αργίλους και ορισμένα πετρώματα με μεγάλο εύρος γραμμικά ελαστικής περιοχής, ενδείκνυται η χρήση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας E_0 , ενώ για άμμους και κανονικά στερεοποιημένες αργίλους χρησιμοποιείται το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{50} . Γενικότερα προτείνεται η χρήση του E_{50} δεδομένου ότι το E_0 δεν εκτιμάται εύκολα.

Σχήμα 5.5: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής ιδιοτήτων του υλικού (Plaxis Manual, 1998).

2. Λόγος Poisson (ν)

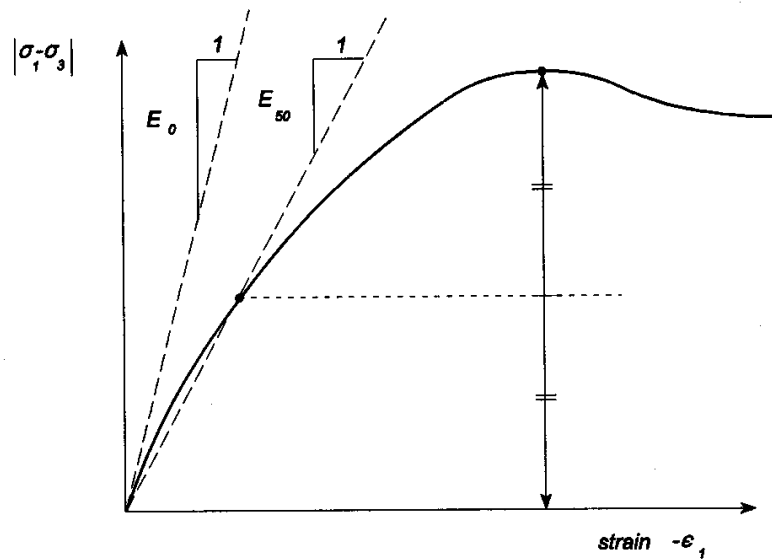
Οι τυπικές τριαξονικές δοκιμές με αποστράγγιση παρουσιάζουν μεγάλη μείωση του όγκου στην αρχή της αξονικής φόρτισης και επομένως χαμηλή αρχική τιμή του λόγου του Poisson. Για κάποιες περιπτώσεις, όπως για ειδικά προβλήματα αποφόρτισης, είναι ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί μια τόσο χαμηλή τιμή, αλλά γενικότερα όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο των Mohr-Coulomb συνιστάται η χρήση κάποιας υψηλότερης τιμής.

Η επιλογή του λόγου του Poisson είναι εξαιρετικά εύκολη στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το ελαστικό μοντέλο ή το μοντέλο Mohr-Coulomb για τον υπολογισμό της φόρτισης του υλικού από το ίδιο του το βάρος. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές του ν κυμαίνονται μεταξύ του 0,3 και 0,4. Γενικότερα, τέτοιες τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση που υπάρχουν άλλες συνθήκες φόρτισης εκτός της μονοδιάστατης στερεοποίησης.

Τα χαρακτηριστικά αντοχής του υλικού εισάγονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.5) και περιλαμβάνουν τη συνοχή του υλικού, τη γωνία εσωτερικής τριβής αυτού και τέλος τη γωνία διασταλτικότητάς του.

1. Συνοχή (c)

Η συνοχή των υλικών έχει διαστάσεις τάσης (kN/m^2). Το Plaxis μπορεί να χειριστεί ακόμη και μη συνεκτικά υλικά όπως είναι οι άμμοι ($c=0$) αλλά μερικές επιλογές μπορεί να μην εκτελούνται σωστά στην περίπτωση αυτή. Για την



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης όπου ορίζεται το αρχικό και μέσο μέτρο ελαστικότητας (E_0 και E_{50} αντίστοιχα) (Plaxis Manual, 1998).

αποφυγή περιπλοκών, χρήστες χωρίς ιδιαίτερη εμπειρία, θα πρέπει να εισάγουν μια ελάχιστη τιμή για τη συνοχή ($c > 2 \text{ kPa}$).

2. Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)

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

3. Γωνία διασταλτικότητας (ψ)

Η τιμή της γωνίας διασταλτικότητας ψ εισάγεται επίσης σε μοίρες. Εκτός από τα έντονα υπερστερεοποιημένα στρώματα, οι άργιλοι δεν επιδεικνύουν καθόλου διασταλτικότητα ($\psi = 0$). Η διασταλτικότητα των άμμων εξαρτάται από την πυκνότητά τους και τη γωνία εσωτερικής τριβής τους. Για χαλαζιακές άμμους η σχέση μεταξύ γωνίας εσωτερικής τριβής και γωνίας διασταλτικότητας είναι:

$$\psi \approx \phi - 30^\circ \quad [5.1]$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, η γωνία διασταλτικότητας είναι μηδέν για τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής μικρότερες των 30° . Για ιδιαίτερα χαλαρές άμμους, η γωνία διασταλτικότητας μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές.

Σχήμα 5.7: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής παραμέτρων για προηγμένα μοντέλα Mohr-Coulomb (Plaxis Manual, 1998).

Όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο Mohr-Coulomb, εισάγονται κάποιες επιπλέον παράμετροι που σχετίζονται με πιο προηγμένα μοντέλα (Σχήμα 5.7). Οι παράμετροι αυτές, συνδυάζουν την αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής με το βάθος, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η επιλογή του ορίου αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία.

1. Αύξηση της ακαμψίας ($E_{\text{increment}}$)

Στα εδάφη, το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται άμεσα από την εντατική κατάσταση, που σημαίνει ότι γενικά αυξάνεται με το βάθος. Όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο Mohr-Coulomb, το μέτρο ελαστικότητας έχει μια σταθερή τιμή. Όταν πρόκειται να υπολογιστεί η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το βάθος, χρησιμοποιείται η παράμετρος $E_{\text{increment}}$ η οποία υποδηλώνει την αύξησή του στη μονάδα αύξησης του βάθους (εκφρασμένη σε μονάδες τάσης ανά μονάδα μήκους). Στο επίπεδο που δίνεται από την παράμετρο y_{ref} , το μέτρο ελαστικότητας του Young είναι ίσο με το E_{ref} , το οποίο εισάγεται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.5. Σε καθένα από τα τασικά σημεία το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από το E_{ref} και το $E_{\text{increment}}$. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των υπολογισμών η αύξηση της ακαμψίας με το βάθος δεν μεταβάλλεται συναρτήσει της εντατικής κατάστασης.

2. Αύξηση της συνοχής ($c_{\text{increment}}$)

Στην περίπτωση που στο εδαφικό πρότυπο περιέχονται αργιλικά στρώματα, των οποίων η συνοχή αυξάνει με το βάθος, το Plaxis δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής της παραμέτρου $c_{\text{increment}}$. Στο επίπεδο που δίνεται από την παράμετρο y_{ref} , η συνοχή είναι ίση με c_{ref} , όπως εισάγεται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.5. Σε

καθένα από τα υπόλοιπα τασικά σημεία το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από το C_{ref} και το $C_{increment}$.

3. Όριο αποκοπής εφελκυστικών τάσεων

Σε μερικά πρακτικά προβλήματα μπορεί να αναπτυχθεί μια περιοχή με εφελκυστικές τάσεις. Για παράδειγμα σε κάποιο όρυγμα στην επιφάνεια αργιλικού εδάφους, μπορούν να εμφανιστούν ρωγμές λόγω εφελκυσμού. Αυτό υποδηλώνει ότι το έδαφος μπορεί να αστοχήσει και λόγω εφελκυσμού και όχι μόνο λόγω διάτμησης. Μια τέτοιου είδους εδαφική συμπεριφορά μπορεί να ληφθεί υπόψη σε ένα μοντέλο Plaxis με την επιλογή tension cut-off. Στην περίπτωση που επιλέγεται η παράμετρος tension cut-off, μπορεί να εισαχθεί και η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης εφελκυστικής τάσης που μπορεί να αντέξει το πρότυπο. Για το μοντέλο Mohr-Coulomb και το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Hardening soil model), ενεργοποιείται η επιλογή tension cut-off και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι ίση με μηδέν.

Τέλος, στις παραμέτρους των διεπιφανειών εισάγονται εκείνα τα χαρακτηριστικά που συνδέουν τις ιδιότητες των διεπιφανειών με αυτές των υλικών μεταξύ των οποίων βρίσκονται. Εισαγωγή διεπιφάνειας γίνεται για όλους τύπους εδαφικών υλικών (Mohr-Coulomb, Linear elastic κλπ.). Στο Σχήμα 5.8, φαίνεται το παράθυρο διαλόγου στο οποίο γίνεται η εισαγωγή των παραμέτρων των διεπιφανειών.

1. Αντοχή διεπιφάνειας (R_{inter})

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των διεπιφανειών σε μοντέλα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, χρησιμοποιείται το ελαστοπλαστικό μοντέλο. Το κριτήριο Coulomb χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό μεταξύ ελαστικής συμπεριφοράς (όπου μπορεί να εμφανιστούν μικρές παραμορφώσεις στη διεπιφάνεια) και της πλαστικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας (ολίσθηση). Οι παράμετροι αντοχής των διεπιφανειών εξαρτώνται άμεσα από αυτές του εδαφικού στρώματος με το οποίο σχετίζονται. Όλες οι παράμετροι αντοχής των εδαφών πολλαπλασιάζονται με έναν παράγοντα μείωσης της αντοχής R_{inter} , όπως προκύπτει και από τις σχέσεις:

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad [5.2]$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \tan \phi_{soil} \leq \tan \phi_{soil} \quad [5.3]$$

$$\psi_i = 0^\circ \quad \text{για} \quad R_{inter} < 1 \quad \text{αλλιώς} \quad \psi_i = \psi_{soil} \quad [5.4]$$

Η αντοχή της διεπιφάνειας μπορεί να οριστεί με τους ακόλουθους τρόπους:

Ακαμπτη: Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται όταν η διεπιφάνεια δεν επηρεάζει την αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους. Στην περίπτωση αυτή ισχύει $R_{inter}=1$ και επομένως τα χαρακτηριστικά αντοχής των διεπιφανειών, συμπεριλαμβανομένης και της γωνίας διασταλτικότητας, είναι ίδια με αυτά των εδαφών που τις περιβάλλουν, εκτός από το λόγο του Poisson ν .

Από το χρήστη: Στην περίπτωση αυτή η τιμή του παράγοντα μείωσης της αντοχής R_{inter} εισάγεται από το χρήστη. Γενικά, για την εξέταση της αλληλεπίδρασης του εδάφους με μια κατασκευή, η διεπιφάνεια θεωρείται ασθενέστερη και πιο εύκαμπτη από το περιβάλλον εδαφικό στρώμα, επομένως η τιμή του R_{inter} είναι μικρότερη της μονάδας. Κατάλληλες τιμές για τον παράγοντα R_{inter} και την περίπτωση αλληλεπίδρασης αρκετών τύπων εδαφών με κατασκευές, μπορεί να βρεθεί στη σχετική βιβλιογραφία.

2. Πραγματικό πάχος διεπιφάνειας (δ_{inter})

Το πραγματικό πάχος της διεπιφάνειας είναι μια παράμετρος που αντιπροσωπεύει το πραγματικό πάχος της ζώνης διάτμησης μεταξύ μιας κατασκευής και του εδάφους. Η τιμή του δ_{inter} έχει πρακτική σημασία μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Hardening soil model). Εκφράζεται σε μονάδες μήκους και είναι πολλαπλάσια του μέσου μεγέθους κόκκων.

3. Διαπερατότητα διεπιφάνειας (k_n και k_s)

Η διαπερατότητα της διεπιφάνειας κάθετα στον άξονά της συμβολίζεται με k_n και η διαπερατότητα κατά μήκος του άξονά της με k_s . Όπως και στις παραμέτρους αντοχής, και σε αυτή την περίπτωση οι διαπερατότητες των διεπιφανειών

προκύπτουν ως συνάρτηση των διαπερατοτήτων των περιβαλλόντων εδαφικών στρωμάτων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ τριών επιλογών με βάση τις οποίες το πρόγραμμα δημιουργεί τις σωστές διαπερατότητες των διεπιφανειών.

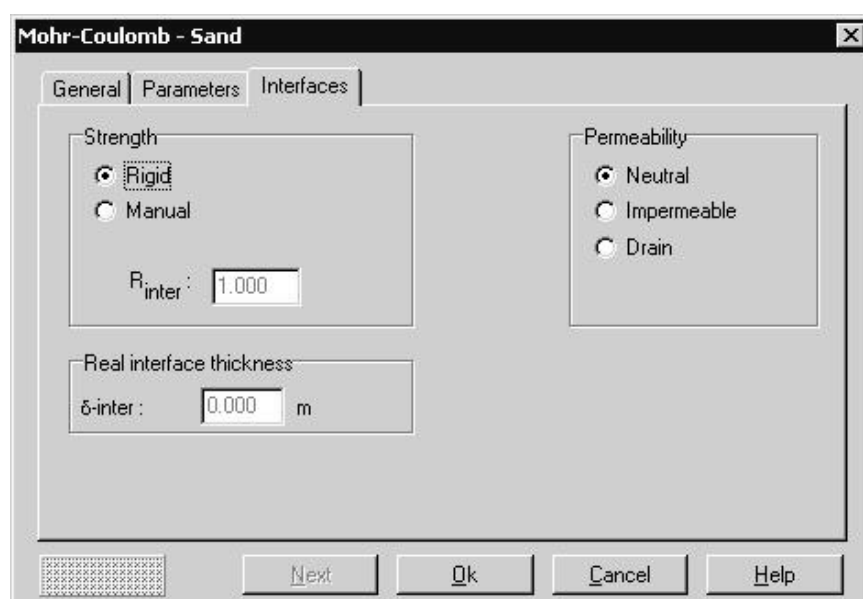
Ουδέτερη: Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται όταν η διεπιφάνεια δεν επηρεάζει τη ροή του νερού στα περιβάλλοντα εδαφικά στρώματα.

Αδιαπέρατη: Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται όταν η ροή του νερού κάθετα στον άξονα της διεπιφάνειας περιορίζεται.

Στραγγιζόμενη: Με βάση αυτή την επιλογή επιτρέπεται η ελεύθερη ροή του νερού κατά μήκος του άξονα της διεπιφάνειας και διαμέσου αυτής.

5.2.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται η διαίρεση του γεωμετρικού προτύπου σε στοιχεία (Mesh Generation). Μια σύνθεση πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται δικτύωμα στοιχείων (mesh). Όπως έχει προαναφερθεί, τα βασικά στοιχεία για μοντέλα δύο διαστάσεων είναι τα τριγωνικά (εξακομβικά και δεκαπεντακομβικά). Στο Plaxis η δημιουργία του δικτύωματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του



Σχήμα 5.8: Παράθυρο διαλόγου στο οποίο γίνεται η εισαγωγή των παραμέτρων των διεπιφανειών (Plaxis Manual, 1998).

προτύπου. Τέτοιου είδους δικτυώματα στοιχείων μπορεί να φαίνονται «ακατάστατα», η αριθμητική τους συμπεριφορά όμως είναι γενικά καλύτερη από αυτή των δικτυωμάτων που κατασκευάζονται από το χρήστη.

Ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων

Η δημιουργία του δικτυώματος των στοιχείων γίνεται με βάση έναν παράγοντα που αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των στοιχείων l_e . Στο Plaxis η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις του γεωμετρικού προτύπου (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max}) και τη ρύθμιση της ολικής πυκνότητας του δικτυώματος στοιχείων (n_c) από το υπο-μενού του Mesh.

$$l_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}} \quad [5.5]$$

Το n_c είναι ένας ακέραιος συντελεστής ο οποίος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του δικτυώματος που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του εδαφικού προτύπου που προσομοιώνεται. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί πέντε επίπεδα ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων: πολύ αραιό, αραιό, μέσης πυκνότητας, πυκνό και πολύ πυκνό. Το μέσο μέγεθος των στοιχείων και ο αριθμός των στοιχείων που δημιουργούνται εξαρτάται από τη ρύθμιση της ολικής πυκνότητας του δικτυώματος. Μια πρόχειρη εκτίμηση δίνεται στον Πίνακα 5.1 (βασισμένη στη δημιουργία δικτυώματος χωρίς τοπική πύκνωση).

Πίνακας 5.1: Σχέση μεταξύ πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων και αριθμού στοιχείων (Plaxis Manual, 1998).

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

Ο ακριβής αριθμός των στοιχείων εξαρτάται από τη γεωμετρία του εκάστοτε προτύπου αλλά και από την πιθανή τοπική πύκνωση που έχει εφαρμόσει η χρήστης για καλύτερη διακριτοποίηση.

Ολική πύκνωση

Το δικτύωμα των πεπερασμένων στοιχείων του προτύπου μπορεί να πυκνωθεί σε όλη του την επιφάνεια με την επιλογή “Refine Global” του υπο-μενού Mesh. Η πυκνότητα αυξάνεται έτσι κατά ένα επίπεδο (π.χ. από αραιή σε μέσης πυκνότητας) και το δικτύωμα επανασχεδιάζεται αυτόματα.

Τοπική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων

Σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων ή αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός πιο πυκνού δικτυώματος στοιχείων, ενώ άλλα τμήματα του προτύπου ίσως δεν απαιτούν μεγάλη πυκνότητα. Για τις περιπτώσεις αυτές το Plaxis χρησιμοποιεί παραμέτρους τοπικής πύκνωσης σε συνδυασμό με τις παραμέτρους ολικής πύκνωσης. Ο παράγοντας τοπικής πύκνωσης δίνει μια ένδειξη του σχετικού μεγέθους των στοιχείων (τοπικά) σε σχέση με το μέσο μέγεθος των στοιχείων όπως ορίζεται από την παράμετρο ολικής πυκνότητας. Εξ’ ορισμού, ο συντελεστής τοπικού μεγέθους των στοιχείων έχει την τιμή 1,0. Για τη μείωση του μεγέθους ενός στοιχείου στο μισό του μέσου μεγέθους των στοιχείων του προτύπου, η τιμή του τοπικού συντελεστή μεγέθους των στοιχείων ορίζεται στο 0,5. Το εύρος τιμών του συντελεστή αυτού είναι από 0,2 έως 5,0.

Τοπική πύκνωση

Η τοπική πύκνωση του δικτυώματος των στοιχείων μπορεί να γίνει και με την επιλογή της τοπικής πύκνωσης από το υπο-μενού του Mesh, επιλέγοντας κλειστά σχήματα, γραμμές ή σημεία. Επιλέγοντας ένα από τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο τοπικός συντελεστής μεγέθους των στοιχείων ορίζεται αυτόματα στο 0,5 του μέσου όρου του μεγέθους των στοιχείων του υπόλοιπου προτύπου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να συνεχιστεί έως ότου ο συντελεστής αυτός φτάσει το κάτω όριο του εύρους των τιμών του που είναι το 0,2.

Προτεινόμενη τακτική δημιουργίας δικτυώματος στοιχείων

Για την πραγματοποίηση ικανοποιητικών υπολογισμών στο πρότυπο των πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να γίνει μια προκαταρκτική ανάλυση με τη χρήση ενός αραιού δικτυώματος στοιχείων. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται για να ελεγχθεί

αν το γεωμετρικό πρότυπο είναι αρκετά μεγάλο, αλλά κυρίως για να υπάρχει μια ένδειξη για το που αναμένονται μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων ή παραμορφώσεις. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται έπειτα για τη δημιουργία ενός πιο αντιπροσωπευτικού δικτύωματος για το πρότυπο και το πρόβλημα που αυτό αντιπροσωπεύει, με ολική ή/και τοπική πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων.

5.2.6 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Μετά τη δημιουργία του γεωμετρικού προτύπου και του κατάλληλου δικτύωματος των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να οριστούν οι αρχικές τασικές συνθήκες και η αρχική κατάσταση (Initial Conditions). Αυτό γίνεται στο τμήμα ορισμού των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων. Υπάρχουν δύο τύποι αρχικών συνθηκών: α) η δημιουργία των αρχικών πιέσεων του νερού των πόρων και β) ο προσδιορισμός της αρχικής γεωμετρίας του προτύπου και της δημιουργίας του πεδίου των αρχικών ενεργών τάσεων.

Υδρολογικές συνθήκες

Το Plaxis χρησιμοποιείται γενικότερα για την ανάλυση των ενεργών τάσεων στην οποία γίνεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ της ενεργής πίεσης των πόρων (p_{active}) και της ενεργής τάσης σ' . Στις ενεργές πιέσεις πόρων γίνεται επιπλέον διάκριση μεταξύ της πίεσης πόρων σταθερής κατάστασης (p_{steady}) και της υπερπίεσης των πόρων (p_{excess}):

$$P_{active} = P_{steady} + P_{excess} \quad [5.6]$$

Η υπερπίεση των πόρων προκύπτει συνήθως από φόρτιση εδαφικών στρωμάτων για τα οποία ο τύπος της συμπεριφοράς του υλικού ορίζεται ως μη στραγγιζόμενο. Η πίεση πόρων σταθερής κατάστασης αντιπροσωπεύει μια σταθερή υδραυλική κατάσταση, η οποία μπορεί να προκύψει όταν οι εξωτερικές υδατικές συνθήκες παραμένουν λίγο πολύ σταθερές για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Σε μοντέλα που δεν περιέχουν πιέσεις πόρων, η διαδικασία υπολογισμού τους αποφεύγεται με το σχεδιασμό του υδροφόρου ορίζοντα στο κάτω όριο του γεωμετρικού προτύπου, οπότε όλες οι πιέσεις που προκαλεί το νερό θεωρούνται ίσες με μηδέν.

1. Ειδικό βάρος νερού

Σε προβλήματα που συμπεριλαμβάνουν πιέσεις πόρων είναι απαραίτητη η εισαγωγή του ειδικού βάρους του νερού για τη διάκριση μεταξύ ενεργών τάσεων

και πιέσεων των πόρων. Ειδικότερα, όταν γίνεται ανάλυση της ροής του νερού μέσα στη μάζα του εδάφους ή ανάλυση στερεοποίησης, η εισαγωγή του ειδικού βάρους του νερού είναι καθοριστικής σημασίας διότι διαφορετικά θα προκύψει εσφαλμένο αποτέλεσμα. Το ειδικό βάρος του νερού είναι εξ' ορισμού ίσο με $10,0 \text{ kN/m}^3$.

2. Επίπεδο υδροφόρου ορίζοντα

Οι πιέσεις των πόρων και οι εξωτερικές υδατικές πιέσεις δημιουργούνται με βάση το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύει εκείνα τα σημεία για τα οποία η πίεση του νερού είναι ίση με μηδέν. Κάτω από το επίπεδο αυτό, η πίεση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (υδροστατική πίεση) και με βάση το ειδικό βάρος του νερού όπως αυτό έχει οριστεί προηγουμένως.

Ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να οριστεί από δύο ή περισσότερα σημεία. Τα σημεία και οι γραμμές σχεδιάζονται πάνω στο γεωμετρικό πρότυπο αλλά δεν αλληλεπιδρούν με αυτό. Τομές της ευθείας που ορίζει το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα με υπάρχουσες γραμμές του γεωμετρικού προτύπου δεν δημιουργούν επιπλέον γεωμετρικά σημεία.

3. Δημιουργία πίεσης νερού των πόρων

Μετά την εισαγωγή του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα δημιουργούνται οι πιέσεις του νερού των πόρων. Αυτόματα εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο απεικονίζονται οι πιέσεις αυτές καθώς και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα. Οι πιέσεις των πόρων δεν είναι ενεργές μέχρι τη στιγμή που ουσιαστικά εφαρμόζονται στους υπολογισμούς. Η ενεργοποίησή τους σχετίζεται με την ενεργοποίηση του βάρους του εδάφους χρησιμοποιώντας τον πολλαπλασιαστή ΣΜweight. Τα τασικά σημεία που βρίσκονται σε στοιχεία τα οποία έχουν μηδενική σταθερή πίεση πόρων θεωρούνται ξηρά, ενώ εκείνα που βρίσκονται σε στοιχεία που έχουν μη μηδενική σταθερή πίεση πόρων, θεωρούνται κορεσμένα. Έτσι, η τιμή της πίεσης των πόρων καθορίζει εάν στους υπολογισμούς για κάποιο δεδομένο στοιχείο θα χρησιμοποιηθεί το ξηρό ή το υγρό φαινόμενο βάρος του.

Προσδιορισμός αρχικής γεωμετρίας

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

1. Απενεργοποίηση στοιχείων της γεωμετρίας

Σε προβλήματα στα οποία πρόκειται να κατασκευαστούν επιχωματώσεις, να γίνουν εκσκαφές ή διάφορα άλλα έργα, το γεωμετρικό πρότυπο περιέχει κάποια στοιχεία (εδafικά στρώματα, δοκούς, γεωφύσματα, αγκύρια), τα οποία είναι αρχικά ανενεργά. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να απενεργοποιούνται κατά τον προσδιορισμό της αρχικής γεωμετρίας. Αρχικά, όλα τα στοιχεία του γεωμετρικού προτύπου θεωρούνται ενεργά. Η απενεργοποίησή τους γίνεται με την επιλογή τους στο αρχικό γεωμετρικό πρότυπο με το ποντίκι.

2. Μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών

Στο σημείο αυτό της εισαγωγής των δεδομένων μπορεί να γίνει και αλλαγή των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών ή άλλων στοιχείων του γεωμετρικού προτύπου. Η επιλογή αυτή είναι χρήσιμη μόνο στην περίπτωση που το πρότυπο επιλύεται με σταδιακή κατασκευή (staged construction).

3. Δημιουργία αρχικών τάσεων (διαδικασία K_0)

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

Στη διαδικασία K_0 , εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου που περιέχει έναν πίνακα όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις τιμές του συντελεστή αυτού. Εξ' ορισμού, οι τιμές του K_0 που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προκύπτουν από τη σχέση του Jaky

$(1-\sin\phi)$, ενώ αν ο χρήστης επιθυμεί μπορεί να τις αλλάξει, με την επιφύλαξη ότι δεν πρέπει να εισάγονται πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές του K_0 .

Μετά τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων, οι αρχικές ενεργές τάσεις απεικονίζονται στην επιφάνεια του προτύπου. Γενικά, οι αρχικές τάσεις σε ένα τασικό σημείο προκύπτουν από το βάρος του υλικού πάνω από το σημείο αυτό και την τιμή του ΣΜweight από τη σχέση:

$$\sigma_{v,0} = \text{ΣΜweight}((\gamma_{\text{average}} \cdot z) - p_w) \quad [5.7]$$

όπου γ_{average} είναι το μέσο φαινόμενο βάρος των υπερκείμενων του σημείου υλικών, z είναι το βάθος κάτω από την επιφάνεια και p_w είναι η αρχική πίεση των πόρων στο σημείο αυτό.

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

5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Μετά τη δημιουργία του προτύπου των πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί (Calculations). Γι' αυτό το λόγο πρέπει να οριστούν ο τύποι των υπολογισμών καθώς επίσης και οι τύποι των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν κατά τη διάρκειά τους. Το Plaxis, έχει τη δυνατότητα διαφόρων τύπων υπολογισμών. Το πρόγραμμα θεωρεί μόνο ανάλυση παραμόρφωσης και διαχωρίζει τους τύπους των υπολογισμών σε: α) ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου, β) ανάλυση στερεοποίησης, γ) ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis). Για λόγους οικονομίας θα αναφερθεί μόνο ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και που είναι η ανάλυση με υπολογισμό της πλαστικότητας του προτύπου.

5.3.1 ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΜΙΑ ΝΕΑ ΦΑΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Έστω ένα νέο πρόβλημα στο οποίο δεν έχουν ακόμη οριστεί οι διάφορες φάσεις υπολογισμών. Στην περίπτωση αυτή, η λίστα του παραθύρου διαλόγου του Σχήματος 5.9, περιέχει μόνο μια γραμμή, που ορίζεται ως «αρχική φάση». Η αρχική φάση (initial phase), αντιπροσωπεύει την κατάσταση του προβλήματος, όπως αυτή ορίστηκε στον

προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων και αποτελεί το σημείο έναρξης των περαιτέρω υπολογισμών. Για την εισαγωγή της πρώτης φάσης υπολογισμών για το δεδομένο πρόβλημα, δίνεται η επιλογή Next πάνω από τη λίστα των φάσεων υπολογισμού και εμφανίζεται μια νέα γραμμή.

Μετά την εισαγωγή της, η φάση αυτή πρέπει να οριστεί. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των τριών διαφορετικών «φύλλων» επιλογών (tabsheets) που περιέχει το παράθυρο διαλόγου, που αναφέρονται στα γενικά χαρακτηριστικά της φάσης, τις παραμέτρους και τους πολλαπλασιαστές.

Γενικές ρυθμίσεις

Το «φύλλο» επιλογών αυτό, περιέχει τις γενικές ρυθμίσεις μιας δεδομένης φάσης υπολογισμών, που διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τύπος υπολογισμών

Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τύπος με βάση τον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί, καθώς επίσης και η διαδικασία σταδιακής φόρτισης που θα χρησιμοποιηθεί.

2. Φάση

Εδώ προσδιορίζεται η φάση των υπολογισμών και ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι που είναι η αλληλουχία με την οποία αυτές θα πραγματοποιηθούν, επιλέγοντας σε κάθε φάση την προηγούμενή της, το τέλος της οποίας αποτελεί έναρξη της νέας.

3. Σχόλια και πληροφορίες

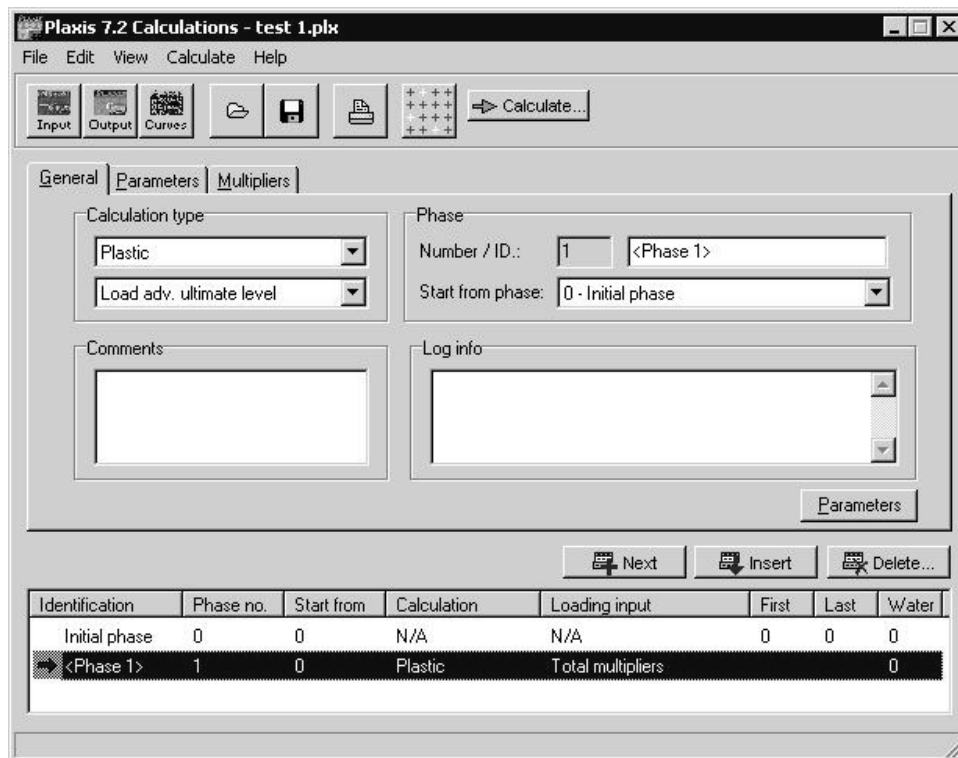
Υπάρχει ένα πλαίσιο κειμένου όπου μπορούν να αποθηκευτούν πληροφορίες σχετικές με οποιαδήποτε από τις φάσεις υπολογισμών καθώς και ένα πλαίσιο όπου αναγράφονται πληροφορίες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της επίλυσης, όπως για παράδειγμα σφάλματα αυτής.

Τύποι υπολογισμών

Η πρώτη παράμετρος που ορίζεται με τη δημιουργία μιας νέας φάσης υπολογισμών είναι ο τύπος της επίλυσης. Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι:

✓ Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου (Plastic)

Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με σκοπό την πραγματοποίηση μιας ελαστοπλαστικής ανάλυσης παραμόρφωσης όπου δεν είναι απαραίτητο να



Σχήμα 5.9: Βασικό παράθυρο διαλόγου προγράμματος υπολογισμών (Plaxis Manual, 1998).

συμπεριληφθούν επιδράσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Ο πίνακας ακαμψίας σε αυτού του τύπου την επίλυση βασίζεται στην αρχική, μη παραμορφωμένη γεωμετρία του προτύπου. Γενικά, η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές, ενώ δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του χρόνου, εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους (Soft soil creep model).

✓ Ανάλυση στερεοποίησης (consolidation)

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

✓ Ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis)

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

του πίνακα ακαμψίας αυτού, βασίζεται στην παραμορφωμένη γεωμετρία του προτύπου.

Διαδικασίες σταδιακής φόρτισης

Στους υπολογισμούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όταν εμπλέκεται η πλαστικότητα των εδαφών, οι εξισώσεις γίνονται μη γραμμικές (χωρίς δηλαδή να έχουν μονοσήμαντα καθορισμένη λύση) που σημαίνει ότι το πρόβλημα πρέπει να επιλυθεί σε μια σειρά διαδοχικών βημάτων. Ένα σημαντικό κομμάτι της μη γραμμικής διαδικασίας επίλυσης είναι η επιλογή των βημάτων και του αλγόριθμου που θα χρησιμοποιηθεί. Στο σημείο αυτό ο χρήστης έχει τρεις επιλογές:

1. Να ορίσει ο ίδιος των αριθμό των βημάτων υπολογισμών, ενώ οι επαναληπτικές διαδικασίες πραγματοποιούνται αυτόματα.
2. Να χρησιμοποιήσει αυτόματες διαδικασίες καθορισμού των βημάτων επίλυσης. Σε αυτή την περίπτωση και οι δύο αλγόριθμοι προοδευτικής φόρτισης (τελικού σταδίου και αριθμού βημάτων) είναι αυτοματοποιημένοι. Όταν επιλεγεί κάποιος από τους δύο αυτούς αλγόριθμους, τότε το μέγεθος του πρώτου βήματος υπολογισμών μπορεί να καθοριστεί είτε αυτόματα, ή από το χρήστη. Η διαδικασία που ακολουθεί περιγράφεται παρακάτω:

Όταν εφαρμοστεί το πρώτο βήμα επίλυσης, πραγματοποιείται μια σειρά επαναλήψεων με σκοπό την επίτευξη της ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στη μάζα του προτύπου. Υπάρχουν τρία πιθανά αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας.

- ✓ Η λύση φτάνει σε ισορροπία σε αριθμό επαναλήψεων μικρότερο από τον επιθυμητό, όπως αυτός ορίζεται στις παραμέτρους ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Το βήμα υπολογισμών σε αυτή την περίπτωση θεωρείται μικρό, επομένως ο πολλαπλασιαστής που αναφέρεται στην αύξηση της φόρτισης διπλασιάζεται και γίνονται περαιτέρω επαναλήψεις για την επίτευξη της ισορροπίας.
- ✓ Η λύση δεν συγκλίνει μέσα στο επιθυμητό εύρος αριθμού επαναλήψεων (ο μέγιστος επιθυμητός αριθμός δεν επαρκεί για τη σύγκλιση). Σε αυτή την

περίπτωση το βήμα υπολογισμών θεωρείται μεγάλο, ο πολλαπλασιαστής που αναφέρεται στην αύξηση της φόρτισης υποδιπλασιάζεται και η διαδικασία των επαναλήψεων συνεχίζεται.

- ✓ Ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων βρίσκεται μέσα στο επιθυμητό εύρος, οπότε ο πολλαπλασιαστής αύξησης της φόρτισης θεωρείται ικανοποιητικός.

Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου

Η επιλογή αυτή χρησιμοποιεί αυτόματες διαδικασίες για τον καθορισμό του μεγέθους του βήματος. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει ένα χαρακτηριστικό το οποίο τερματίζει τους υπολογισμούς όταν επιτυγχάνεται ένα καθορισμένο επίπεδο φόρτισης ή κάποια φόρτιση που οδηγεί σε αστοχία. Ο αριθμός των επιπλέον βημάτων επιλέγεται από το χρήστη. Το μέγεθος του πρώτου βήματος υπολογισμών προκύπτει αυτόματα χρησιμοποιώντας μια από τις ακόλουθες μεθόδους, με συννηθέστερα χρησιμοποιούμενη την πρώτη:

1. Το Plaxis πραγματοποιεί ένα δοκιμαστικό βήμα υπολογισμών και προσδιορίζει το κατάλληλο μέγεθος βήματος με βάση τη δοκιμή αυτή.
2. Το Plaxis ορίζει το μέγεθος του αρχικού βήματος φόρτισης να είναι ίσο με το τελικό μέγεθος βήματος φόρτισης κάποιου από τους προηγούμενους υπολογισμούς.

Οι υπολογισμοί συνεχίζονται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα από τα παρακάτω τρία κριτήρια:

- ✓ Έχει εφαρμοστεί ο μέγιστος αριθμός βημάτων υπολογισμών.
- ✓ Έχει εφαρμοστεί το ολικό φορτίο στο πρότυπο.
- ✓ Έχει επιτευχθεί φορτίο το οποίο οδήγησε σε αστοχία. Αστοχία εμφανίζεται όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο μειώνεται σε μέγεθος σε δύο διαδοχικά και επιτυχή βήματα επίλυσης.

Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης

Σε αυτή την επιλογή ορίζεται ο αριθμός των βημάτων υπολογισμών. Αυτή η παράμετρος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο μια και η επίλυση πάντα χρησιμοποιεί το

σύνολο των βημάτων που ορίζονται, των οποίων το μέγεθος προκύπτει μέσω αυτόματης διαδικασίας. Η επιλογή αυτή θεωρείται πιο κατάλληλη για περιπτώσεις στις οποίες αναμένεται κάποιο φορτίο που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η ανάλυση της ευστάθειας πρανών με τη διαδικασία της σταδιακής μείωσης της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού, θα πρέπει να πραγματοποιείται με βάση αυτή την επιλογή. Σημειώνεται επίσης ότι η επιλογή αυτή εφαρμόζεται μόνο σε συνδυασμό με το κριτήριο Mohr – Coulomb.

Εάν επιλεγεί αυτή η διαδικασία, τότε είναι απαραίτητος ο καθορισμός από το χρήστη του αρχικού μεγέθους βήματος. Η επίλυση συνεχίζεται μέχρις ότου πραγματοποιηθεί ο μέγιστος αριθμός βημάτων υπολογισμών. Σε αντίθεση με τη διαδικασία τελικού σταδίου που περιγράφηκε παραπάνω, οι υπολογισμοί δεν σταματούν ακόμη και αν εμφανιστεί αστοχία. Επίσης δεν μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων ποιο θα είναι το επίπεδο φόρτισης στο τέλος των υπολογισμών.

Παράμετροι υπολογισμών

Το «φύλλο» στο οποίο καθορίζονται οι παράμετροι των φάσεων υπολογισμού περιέχει τις ακόλουθες επιλογές:

Παράμετροι ελέγχου (control parameters)

Βήματα υπολογισμών

Η παράμετρος αυτή προσδιορίζει τον (μέγιστο) αριθμό βημάτων υπολογισμών τα οποία πραγματοποιούνται σε μια δεδομένη φάση υπολογισμών. Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο καθορισμός του αριθμού των βημάτων υπολογισμών από το χρήστη (manual control), η αρχική τιμή των επιπλέον βημάτων είναι ίση με 1 που σημαίνει ότι οι υπολογισμοί στη δεδομένη φάση πραγματοποιούνται σε ένα βήμα.

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης, ο αριθμός των βημάτων ορίζεται ως ένας ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί στα απαιτούμενα βήματα φόρτισης για τη δεδομένη φάση υπολογισμών. Τέλος, για τον αλγόριθμο προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου, ο αριθμός των επιπλέον βημάτων αποτελεί το άνω όριο του πραγματικού αριθμού βημάτων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν για την επίλυση.

Μηδενισμός παραμορφώσεων

Η ρύθμιση αυτή επιλέγεται όταν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν σε προηγούμενα στάδια υπολογισμών δεν ενδιαφέρουν και πρέπει να αγνοηθούν κατά την έναρξη της δεδομένης φάσης, έτσι ώστε αυτή να ξεκινά από μια κατάσταση μηδενικών παραμορφώσεων. Για παράδειγμα, οι παραμορφώσεις από την επίδραση του ίδιου του βάρους των υλικών, δεν έχουν καμία φυσική σημασία κατά την επίλυση και έτσι η ρύθμιση μηδενισμού των παραμορφώσεων επιλέγεται συνήθως μετά από κάποιο τέτοιο στάδιο. Στην περίπτωση που δεν επιλεγεί η ρύθμιση αυτή, οι παραμορφώσεις που προκύπτουν στη δεδομένη φάση υπολογισμών, προστίθενται σε αυτές της προηγούμενης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μηδενισμός των παραμορφώσεων δεν επηρεάζει το εντατικό πεδίο του προτύπου.

Αγνόηση μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς

Η ρύθμιση αυτή επιλέγεται στην περίπτωση που επιθυμείται ο προσωρινός αποκλεισμός της επίδρασης της μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν μη στραγγιζόμενα υλικά. Έτσι, όλα τα μη στραγγιζόμενα υλικά γίνονται προσωρινά στραγγιζόμενα. Η υπάρχουσα περίσσεια πίεση των πόρων η οποία δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο παραμένει, ενώ δεν δημιουργείται παραπάνω σε αυτή τη φάση υπολογισμών.

Διαγραφή ενδιάμεσων σταδίων

Η ρύθμιση αυτή επιλέγεται στην περίπτωση που οι υπολογισμοί γίνονται με τον αλγόριθμο προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου, κυρίως για εξοικονόμηση χώρου στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή. Κατά την επιλογή της ρύθμισης αυτής, όλα τα πρόσθετα βήματα υπολογισμών στη δεδομένη φάση (εκτός του τελευταίου), διαγράφονται, εφόσον βέβαια η φάση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία. Γενικά, το τελευταίο βήμα υπολογισμών περιέχει τα πιο σχετικά αποτελέσματα για τη δεδομένη φάση, ενώ τα ενδιάμεσα βήματα είναι λιγότερο σχετικά γι' αυτό και η διαγραφή τους δεν επηρεάζει ουσιαστικά την επίλυση.

Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας

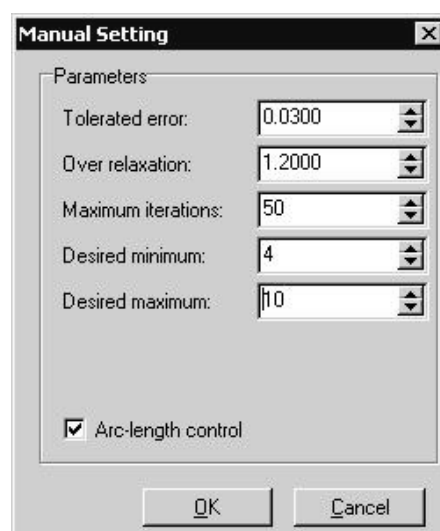
Η επαναληπτική διαδικασία επηρεάζεται από κάποιες παραμέτρους ελέγχου, οι οποίες ορίζονται σε αυτό το στάδιο της επίλυσης. Ειδικότερα, το Plaxis δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ:

- Α. των καθορισμένων από το ίδιο το πρόγραμμα ρυθμίσεων (standard settings), οι οποίες φαίνεται να λειτουργούν αρκετά καλά στις περισσότερες επαναληπτικές διαδικασίες (Σχήμα 5.10), και
- Β. των ρυθμίσεων που κάνει ο ίδιος ο χρήστης (manual settings), εφόσον σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητο να αλλάξουν οι καθορισμένες ρυθμίσεις. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης καλείται να επιλέξει ποιες από τις παραμέτρους τις επαναληπτικής διαδικασίας, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10 αλλά και στις επόμενες ενότητες, επιθυμεί να αλλάξει.

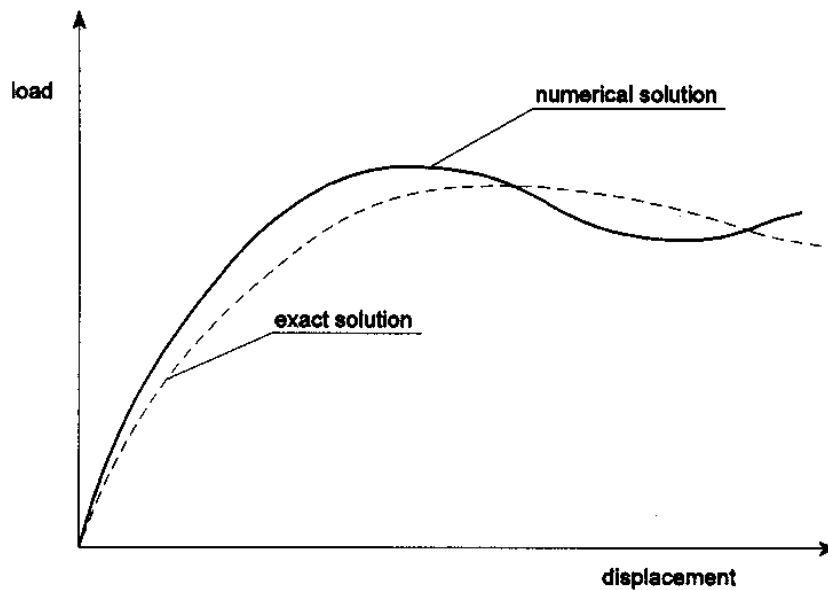
Ανεκτό σφάλμα

Σε μια μη γραμμική ανάλυση όπου χρησιμοποιείται ένας πεπερασμένος αριθμός βημάτων υπολογισμών, υπάρχει μια απόκλιση από την ακριβή λύση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.11. Ο σκοπός ενός αλγορίθμου επίλυσης είναι να εξασφαλίσει ότι τα σφάλματα εξισορρόπησης (τοπικά και καθολικά), παραμένουν μέσα σε κάποια αποδεκτά όρια. Τα όρια σφάλματος που αποδέχεται το Plaxis συνδέονται άμεσα με την τιμή του ανεκτού σφάλματος που ορίζεται σε αυτό το σημείο.

Σε καθένα από τα διαδοχικά βήματα, το Plaxis συνεχίζει τους υπολογισμούς μέχρις ότου τα σφάλματα πάρουν μια τιμή μικρότερη από την καθορισμένη (είτε από το ίδιο το πρόγραμμα ή από το χρήστη). Αν το καθορισμένο ανεκτό σφάλμα έχει υψηλή τιμή, τότε οι υπολογισμοί θα είναι σχετικά σύντομοι, αλλά πιθανότατα και ανακριβείς. Αν



Σχήμα 5.10: Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας (Plaxis Manual, 1998).



Σχήμα 5.11: Πραγματική λύση σε αντιπαράθεση με την υπολογιζόμενη λύση (Plaxis Manual, 1998).

τεθεί ένα μικρό ανεκτό σφάλμα, τότε ο υπολογιστικός χρόνος θα γίνει υπερβολικά μεγάλος. Γενικά, η τιμή του 0,03 (που αντιστοιχεί σε σφάλμα 3%) είναι κατάλληλη για τις περισσότερες επιλύσεις.

Κατά τη διάρκεια καθενός από τα βήματα υπολογισμών, το Plaxis πραγματοποιεί μια σειρά επαναλήψεων με σκοπό τη μείωση των σφαλμάτων της επίλυσης. Με σκοπό τη λήξη της επαναληπτικής διαδικασίας όταν τα σφάλματα είναι αποδεκτά, ορίζονται αυτόματα τα σφάλματα που βρίσκονται εκτός ορίου σε οποιοδήποτε στάδιο της επαναληπτικής διαδικασίας. Για το σκοπό αυτό το Plaxis χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς δείκτες σφάλματος, εκ των οποίων ο ένας βασίζεται στον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος ισορροπίας και ο άλλος είναι ένας τοπικός έλεγχος σφάλματος. Οι τιμές και των δύο αυτών δεικτών πρέπει να είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο για να τερματιστεί η επαναληπτική διαδικασία.

1. Συνολικός έλεγχος σφάλματος

Ο συνολικός έλεγχος σφάλματος που χρησιμοποιείται στο Plaxis, σχετίζεται με το άθροισμα των μεγεθών δυνάμεων στους κόμβους που δεν ισορροπούν. Ο όρος «κομβικές δυνάμεις εκτός ισορροπίας» αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ των εξωτερικών φορτίων και των δυνάμεων που βρίσκονται σε ισορροπία με τις παρούσες τάσεις που επιβάλλονται στους κόμβους. Με σκοπό την εξαγωγή αυτής της παραμέτρου, τα φορτία που βρίσκονται εκτός ισορροπίας θεωρούνται αδιάστατα, όπως φαίνεται από τη σχέση που δίνει το ολικό σφάλμα:

$$Global \ error = \frac{\sum \|Out - of - balance \ nodal \ forces\|}{\sum \|Active \ loads\|} \quad [5.8]$$

όπου στον αριθμητή αναφέρεται το άθροισμα των μέτρων των δυνάμεων στους κόμβους που βρίσκονται εκτός ισορροπίας και στον παρονομαστή το άθροισμα των ενεργών φορτίων.

2. Τοπικός έλεγχος σφάλματος

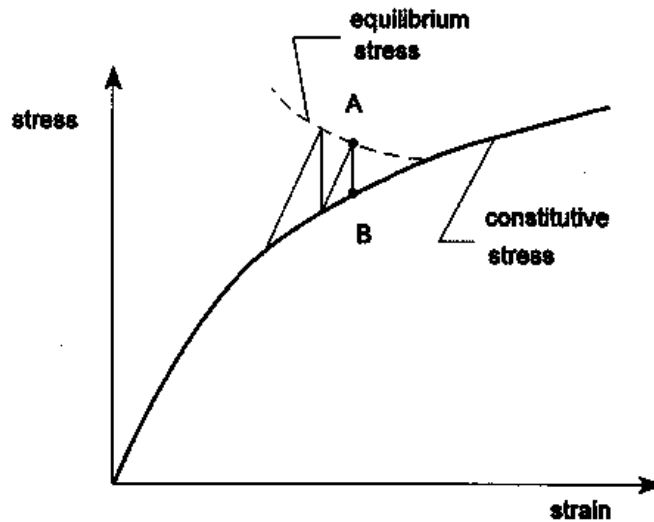
Τα τοπικά σφάλματα αναφέρονται στα σφάλματα καθενός από τα ανεξάρτητα τασικά σημεία. Με σκοπό την κατανόηση της διαδικασίας ελέγχου τοπικού σφάλματος που χρησιμοποιείται στο Plaxis είναι απαραίτητη η εξέταση της μεταβολής της τάσης η οποία πραγματοποιείται σε ένα τυπικό τασικό σημείο κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας.

Η διακύμανση μιας από τις συνιστώσες τάσης κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Στο τέλος κάθε επανάληψης, υπολογίζονται από το πρόγραμμα δύο σημαντικές τιμές τάσεων, η τάση ισορροπίας (equilibrium stress), η οποία προκύπτει απευθείας από τον πίνακα ακαμψίας (σημείο A, Σχήμα 5.12) κατά την επίλυση του μοντέλου, και η τάση που προκύπτει με βάση το καταστατικό μοντέλο η οποία εξάγεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού και αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με αυτή της τάσης ισορροπίας (σημείο B, Σχήμα 5.12). Σημειώνεται ότι με τον όρο παραμόρφωση και ειδικότερα όταν γίνεται αναφορά στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης εννοείται η ανηγμένη παραμόρφωση.

Η διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 5.12 υποδεικνύει τη διαδρομή (path) της τάσης ισορροπίας, η οποία εξαρτάται από τη φύση του εντατικού πεδίου και το εφαρμοζόμενο φορτίο. Για την περίπτωση ενός εδαφικού στοιχείου που υπακούει στο κριτήριο Mohr-Coulomb το τοπικό σφάλμα για τα δεδομένα τασικά σημεία και το τέλος της επανάληψης δίνεται από τη σχέση:

$$Local \ error = \frac{\|\sigma^e - \sigma^c\|}{c \cos \phi + \frac{1}{2} (\sigma_{xx}^c + \sigma_{yy}^c) \sin \phi} \quad [5.9]$$

Στην εξίσωση αυτή ο αριθμητής είναι μια νόρμα της διαφοράς μεταξύ του πίνακα συντελεστών της τάσης ισορροπίας σ^e και του τανυστή της τάσης που προκύπτει από το καταστατικό μοντέλο σ^c . Η νόρμα αυτή ορίζεται από τη σχέση:



Σχήμα 5.12: Τάση ισορροπίας και καταστατική τάση (Plaxis Manual, 1998).

$$\|\sigma\| = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2\sigma_{yz}^2 + 2\sigma_{xz}^2 + 2\sigma_{xy}^2} \quad [5.10]$$

όπου οι όροι σ_{xz} και σ_{yz} είναι πάντα μηδενικοί για επίλυση επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικής ανάλυσης. Ο παρονομαστής της εξίσωσης [5.9] για το τοπικό σφάλμα είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης, όπως αυτή ορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb. Όταν το τασικό σημείο βρίσκεται μέσα σε κάποιο στοιχείο μιας διεπιφάνειας, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$Local \quad error = \frac{\sqrt{(\sigma^e - \sigma^c)^2 + (\tau^e - \tau^c)^2}}{c_i + \sigma^c \tan \phi_i} \quad [5.11]$$

όπου τα τ και σ αντιστοιχούν στην ορθή και διατμητική τάση της διεπιφάνειας αντίστοιχα.

3. Τερματισμός επαναλήψεων

Στο Plaxis, για να τερματιστούν οι επαναλήψεις σε ένα δεδομένο υπολογιστικό βήμα πρέπει να ικανοποιούνται και οι τρεις παράγοντες σφάλματος:

Συνολικό σφάλμα \leq Ανεκτό σφάλμα

Αριθμός μη ακριβών εδαφικών σημείων $\leq 3 + \frac{Αρ. \quad σημείων \quad αστοχίας \quad εδάφους}{10}$

Αριθμός μη ακριβών σημείων διεπιφανειών \leq
 $3 + \frac{Αρ. \quad σημείων \quad αστοχίας \quad διεπιφανειών}{10}$

Διαδικασία υπερχαλάρωσης (over-relaxation)

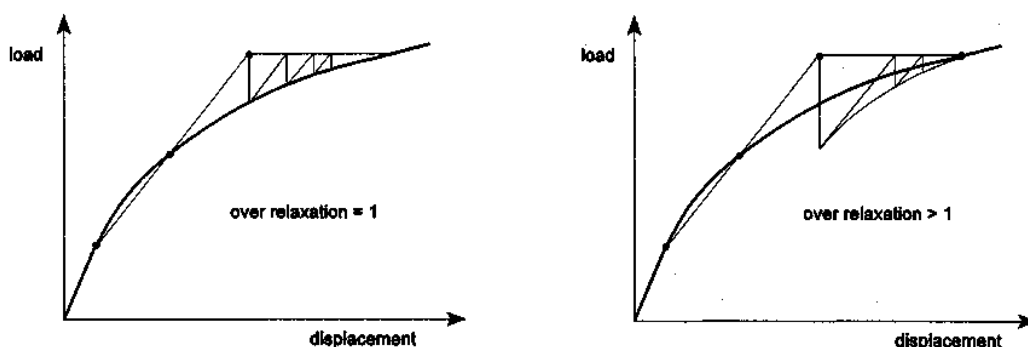
Το Plaxis με σκοπό τη μείωση του αριθμού των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση, χρησιμοποιεί μια διαδικασία υπερχαλάρωσης, όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.13. Η παράμετρος που ελέγχει το βαθμό της υπερχαλάρωσης είναι ο συντελεστής υπερχαλάρωσης (over-relaxation factor). Για σχετικά χαμηλές γωνίες εσωτερικής τριβής εδαφών ($\varphi < 20^\circ$), η τιμή 1,5 για τον συντελεστή υπερχαλάρωσης τείνει να βελτιστοποιεί την επαναληπτική διαδικασία. Αν το πρότυπο περιλαμβάνει εδάφη με υψηλότερες τιμές γωνιών εσωτερικής τριβής, τότε χρησιμοποιούνται χαμηλότερες τιμές του συντελεστή υπερχαλάρωσης. Η τιμή που χρησιμοποιείται συνήθως και είναι αποδεκτή για τις περισσότερες περιπτώσεις είναι το 1,2.

Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων

Ο παράγοντας αυτός αντιπροσωπεύει το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων μέσα σε ένα ανεξάρτητο υπολογιστικό βήμα. Γενικά, η διαδικασία επίλυσης περιορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται. Η παράμετρος αυτή ορίζεται για να εξασφαλιστεί ότι ο υπολογιστικός χρόνος δεν θα γίνει υπερβολικός και γι' αυτό το λόγο η καθορισμένη τιμή για τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων είναι 50.

Επιθυμητό μέγιστο και επιθυμητό ελάχιστο

Στην περίπτωση που για τη διαδικασία επίλυσης έχει επιλεγεί κάποιος από τους αλγόριθμους προοδευτικής φόρτισης, τότε το Plaxis χρησιμοποιεί μια διαδικασία που ορίζεται από δύο παραμέτρους (το επιθυμητό μέγιστο και ελάχιστο), οι οποίες καθορίζουν τον μέγιστο και ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων σε κάθε βήμα υπολογισμών αντίστοιχα. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι 10 και 4 αντίστοιχα, με δυνατότητα τροποποίησής τους από το χρήστη.



Σχήμα 5.13: Επαναληπτική διαδικασία με και χωρίς τη χρήση συντελεστή υπερχαλάρωσης (Plaxis Manual, 1998).

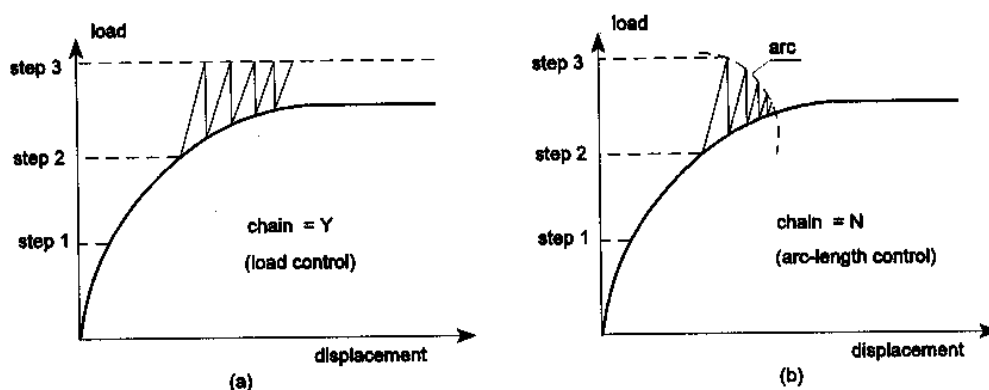
Έλεγχος μήκους τόξου (arc-length control)

Η διαδικασία του ελέγχου μήκους τόξου είναι μια μέθοδος η οποία επιλέγεται από το Plaxis με σκοπό την επίτευξη φορτίων αστοχίας που θα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά. Στο Σχήμα 5.14a απεικονίζεται η επαναληπτική διαδικασία χωρίς την επιλογή του ελέγχου του μήκους τόξου για την περίπτωση στην οποία προσεγγίζεται ένα φορτίο αστοχίας. Όπως είναι φανερό ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει σε αυτή την περίπτωση. Στο Σχήμα 5.14b, όπου έχει επιλεγεί ο έλεγχος μήκους τόξου, το πρόγραμμα αυτόματα εκτιμά την ποσότητα του εξωτερικού φορτίου το οποίο πρέπει να επιβληθεί για να εμφανιστεί αστοχία. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση που δεν έχει επιλεγεί ο έλεγχος μήκους τόξου δεν είναι δυνατή η αύξηση του εξωτερικού φορτίου μέχρι αστοχίας του υλικού.

Εισαγωγή δεδομένων φόρτισης

Στο σημείο αυτό καθορίζεται ο τύπος φόρτισης που θεωρείται ότι εφαρμόζεται στη δεδομένη φάση υπολογισμών. Στην περίπτωση που γίνεται ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου, το Plaxis διακρίνει τρεις διαφορετικούς τύπους εισαγωγής δεδομένων φόρτισης:

1. Φόρτιση με την έννοια της αύξησης ή μείωσης των εξωτερικών δυνάμεων, η οποία ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές σε κάθε στάδιο ή συνολικά.
2. Φόρτιση με την έννοια της μεταβολής του βάρους, της αντοχής ή της ακαμψίας των στοιχείων, η οποία ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του προτύπου ή την επίδραση της πίεσης των πόρων, μέσω της εντολής της σταδιακής κατασκευής (staged construction).



Σχήμα 5.14: Επαναληπτική διαδικασία για α) κανονικό έλεγχο φορτίου και β) έλεγχο μήκους τόξου (Plaxis Manual, 1998).

3. Φόρτιση με την έννοια της μείωσης της αντοχής (Phi-c reduction) για την ανάλυση της ευστάθειας, η οποία ενεργοποιείται με τον ορισμό του πολλαπλασιαστή ΣMsf.

Πολλαπλασιαστές φορτίων

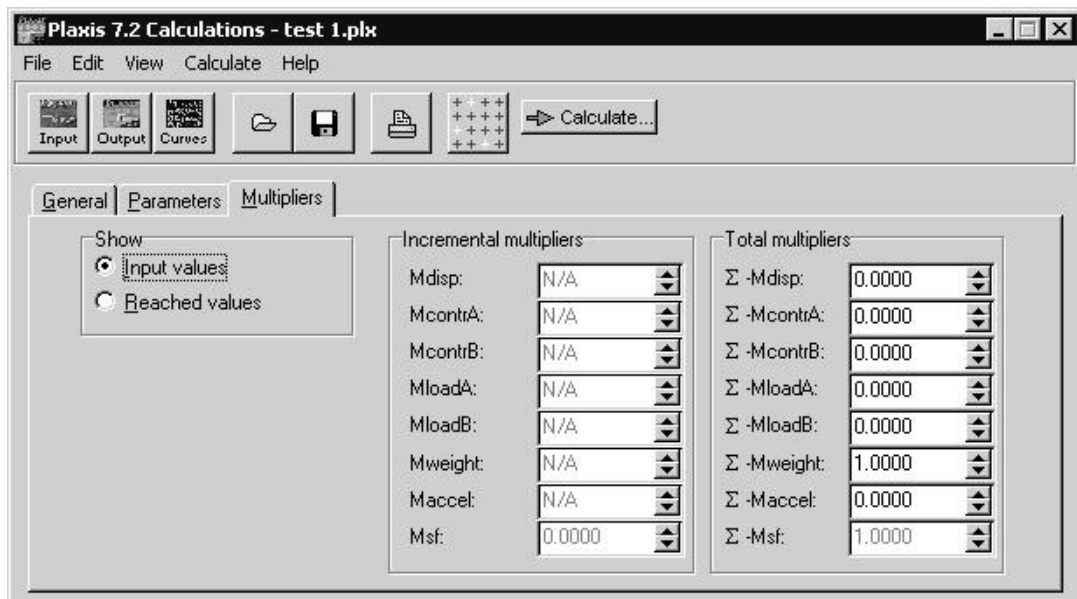
Κατά τη διάρκεια της επίλυσης ενός προτύπου για τον προσδιορισμό της κατανομής των παραμορφώσεων στη μάζα του, είναι απαραίτητος ο έλεγχος όλων των ειδών φορτίσεων που επιδέχεται αυτό. Τα φορτία που εφαρμόζονται σε κάθε στάδιο δίνονται από την αρχική τιμή του φορτίου, όπως αυτή έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων, καθώς και τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή. Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ δύο ειδών πολλαπλασιαστές, όπως αυτοί ορίζονται ακολούθως. Το κάθε είδος πολλαπλασιαστή χρησιμοποιείται ανάλογα με τον τύπο της επίλυσης που έχει επιλεγεί. Η εισαγωγή των τιμών των πολλαπλασιαστών γίνεται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.15. Είναι φανερό ότι οι πολλαπλασιαστές είναι αδιάστατα μεγέθη.

1. Για κάθε στάδιο φόρτισης (incremental multipliers)

Επιλέγοντας τιμή για κάποιον πολλαπλασιαστή σε κάθε στάδιο φόρτισης, ουσιαστικά ορίζεται από τη χρήστη η σταδιακή επιβολή των εξωτερικών φορτίων. Σημειώνεται ότι τα τελικά φορτία σε ένα υπολογιστικό βήμα επηρεάζονται από την επίδραση του ελέγχου μήκους τόξου, αν η διαδικασία αυτή είναι ενεργοποιημένη. Πριν από την εισαγωγή ενός σταδίου για την επιβολή ενός τμήματος του εξωτερικού φορτίου, μπορεί να εισαχθεί και ένας πολλαπλασιαστής για το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα επιβληθεί το φορτίο αυτό. Ο παράγοντας χρόνος εισάγεται στις μονάδες που έχουν καθοριστεί στο πρόγραμμα εισαγωγής των δεδομένων και που συνήθως είναι μέρες και χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που επιλεγεί κάποιος από τους τύπους φόρτισης που επηρεάζεται από το χρόνο (π.χ. στερεοποίηση).

2. Συνολικοί πολλαπλασιαστές

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου, τότε ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων επιλέγοντας τη ρύθμιση των συνολικών πολλαπλασιαστών (total multipliers). Τα μέγιστα φορτία που ορίζονται από τους συνολικούς πολλαπλασιαστές φόρτισης, εφαρμόζονται ακριβώς στο τέλος κάθε σταδίου



Σχήμα 5.15: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής πολλαπλασιαστών (Plaxis Manual, 1998).

υπολογισμών, δεδομένου ότι δεν έχει εμφανιστεί προηγουμένως μηχανισμός θραύσης ή αποφόρτισης.

Σταδιακή κατασκευή

Στην περίπτωση της σταδιακής κατασκευής (staged construction) ο χρήστης ορίζει την τελική κατάσταση κάθε σταδίου μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του προτύπου ή την πίεση των πόρων. Η διαδικασία αυτή δίνει μια ρεαλιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς των εδαφών (με μεγαλύτερη ακρίβεια) έπειτα από την επιβολή διαφόρων κατασκευαστικών έργων ή εκσκαφών. Εκτός από τη μεταβολή της πίεσης των πόρων και της γεωμετρίας του προτύπου, μπορούν επίσης να μεταβληθούν και οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών τα οποία συμμετέχουν στο πρότυπο.

Η σταδιακή κατασκευή αποτελεί ειδικό τμήμα της διαδικασίας επίλυσης με τον αλγόριθμο προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου. 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 προτύπου. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να υποβιβάσει τον υδροφόρο ορίζοντα ώστε να μεταβάλει την πίεση των πόρων.

Μείωση των παραμέτρων αντοχής

Στο Plaxis, η ανάλυση της ευστάθειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας τις παραμέτρους αντοχής των εδαφικών υλικών (phi-c reduction). Όταν γίνεται ανάλυση

ευστάθειας με τη μέθοδο της μείωσης των παραμέτρων αντοχής, δεν μπορεί να πραγματοποιείται ταυτόχρονη αύξηση των εξωτερικών φορτίων. Για το λόγο αυτό, η ρύθμιση αυτή θεωρείται ότι αποτελεί ξεχωριστό τύπο φόρτισης ο οποίος μπορεί να επιλεγεί στην περίπτωση που πραγματοποιείται επίλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο προοδευτικών βημάτων φόρτισης. Ο παράγοντας χρόνος δεν λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση αυτή.

Η διαδικασία σταδιακής μείωσης των παραμέτρων αντοχής χρησιμοποιείται όπως προαναφέρθηκε για την ανάλυση ευστάθειας, δηλαδή για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανούς ή μιας κατασκευής. Ειδικότερα, γίνεται προοδευτική μείωση των αρχικών τιμών της συνοχής c και της εφαπτομένης της γωνιάς εσωτερικής τριβής $\tan\phi$ έως ότου εμφανιστεί αστοχία του προσομοιώματος της κατασκευής. Κατά τον ίδιο τρόπο μειώνεται και η αντοχή των διεπιφανειών, ενώ ανεπηρέαστα μένουν τα αγκύρια και οι δοκοί.

Ο συνολικός πολλαπλασιαστής ΣMsf χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων συνοχής σε ένα δεδομένο στάδιο της ανάλυσης:

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad [5.12]$$

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

$\phi_{reduced}$ = η μειωμένη τιμή της γωνιάς 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.

Σε αντίθεση με τους άλλους πολλαπλασιαστές, στην αρχή κάθε σταδίου επίλυσης η τιμή του παράγοντα ΣMsf τίθεται ίση με 1,0 έτσι ώστε όλες οι τιμές των παραμέτρων αντοχής των υλικών να έχουν αρχικά τις μη μειωμένες τιμές. Οι παράμετροι αντοχής μειώνονται αυτόματα μέχρι αστοχίας της κατασκευής και στο σημείο αυτό ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \Sigma Msf \text{ at failure} \quad [5.13]$$

Η προσέγγιση αυτή παρομοιάζεται με τη μέθοδο υπολογισμών του συντελεστή ασφάλειας που χρησιμοποιείται συμβατικά στις αναλύσεις κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης. Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας προτείνεται η χρήση της διαδικασίας ελέγχου μήκους τόξου, με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση της αστοχίας καθώς και η χρήση ενός ανεκτού σφάλματος μικρότερου του 3%.

5.3.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

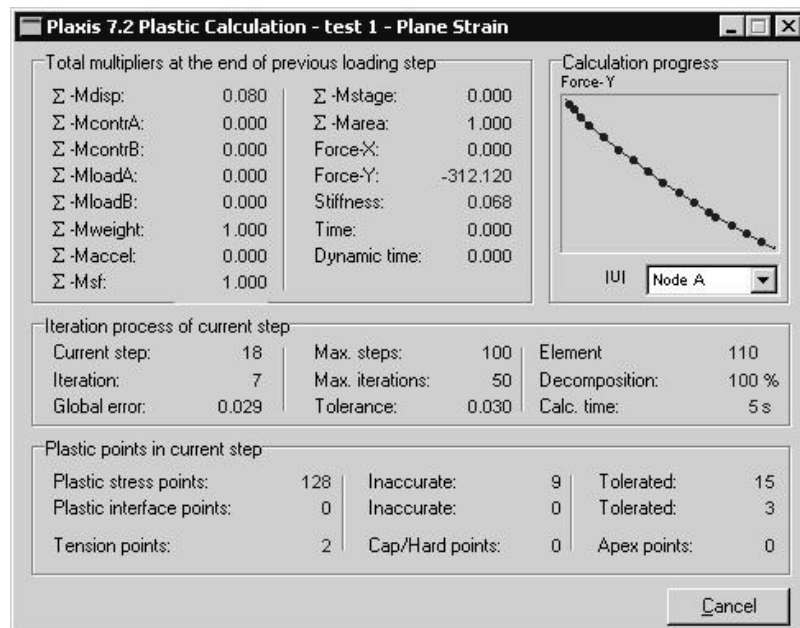
Μετά τον ορισμό των φάσεων υπολογισμών και πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης, επιλέγονται κάποια σημεία στο επίπεδο του προτύπου, για τη δημιουργία καμπυλών τάσης - παραμόρφωσης ή μεταβολής τάσεων. Τα σημεία αυτά είναι είτε οι κόμβοι των στοιχείων ή τα τασικά σημεία του προτύπου. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, οι πληροφορίες για τα δεδομένα σημεία αποθηκεύονται σε ξεχωριστά αρχεία. Μετά το τέλος της επίλυσης οι καμπύλες σχεδιάζονται στο πρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών (Curves program) που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Η δημιουργία των καμπυλών για τα δεδομένα σημεία βασίζεται στις πληροφορίες που έχουν αποθηκευτεί στα αρχεία που προαναφέρθηκαν. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να σχεδιαστούν καμπύλες για σημεία τα οποία δεν έχουν εξαρχής επιλεγεί για το σκοπό αυτό.

5.3.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Αφού έχουν πλέον οριστεί και τα σημεία για τα οποία πρόκειται να σχεδιαστούν οι καμπύλες, ακολουθεί η εκτέλεση της διαδικασίας υπολογισμών. Με την έναρξη της διαδικασίας αυτής και για κάθε φάση επίλυσης (αφού καθεμία από αυτές επιλύεται ξεχωριστά), εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.16 στο οποίο αναγράφονται κάποιες πληροφορίες σχετικές με τη διαδικασία επίλυσης.

Αριθμός βήματος και επανάληψης

Οι τιμές του τρέχοντος βήματος και επανάληψης (step and iteration numbers) αντιστοιχούν στο υπολογιστικό βήμα και την επανάληψη που πραγματοποιείται τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η τιμή του μέγιστου αριθμού βημάτων αναφέρεται στον αριθμό του τελευταίου βήματος της συγκεκριμένης φάσης υπολογισμών όπως έχει οριστεί στην παράμετρο των επιπλέον βημάτων υπολογισμών. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων αντιστοιχεί στην τιμή των επαναλήψεων που έχουν οριστεί στις



Σχήμα 5.16: Παράθυρο διαλόγου διαδικασίας υπολογισμών (Plaxis Manual, 1998).

ρυθμίσεις που έχουν γίνει όσο αφορά την επαναληπτική διαδικασία για τη δεδομένη φάση υπολογισμών.

Συνολικό σφάλμα

Το συνολικό σφάλμα (global error) είναι ένα μέτρο των συνολικών σφαλμάτων ισορροπίας μέσα στο συγκεκριμένο βήμα υπολογισμών. Τα σφάλματα αυτά τείνουν να μειώνονται όσο προχωράει ο αριθμός των επαναλήψεων.

Ανεκτικότητα

Η ανεκτικότητα (tolerance) αναφέρεται στο μέγιστο ανεκτό σφάλμα ισορροπίας. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το συνολικό σφάλμα γίνει μικρότερο του ανεκτού. Η τιμή της ανεκτικότητας αντιστοιχεί στην τιμή του ανεκτού σφάλματος που έχει οριστεί στις ρυθμίσεις της επαναληπτικής διαδικασίας.

Σημεία αστοχίας

Αναφέρεται στο συνολικό αριθμό τασικών σημείων στα εδαφικά στοιχεία, τα οποία βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση (plastic stress points). Συμπεριλαμβάνονται εκτός από τα σημεία τα οποία αγγίζουν το φάκελο Mohr-Coulomb και τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση λόγω σκλήρυνσης (hardening plasticity).

Σημεία αστοχίας διεπιφανειών

Αναφέρεται στο συνολικό αριθμό τασικών σημείων στις διεπιφάνειες τα οποία βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση (plastic interface points).

Ανακριβή τασικά σημεία

Οι τιμές των ανακριβών τασικών σημείων αναφέρονται στα σημεία αστοχίας που βρίσκονται στα εδαφικά στοιχεία και στοιχεία διεπιφανειών, για τα οποία το τοπικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο του ανεκτού σφάλματος (inaccurate stress points).

Ανεκτός αριθμός ανακριβών τασικών σημείων

Αναφέρεται στο μέγιστο αριθμό ανεκτών μη ακριβών τασικών σημείων στα εδαφικά στοιχεία ή στα στοιχεία των διεπιφανειών (tolerated number of inaccurate stress points). Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου ο αριθμός των μη ακριβών στοιχείων γίνει μικρότερος του ανεκτού ορίου που έχει καθοριστεί σε προηγούμενο στάδιο.

Σημεία εφελκυσμού

Ονομάζονται έτσι τα τασικά σημεία τα οποία αστοχούν σε εφελκυσμό. Τα σημεία αυτά αναπτύσσονται όταν χρησιμοποιείται η επιλογή αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων, σε κάποια από τα δεδομένα εισαγωγής των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών.

Σημεία Cap/Hard

Ένα Cap σημείο εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο μαλακού εδάφους (soft soil model) και η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο γίνει ίση με την τάση προστερεοποίησης, δηλαδή τη μέγιστη τάση στην οποία έχει ποτέ στο παρελθόν υποβληθεί το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό. Ένα Hard σημείο εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (hardening soil model) και η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο αντιστοιχεί στη μέγιστη γωνία εσωτερικής τριβής η οποία έχει προηγουμένως επιτευχθεί.

Σημεία Apex

Πρόκειται για ειδικά σημεία αστοχίας όπου η επιτρεπόμενη διατμητική τάση είναι ίση με το μηδέν. Η επαναληπτική διαδικασία τείνει να γίνεται αργή όταν ο αριθμός των apex points γίνεται μεγάλος. Τέτοιου είδους σημεία μπορούν αν αποφευχθούν στην περίπτωση που επιλεγεί η ρύθμιση αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων για τα εδαφικά υλικά και τις διεπιφάνειες.

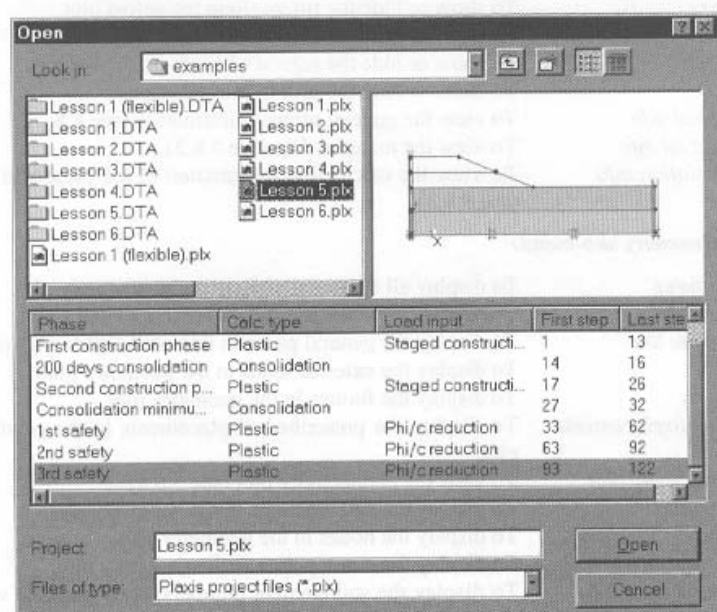
5.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα κύρια ζητούμενα που υπολογίζονται από την επίλυση ενός προτύπου πεπερασμένων στοιχείων είναι οι παραμορφώσεις στους κόμβους των στοιχείων και οι τάσεις στα τασιακά σημεία. Το Plaxis διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό από διαφορετικούς τρόπους απεικόνισης των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.17 γίνεται η επιλογή του αρχείου του οποίου τα αποτελέσματα ζητείται να εξεταστούν. Κατά την επιλογή ενός συγκεκριμένου project εμφανίζονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου και οι υπολογιστικές φάσεις τις οποίες αυτό περιέχει. Μετά την επιλογή της φάσης υπολογισμών που ενδιαφέρει, εμφανίζεται μια νέα φόρμα αποτελεσμάτων στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τελευταίου υπολογιστικού βήματος της δεδομένης φάσης. Εκτός όμως από την κατάσταση όπως αυτή διαμορφώνεται μετά το τελευταίο υπολογιστικό βήμα κάθε φάσης, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να επιλέξει να δει τα αποτελέσματα και σε κάποιο άλλο υπολογιστικό βήμα.

Στο συγκεκριμένο υπο-πρόγραμμα του Plaxis μπορεί κανείς να δει ότι αφορά:

- ✓ τις παραμορφώσεις
- ✓ τις τάσεις



Σχήμα 5.17: Παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου και υπολογιστικής φάσης για την εμφάνιση αποτελεσμάτων (Plaxis Manual, 1998).

- ✓ τις κατασκευές και τις διεπιφάνειες
- ✓ τους σχετικούς πίνακες αποτελεσμάτων
- ✓ τα διαγράμματα σε τομές του προτύπου (cross sections)

Στις ενότητες που ακολουθούν αναπτύσσεται ο καθένας από τους παράγοντες ξεχωριστά.

5.4.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Το υπομενού των παραμορφώσεων περιέχει διάφορες επιλογές που αφορούν την εμφάνιση των μετατοπίσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων στο πρότυπο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι ποσότητες των παραμέτρων που απεικονίζονται κάθε φορά δίνονται σε μεγαλύτερη από την πραγματική τους διάσταση (επί 1, 2 ή 5×10^n) έτσι ώστε τα τελικά διαγράμματα να είναι πιο ευανάγνωστα.

Παραμορφωμένο δικτύωμα στοιχείων

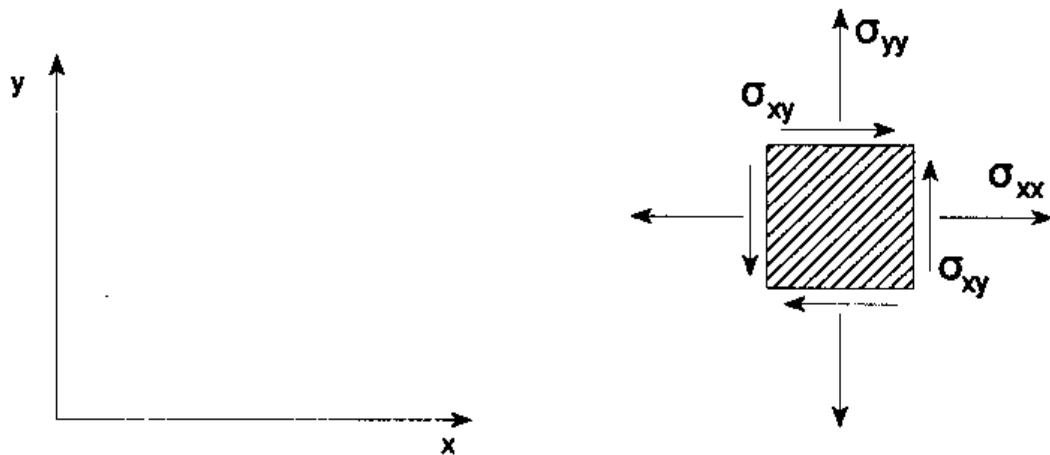
Πρόκειται για μια απεικόνιση του δικτυώματος των στοιχείων όπως αυτό εμφανίζεται μετά την επίλυση του προτύπου (deformed mesh), σε αντιπαράθεση με την αρχική γεωμετρία του, πριν την επιβολή οποιασδήποτε φόρτισης.

Συνολικές μετατοπίσεις

Πρόκειται για τις συνολικές διανυσματικές μετατοπίσεις $|u|$ (total displacements) σε όλους τους κόμβους των στοιχείων, όπως αυτές υπολογίστηκαν στο τέλος του δεδομένου υπολογιστικού βήματος. Μπορούν να απεικονιστούν ως διαφορετικών μηκών βέλη, καμπύλες ίσης μετατόπισης ή χρωματικές κλίμακες ανάλογα πάντα με την τιμή τους, πάνω στην αρχική γεωμετρία του προτύπου. Εκτός από τις συνολικές μετατοπίσεις μπορούν να απεικονιστούν και η οριζόντια u_x και κατακόρυφη u_y συνιστώσα των μετατοπίσεων ξεχωριστά.

Συνολικές παραμορφώσεις

Αναφέρεται στις συνολικές παραμορφώσεις ϵ_{ij} (total strains) στη μάζα του προσομοιώματος στο τέλος του δεδομένου υπολογιστικού βήματος, οι οποίες απεικονίζονται πάνω στην αρχική γεωμετρία του προτύπου. Οι συνολικές παραμορφώσεις αντιστοιχούν στις κύριες παραμορφώσεις και μπορούν να απεικονιστούν ως διαφορετικών μηκών βέλη, καμπύλες ίσης μετατόπισης ή χρωματικές



Σχήμα 5.18: Συνθήκη καθορισμού τάσεων στο Plaxis (Plaxis Manual, 1998).

κλίμακες ανάλογα πάντα με την τιμή τους, όπως και οι συνολικές μετατοπίσεις. Το μήκος και η κατεύθυνση των βελών αντιστοιχούν στο μέγεθος και την κύρια κατεύθυνση της παραμόρφωσης.

5.4.2 ΤΑΣΕΙΣ

Όπως και στην περίπτωση των παραμορφώσεων, το Plaxis περιέχει διάφορες επιλογές που αφορούν την απεικόνιση της εντατικής κατάστασης στο πρότυπο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι ποσότητες που απεικονίζονται κάθε φορά δίνονται και πάλι σε μεγαλύτερη από την πραγματική τους διάσταση (επί 1, 2 ή 5×10^n) έτσι ώστε τα τελικά διαγράμματα να είναι πιο ευανάγνωστα.

Ενεργές τάσεις

Πρόκειται για τις ενεργές τάσεις σ_{ij} (effective stresses) που εμφανίζονται στη γεωμετρία του προτύπου μετά το τέλος του δεδομένου υπολογιστικού βήματος και οι οποίες απεικονίζονται πάνω στην αρχική γεωμετρία του προσομοιώματος. Οι ενεργές τάσεις παρουσιάζονται σαν κύριες τάσεις και υπολογίζονται από τις καρτεσιανές συνιστώσες τάσης. Στο Σχήμα 5.18 απεικονίζεται η συνθήκη καθορισμού των τάσεων στο Plaxis. Σημειώνεται ότι η συμπίεση θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε αρνητικές τιμές τάσεων.

Σχετική διατμητική τάση

Η σχετική διατμητική τάση (relative shear stress) αποτελεί μια ένδειξη για την εγγύτητα του δεδομένου τασικού σημείου στο φάκελο αστοχίας του Mohr-Coulomb. Η σχετική διατμητική τάση ορίζεται ως εξής:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}} \quad [5.14]$$

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

Συνολικές τάσεις

Οι συνολικές τάσεις σ_{ij} (total stresses) αναφέρονται στο άθροισμα των ενεργών τάσεων και της ενεργής πίεσης των πόρων, όπως αυτές υπολογίζονται στο τέλος κάθε υπολογιστικού βήματος. Απεικονίζονται όπως και οι υπόλοιπες παράμετροι πάνω στην αρχική γεωμετρία του προσομοιώματος.

Σημεία αστοχίας

Τα σημεία αστοχίας (plastic points) αντιστοιχούν σε εκείνα τα τασικά σημεία τα οποία βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση. Απεικονίζονται με μικρά σύμβολα, ανάλογα με τον τύπο της αστοχίας στην οποία αντιστοιχούν. Έτσι, στην περίπτωση που το σύμβολο του σημείου αστοχίας είναι ένα κόκκινο τετράγωνο, τότε το σημείο αυτό υποδεικνύει ότι η τάση αγγίζει το φάκελο αστοχίας του Coulomb. Στην περίπτωση που η εφέλκυστική τάση σε ένα σημείο ξεπερνά το όριο αποκοπής τότε το σύμβολο του σημείου αστοχίας είναι ένα λευκό τετράγωνο.

Τα σημεία αστοχίας του Coulomb είναι ιδιαίτερος χρήσιμα για τον έλεγχο της επάρκειας του μεγέθους του προτύπου. Έτσι, αν παρουσιάζεται υψηλή συγκέντρωση σημείων αστοχίας στο όρια του προτύπου (εκτός από την περίπτωση της κεντρικής γραμμής σε ένα συμμετρικό πρότυπο), τότε θα πρέπει η επίλυση να επαναληφθεί με ένα πιο μεγάλο σε διαστάσεις πρότυπο.

Ενεργή πίεση πόρων

Αναφέρεται στη συνολική πίεση του νερού των πόρων p (active pore pressure) που αντιστοιχεί στο άθροισμα της πίεσης των πόρων σε σταθερή κατάσταση και της πλεονάζουσας πίεσης των πόρων που προκαλείται από τη φόρτιση. Απεικονίζεται όπως και οι υπόλοιπες παράμετροι πάνω στην αρχική γεωμετρία του προτύπου.

Υπερπίεση των πόρων

Πρόκειται για την πίεση του νερού των πόρων που προκαλείται από τη φόρτιση μη στραγγιζόμενων εδαφικών στρωμάτων και υπολογίζεται όπως και οι προηγούμενες παράμετροι στο τέλος του δεδομένου υπολογιστικού βήματος.

5.4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι παραμορφώσεις των κατασκευών (δοκών, αγκυρίων κλπ) και των διεπιφανειών απεικονίζονται πάνω στην αρχική γεωμετρία του προσομοιώματος. Περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων αυτών δεν θεωρείται σκόπιμη μια και στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν κατασκευές ή διεπιφάνειες που θα έπρεπε να εξεταστούν ξεχωριστά.

5.4.4 ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αριθμητικά δεδομένα όλων των τύπων αποτελεσμάτων εξάγονται σε πίνακες.

Πίνακες μετατοπίσεων

Για την εμφάνιση του πίνακα που αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις πρέπει στο πρόγραμμα των αποτελεσμάτων να απεικονίζεται το πρότυπο με την απεικόνιση των μετατοπίσεων. Στον πίνακα αυτό δίνονται οι συνιστώσες της μετατόπισης για όλους τους κόμβους. Οι μετατοπίσεις u_x και u_y αναφέρονται στο σύνολο των μετατοπίσεων όπως υπολογίστηκαν από όλες τις προηγούμενες φάσεις υπολογισμών, ενώ οι μετατοπίσεις Δu_x και Δu_y αναφέρονται στο συγκεκριμένο υπολογιστικό βήμα.

Πίνακες τάσεων και παραμορφώσεων

Οι πίνακες στην περίπτωση αυτή απεικονίζουν τις καρτεσιανές συνιστώσες σε όλα τα τασικά σημεία. Η στήλη Status αναφέρεται στην κατάσταση του τασικού σημείου, αν δηλαδή πρόκειται για ελαστικό σημείο, πλαστικό σημείο, σημείο εφελκυσμού, κορυφαίο σημείο, σημείο σκλήρυνσης ή σημείο cap. Το ελαστικό σημείο είναι ένα τασικό σημείο το οποίο δεν βρίσκεται προς το παρόν σε κατάσταση αστοχίας. Το πλαστικό σημείο είναι ένα τασικό σημείο για το οποίο ο κύκλος του Mohr αγγίζει το φάκελο αστοχίας του Coulomb. Σημείο εφελκυσμού είναι ένα τασικό σημείο το οποίο έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό με βάση πάντα το όριο αποκοπής εφελκυστικών τάσεων. Κορυφαίο σημείο είναι κάποιο τασικό σημείο το οποίο βρίσκεται στην κορυφή του φακέλου αστοχίας. Το σημείο σκλήρυνσης σε ένα μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους

αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση εκείνη κατά την οποία έχει επιτευχθεί η μέγιστη γωνία εσωτερικής τριβής στη μάζα του εδαφικού προτύπου που προσομοιώνεται. Το σημείο cap αναφέρεται σε εντατική κατάσταση ισοδύναμη με την τάση προστερεοποίησης, τη μέγιστη τάση δηλαδή στην οποία έχει υποβληθεί στο παρελθόν το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό.

5.4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

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

5.5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Το πρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό διαγραμμάτων φορτίων – μετατοπίσεων, χρόνου – μετατοπίσεων καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης και τασικών διαδρομών για προεπιλεγμένα σημεία του γεωμετρικού προτύπου. 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. Γενικά, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό καμπυλών φορτίων – μετατοπίσεων και τα τασικά σημεία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία διαγραμμάτων τάσεων – παραμορφώσεων και τασικών διαδρομών. Ο μέγιστος αριθμός σημείων που μπορούν να επιλεγούν είναι 10 κόμβοι και 10 τασικά σημεία. Τα δεδομένα που συνδέονται με αυτά τα σημεία αποθηκεύονται σε ξεχωριστά αρχεία και γι' αυτό το λόγο δεν είναι δυνατός ο σχεδιασμός καμπυλών για σημεία τα οποία δεν έχουν επιλεγεί πριν τη διαδικασία υπολογισμών.

5.5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

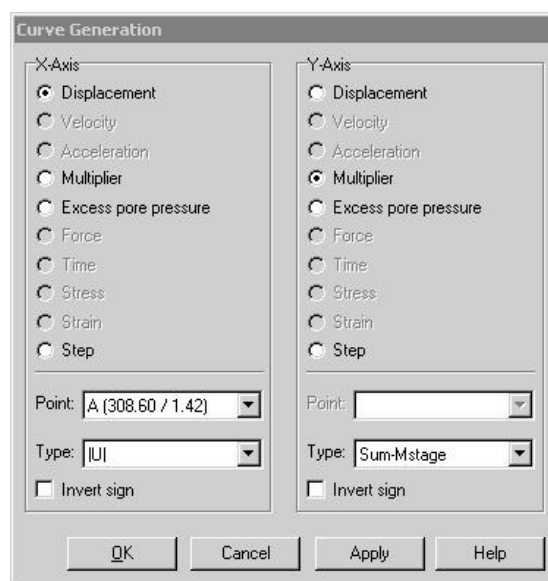
Κατά την έναρξη του προγράμματος σχεδιασμού των καμπυλών ζητείται από το χρήστη να επιλέξει από πιο αρχείο – πρότυπο επιθυμεί να χρησιμοποιήσει στοιχεία για να

σχεδιάσει κάποιο διάγραμμα. Μετά την επιλογή του project, εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.19 στο οποίο γίνονται οι επιλογές του γραφήματος το οποίο πρόκειται να σχεδιαστεί. Στο παράθυρο διαλόγου αυτό υπάρχουν δύο πλαίσια με διάφορες επιλογές για τον οριζόντιο άξονα (άξονα x) και για τον κατακόρυφο άξονα (άξονα y). Για κάθε άξονα γίνεται ένας συνδυασμός επιλογών με σκοπό τον καθορισμό της παραμέτρου που θα απεικονιστεί στο διάγραμμα. Ο αριθμός των σημείων της κάθε καμπύλης αντιστοιχεί στον αριθμό των βημάτων που απαιτήθηκαν για την επίλυση της συγκεκριμένης φάσης υπολογισμών.

Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης

Χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της μη-γραμμικής σχέσης μεταξύ του εφαρμοζόμενου φορτίου και της μετατόπισης που αυτό προκαλεί σε ένα δεδομένο σημείο του προτύπου. Συνήθως ο άξονας x σχετίζεται με τη μετατόπιση ενός συγκεκριμένου κόμβου και ο άξονας y με τους διάφορους πολλαπλασιαστές του προτύπου, χωρίς βέβαια να αποκλείεται ο σχεδιασμός άλλου τύπου καμπυλών.

Στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 5.19 επιλέγεται το σημείο (από τα ήδη προεπιλεγμένα), για το οποίο θα σχεδιαστεί το διάγραμμα. Όσο αφορά τις παραμέτρους στους άξονες, για καθεμία δίνονται περισσότερες της μιας επιλογές. Έτσι για τη μετατόπιση, μπορεί να επιλεγεί το μέτρο της μετατόπισης $|u|$, η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης u_x ή $-u_x$ και η κατακόρυφη συνιστώσα της μετατόπισης u_y ή $-u_y$. Οι



Σχήμα 5.19: Παράθυρο διαλόγου για τη δημιουργία καμπύλης (Plaxis Manual, 1998).

μετατοπίσεις έχουν μονάδες μήκους, όπως αυτές ορίστηκαν στις γενικές ρυθμίσεις του προτύπου.

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

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

Καμπύλες χρόνου – μετατόπισης

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

Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης

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

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

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

Τασικές διαδρομές και διαδρομές παραμορφώσεων

Μια τασική διαδρομή αντιπροσωπεύει την ανάπτυξη της εντατικής κατάστασης σε ένα δεδομένο σημείο του εδαφικού προτύπου. Αυτού του είδους οι καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους σε τοπικό επίπεδο. Δεδομένου ότι η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από την τάση και τα εδαφικά μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη τους όλες τις παραμέτρους αυτής της εξάρτησης, οι τασικές διαδρομές χρησιμοποιούνται για την τεκμηρίωση των επιλογών του προτύπου.

5.5.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης ενός απλού προτύπου εδαφικού πρανού στο οποίο δημιουργούνται συνθήκες αστοχίας. Η μοντελοποίηση γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος Plaxis και στην συνέχεια η ευστάθεια εξετάζεται στις ίδιες επιλύσεις με μια απλοποιημένη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Για λόγους απλοποίησης της διαδικασίας, το αρχικό πρότυπο το οποίο ψηφιοποιήθηκε στο Plaxis αποτελείται από τρεις εδαφικούς σχηματισμούς οι οποίοι στρωματογραφικά από πάνω προς τα κάτω είναι:

- ✓ Ψαμμίτης
- ✓ Άργιλος
- ✓ Ψαμμίτης

Το στρώμα της αργίλου σε κάθε περίπτωση είναι κατά πολύ λεπτότερο από τα δύο άλλα εδαφικά στρώματα και σκοπό έχει να δημιουργήσει συνθήκες ολίσθησης του άνω τμήματος του πρανού επάνω στον αρμό στρώσης αργίλου – ψαμμίτη. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας του πρανού για τις συγκεκριμένες συνθήκες.

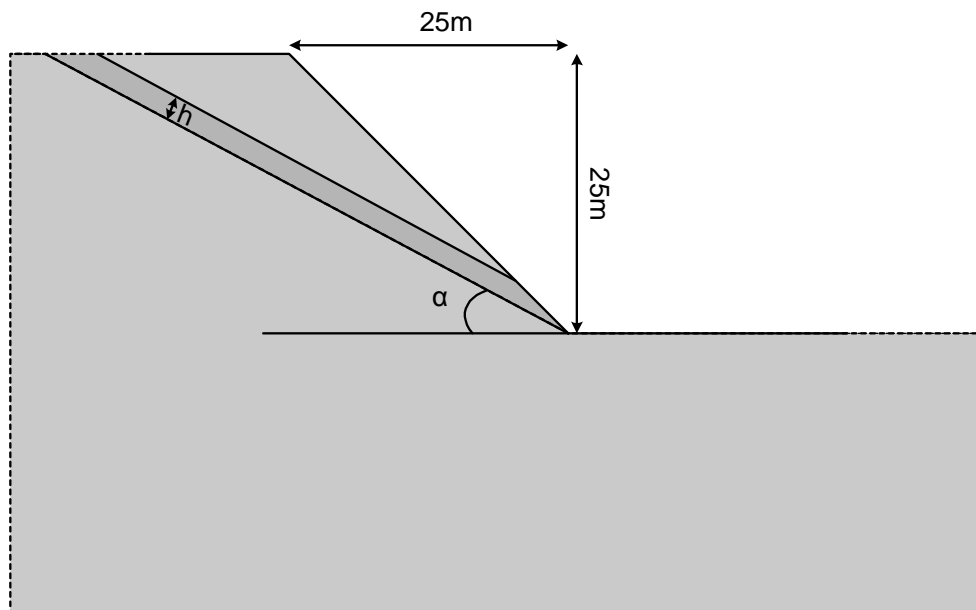
Τα δύο στρώματα ψαμμίτη διαφέρουν στο ότι το πρώτο θεωρείται στραγγιζόμενο ενώ το δεύτερο όχι. Οι ιδιότητες καθενός από τα εδαφικά υλικά δίνονται σε σχετική ενότητα παρακάτω. Το εδαφικό στρώμα της αργίλου εμφανίζεται με μεταβαλλόμενο πάχος,

γωνία με την οριζόντιο και συνοχή c . Έτσι, για την παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές επιλύσεις του αρχικού προτύπου με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά των επιμέρους επιλύσεων όσο αφορά το στρώμα της αργίλου που εμφανίζεται σε αυτές.

Επίλυση	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m^2)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)
1	1,25	150	5
2	1,25	150	10
3	1,25	150	15
4	1,25	150	20
5	1,25	150	25
6	1,25	150	30
7	2,5	150	5
8	2,5	150	10
9	2,5	150	15
10	2,5	150	20
11	2,5	150	25
12	2,5	150	30
13	1,25	50	5
14	1,25	50	10
15	1,25	50	15
16	1,25	50	20
17	1,25	50	25
18	1,25	50	30
19	2,5	50	5
20	2,5	50	10
21	2,5	50	15
22	2,5	50	20
23	2,5	50	25
24	2,5	50	30

Το ύψος της βαθμίδας του πρανούς ορίστηκε στα 25 m ενώ οι διαστάσεις του αρχικού προτύπου προεκτάθηκαν αρκετά προς το αριστερό του τμήμα έτσι ώστε σε καθεμία από τις κλίσεις του στρώματος της αργίλου (ακόμα και στις 5°) αυτό να εμφανίζεται στην πάνω επιφάνειά του και να μην τέμνει το αριστερό πλευρικό όριο. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται λεπτομερής περιγραφή του σχεδιασμού της γεωμετρίας του προτύπου, του τρόπου εισαγωγής των δεδομένων καθώς και της διαδικασίας επίλυσης αυτού. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται ένα σκαρίφημα του προτύπου του πρανούς, όπου h είναι το εκάστοτε πάχος του στρώματος της αργίλου και α η γωνία που αυτό σχηματίζει με την οριζόντιο. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ οι



Σχήμα 6.1: Σκαρίφημα της βασικής γεωμετρίας του προτύπου του εδαφικού πρανούς.

διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν ότι οι πραγματικές διαστάσεις του προτύπου όπως αυτές σχεδιάστηκαν για την επίλυση, είναι μεγαλύτερες προς τα αριστερά, δεξιά και προς το κάτω μέρος αυτού.

6.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια λεπτομερής περιγραφή του λογισμικού πακέτου Plaxis και των δυνατοτήτων που δίνονται στο χρήστη του. Στην ενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί η διαδικασία μοντελοποίησης ενός προβλήματος ευστάθειας πρανών και η εξαγωγή του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς, δεδομένων των ιδιοτήτων των υλικών και των συνθηκών που επικρατούν. Η διαδικασία μοντελοποίησης που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό, ακολουθεί τα στάδια που ακολουθούνται κατά την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, με τη σειρά που αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.

6.2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ

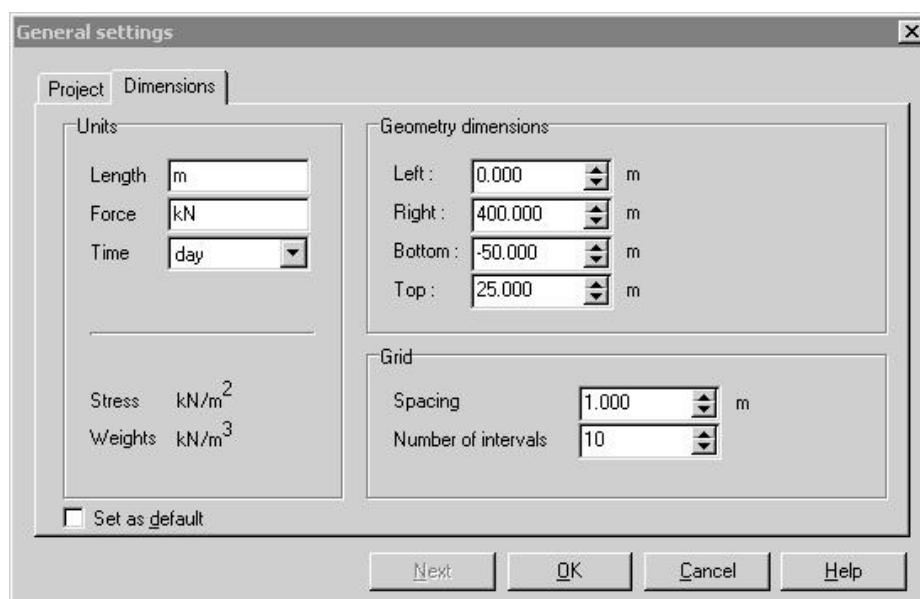
Η μοντελοποίηση του προβλήματος ξεκινά με τις γενικές ρυθμίσεις του προτύπου οι οποίες αφορούν την εισαγωγή του ονόματος του αρχείου στο οποίο θα αποθηκεύονται τα στοιχεία, τον τύπο του προτύπου καθώς και τον τύπο των στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Επίσης καθορίζονται οι μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου, οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης του προτύπου και του κανάβου, καθώς και η πυκνότητά του.

Όσον αφορά τον τύπο του προτύπου, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης, εφόσον η μοντελοποίηση γίνεται στις δύο διαστάσεις και οι παραμορφώσεις που αναμένονται στο κάθετο στην επιφάνεια του προτύπου επίπεδο είναι αμελητέες. Για τη διακριτοποίηση του προτύπου χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία. Οι ρυθμίσεις που αφορούν τις μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν, τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης που είναι ανάλογες αυτών του προτύπου που πρόκειται να σχεδιαστεί, καθώς και η πυκνότητα του κανάβου φαίνονται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 6.2.

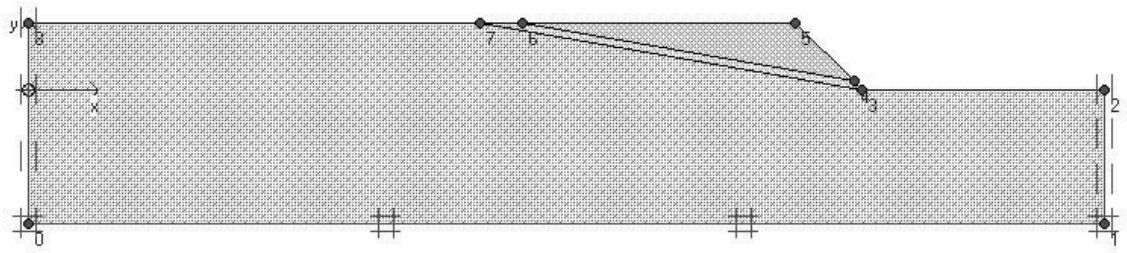
6.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Το γεωμετρικό πρότυπο που σχεδιάζεται αποτελεί την απεικόνιση του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Όπως προαναφέρθηκε, ένα γεωμετρικό πρότυπο 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. Στην παρούσα ανάλυση το γεωμετρικό πρότυπο που σχεδιάστηκε έχει τις εξωτερικές διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 6.3.

Η διαφοροποίηση στα επιμέρους μοντέλα αναφέρεται στο πάχος του στρώματος της αργίλου, την κλίση αυτού ως προς την οριζόντιο και τη συνοχή του. Στο Σχήμα 6.3 το πάχος του στρώματος της αργίλου είναι 2,5 m και η κλίση του 10°.



Σχήμα 6.2: Παράθυρο διαλόγου όπου φαίνονται οι γενικές ρυθμίσεις των μοντέλων που σχεδιάστηκαν.



Σχήμα 6.3: Γεωμετρικό πρότυπο πρανούς.

6.2.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όταν σε κάποιο γεωμετρικό στοιχείο του προτύπου (γραμμή ή σημείο) εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση, τότε η συνθήκη αυτή είναι ισχυρότερη όσο αφορά τους υπολογισμούς από όλους τους άλλους τύπους συνθηκών φόρτισης. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν σε όλα τα εδαφικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες σε γεωμετρίες αυτού του είδους και απεικονίζονται επίσης στο Σχήμα 6.3:

- ✓ Στα κατακόρυφα όρια του προτύπου εφαρμόστηκε μηδενική οριζόντια μετατόπιση ($u_x = 0$), που σημαίνει ότι στα σημεία των γραμμών αυτών επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον y άξονα. Η συντεταγμένη x των γραμμών αυτών έχει την τιμή της υψηλότερης (400) ή χαμηλότερης (0) συντεταγμένης x ολόκληρου του προτύπου.
- ✓ Στο κάτω όριο του προτύπου (οριζόντια γραμμή), εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση και ως προς τους δύο άξονες ($u_x = u_y = 0$), που σημαίνει ότι η βάση είναι πακτωμένη. Τα σημεία αυτής της γραμμής έχουν συντεταγμένη y ίση με τη χαμηλότερη τιμή της συντεταγμένης y (-50) σε όλο το πρότυπο.

6.2.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα εδαφικά στρώματα που διακρίνονται στο πρότυπο του Σχήματος 6.3 είναι όπως προαναφέρθηκε ένα στρώμα ψαμμίτη, ένα λεπτό στρώμα αργίλου και τέλος το υπόβαθρο που είναι το δεύτερο στρώμα ψαμμίτη. Οι ιδιότητες των εδαφών εισάγονται σε μια βάση δεδομένων που διατηρεί το πρόγραμμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε επόμενα μοντέλα. Θεωρείται ότι το μοντέλο των Mohr-Coulomb προσεγγίζει καλά την πραγματική συμπεριφορά των παραπάνω εδαφών και οι πέντε βασικές

παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους μέσω του μοντέλου Mohr - Coulomb 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).

Εκτός των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν όμως, εισάγεται το ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος των εδαφών, η διαπερατότητα των υλικών ως προς τις δύο κύριες κατευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη) και επιλέγονται οι συνθήκες όσο αφορά την στράγγιση. Στις παραγράφους που ακολουθούν, επεξηγούνται αναλυτικά οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα εδαφικά μοντέλα πρανών της παρούσας εργασίας. Για τα υλικά αυτά εισάγονται μόνο τα γενικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές παράμετροι στα αντίστοιχα παράθυρα διαλόγου.

Υπερκείμενος ψαμμίτης

Τα γενικά χαρακτηριστικά του ψαμμίτη απεικονίζονται στο Σχήμα 6.4. Το εδαφικό πρότυπο το οποίο ορίζεται να περιγράψει τη συμπεριφορά του υλικού αυτού είναι αυτό

Σχήμα 6.4: Εισαγωγή γενικών χαρακτηριστικών 1^{ου} στρώματος ψαμμίτη.

των Mohr-Coulomb. Όσο αφορά τη συμπεριφορά του υλικού σχετικά με τη στράγγιση, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζει κατά πολύ την απόκρισή του είναι η πίεση των πόρων. Για το στρώμα του ψαμμίτη έχει επιλεγεί η στραγγιζόμενη συμπεριφορά κατά την οποία δεν δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων. Δεδομένου όμως ότι το υλικό αυτό βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, δεν έχει νόημα η εισαγωγή της στραγγιζόμενης ή μη συμπεριφοράς, και δεν επηρεάζει την επίλυση.

Το ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος του στρώματος του ψαμμίτη είναι $\gamma_{\text{dry}} = 21 \text{ kN/m}^3$ και $\gamma_{\text{wet}} = 22 \text{ kN/m}^3$ αντίστοιχα. Οι διαπερατότητες k_x και k_y ως προς τις δύο κύριες διευθύνσεις έχουν την ίδια τιμή ($k_x = k_y = 1.69 \times 10^{-4} \text{ m/day}$) εφόσον θεωρείται ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ τους για το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό.

Στις παραμέτρους του υλικού που εισάγονται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 6.5, συμπεριλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά ακαμψίας και αντοχής του υπερκείμενου ψαμμίτη.

Τα χαρακτηριστικά ακαμψίας του υλικού περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητάς του και το λόγο του Poisson. Το μέτρο ελαστικότητας του ψαμμίτη θεωρήθηκε ίσο με $2,6 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$, ενώ ο λόγος του Poisson είναι $\nu = 0,25$. Τα χαρακτηριστικά αντοχής

Σχήμα 6.5: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής ιδιοτήτων του υπερκείμενου ψαμμίτη.

του υλικού που εισάγονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου περιλαμβάνουν τη συνοχή του, η οποία είναι ίση με $c = 1.000 \text{ kN/m}^2$, τη γωνία εσωτερικής τριβής αυτού $\phi = 37^\circ$ και τέλος τη γωνία διασταλτικότητάς του ($\psi = 0^\circ$). Οι τιμές των G_{ref} και E_{oed} υπολογίζονται αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα και δεν εισάγονται από τη χρήστη. Τέλος ενεργοποιήθηκε και η επιλογή tension cut-off ορίζοντας ως όριο αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων το μηδέν.

Αργίλος

Όσο αφορά το εδαφικό στρώμα της αργίλου, τα γενικά χαρακτηριστικά της απεικονίζονται στο Σχήμα 6.6.

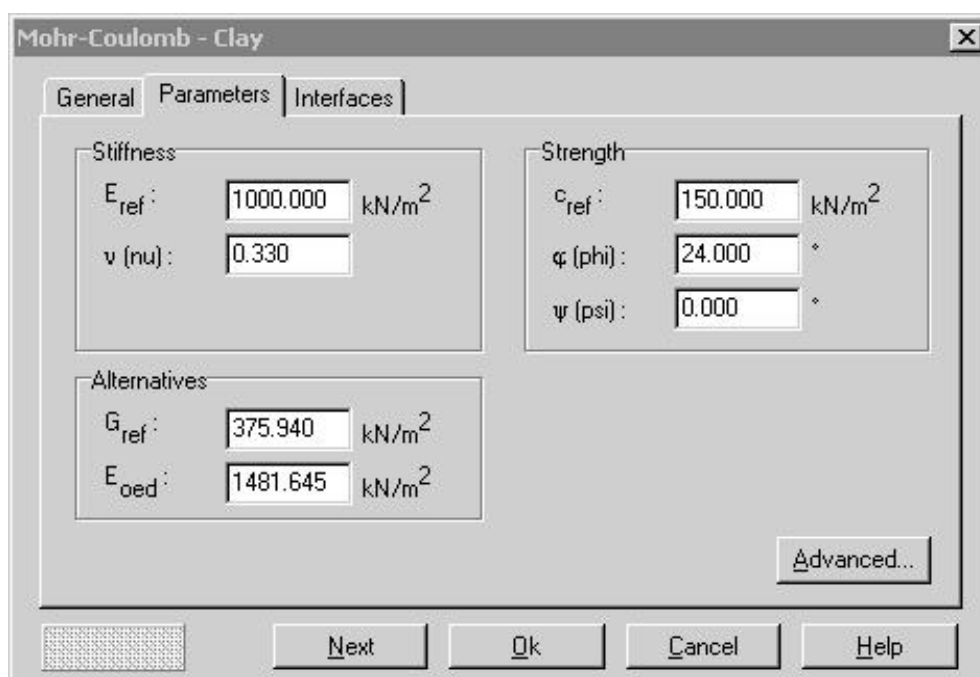
Το εδαφικό πρότυπο το οποίο ανταποκρίνεται στην άργιλο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.6 είναι αυτό των Mohr-Coulomb. Όσο αφορά τον τύπο της συμπεριφοράς του υλικού, για το στρώμα της αργίλου έχει επιλεγεί επίσης η στραγγιζόμενη συμπεριφορά κατά την οποία δεν δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων. Το ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος του στρώματος της αργίλου τίθεται ως $\gamma_{\text{dry}} = 16 \text{ kN/m}^3$ και $\gamma_{\text{wet}} = 18 \text{ kN/m}^3$ αντίστοιχα. Οι διαπερατότητες k_x και k_y ως προς τις δύο κύριες διευθύνσεις έχουν την ίδια τιμή ($k_x = k_y = 1 \times 10^{-4} \text{ m/day}$).

Σχήμα 6.6: Εισαγωγή γενικών χαρακτηριστικών στρώματος αργίλου.

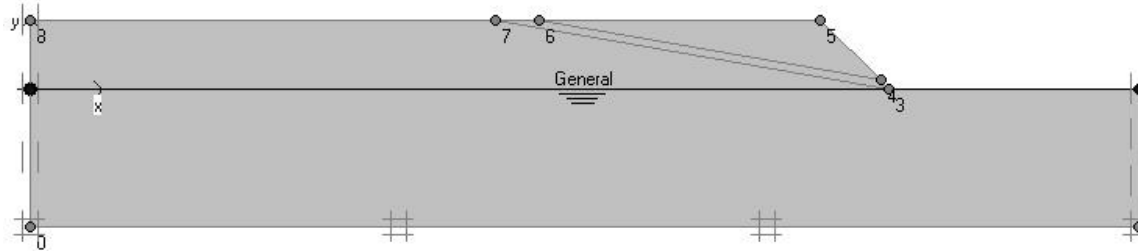
Στις παραμέτρους της αργίλου που εισάγονται στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 6.7, συμπεριλαμβάνονται το μέτρο ελαστικότητάς της, το οποίο θεωρήθηκε ίσο με 1.000 kN/m^2 , ενώ ο λόγος Poisson είναι $\nu = 0,33$. Τα χαρακτηριστικά αντοχής της αργίλου εισάγονται στο ίδιο παράθυρο διαλόγου και περιλαμβάνουν τη συνοχή της, η οποία είναι ίση με $c = 150 \text{ kN/m}^2$ στις 12 πρώτες επιλύσεις και $c = 50 \text{ kN/m}^2$ στις επόμενες 12, τη γωνία εσωτερικής τριβής της $\varphi = 24^\circ$ και τέλος τη γωνία διασταλτικότητάς της $\psi = 0^\circ$. Τα χαρακτηριστικά αντοχής της αργίλου είναι αρκετά πιο χαμηλά από αυτά των δύο στρωμάτων ψαμμίτη. Το εδαφικό υλικό αυτό επιλέχτηκε, έτσι ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζεται η ευστάθεια του πρανούς από την ύπαρξη εδαφικού στρώματος χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων. Τέλος, ορίστηκε ως όριο αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων το μηδέν.

Υποκείμενος ψαμμίτης

Το εδαφικό υλικό που υπόκειται του στρώματος της αργίλου είναι ένα δεύτερο στρώμα ψαμμίτη, με τα ίδια εδαφικά χαρακτηριστικά με τον υπερκείμενο ψαμμίτη. Στην περίπτωση αυτή όμως η συμπεριφορά του υλικού είναι μη στραγγιζόμενη που σημαίνει ότι στη μάζα του γίνεται πλήρης ανάπτυξη της πίεσης των πόρων, τουλάχιστον στο τμήμα εκείνο που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα.



Σχήμα 6.7: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής ιδιοτήτων του στρώματος αργίλου.



Σχήμα 6.8: Σχεδιασμός του υδροφόρου ορίζοντα (General).

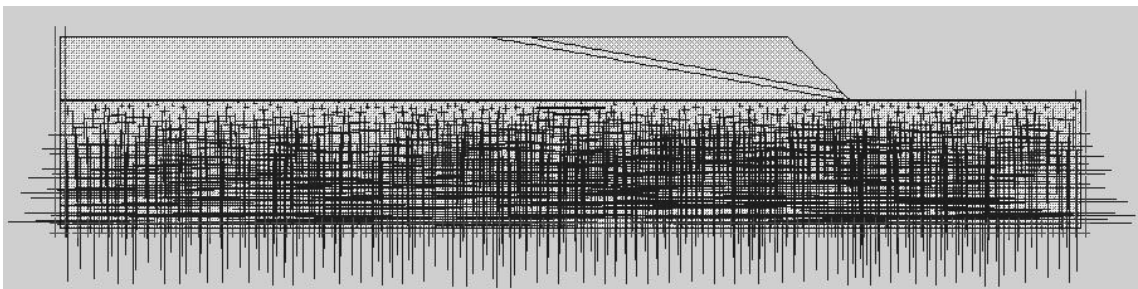
6.2.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ

Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται εισάγεται ο υδροφόρος ορίζοντας για να υπολογίζεται έτσι και η επίδραση του νερού των πόρων κατά την επίλυση. Στην παρούσα εργασία και στο σύνολο των επιμέρους επιλύσεων ο υδροφόρος θεωρείται ότι ορίζεται από τα σημεία (0,0) και (400,0), από την ευθεία δηλαδή που διέρχεται από το πόδι του πρανούς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.8. Το μοναδιαίο βάρος του νερού είναι εξ' ορισμού ίσο με $10,0 \text{ kN/m}^3$.

Μετά την εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα δημιουργούνται οι πιέσεις του νερού των πόρων. Οι πιέσεις των πόρων υπολογίζονται μετά το στάδιο της δημιουργίας του εδαφικού προτύπου και η κατανομή τους απεικονίζεται στο επίπεδό του. Ένα παράδειγμα αυτής της κατανομής φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Το παράδειγμα αυτό αντιστοιχεί στην επίλυση με πάχος στρώματος αργίλου 2,5 m και κλίση 10° . Όπως ήταν αναμενόμενο η κατανομή της πίεσης των πόρων στην επιφάνεια του γεωμετρικού ομοιώματος είναι εντελώς ομοιόμορφη, δεδομένου ότι ο υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται από ένα επίπεδο, επομένως το ύψος της υπερκείμενης υδατικής στήλης είναι το ίδιο για όλα τα σημεία που βρίσκονται στο ίδιο απόλυτο βάθος στο πρότυπο.

6.2.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Όπως είναι γνωστό, στη μηχανική των κατασκευών και των θεμελιώσεων, ο συντελεστής ασφάλειας ορίζεται πάντοτε ως ο λόγος του φορτίου που αντιτίθεται στην



Σχήμα 6.9: Κατανομή πιέσεων πόρων στην επιφάνεια του γεωμετρικού ομοιώματος.

αστοχία προς το φορτίο που οδηγεί σε αυτή. Για εδαφικά σώματα όπως είναι οι επιχωματώσεις δρόμων/ποταμών ή και τα χωμάτινα φράγματα, η κατάσταση διαφέρει. Στην περίπτωση αυτή, το φορτίο που επικρατεί δεν προέρχεται άμεσα από μια εξωτερική δύναμη αλλά από το ίδιο το βάρος του εδάφους, επομένως ο ορισμός του συντελεστή ασφάλειας στην εδαφομηχανική εκφράζεται πλέον από τη σχέση (Brinkgreve and Bakker, 1991):

$$\text{Συντελεστής ασφάλειας} = \frac{S}{S_c} = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{c_c + \sigma' \tan \phi_c} \quad [6.1]$$

όπου: S = η διατμητική αντοχή, όπως ορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb,

S_c = η διατμητική τάση,

ϕ = η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού,

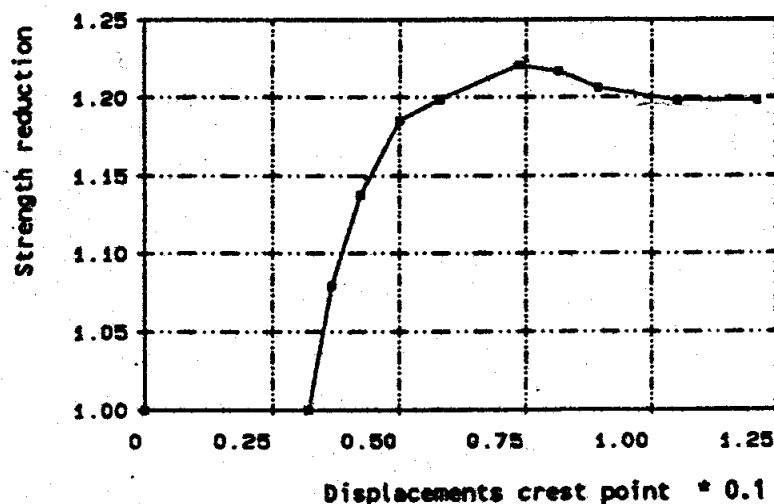
c = η συνοχή του υλικού,

σ' = η ορθή τάση στο θεωρούμενο επίπεδο αστοχίας.

Η σ' είναι η ενεργή τάση ενώ οι ϕ και c αποτελούν ενεργές παραμέτρους αντοχής του υλικού. Ο δείκτης c υποδεικνύει ότι πρόκειται για τιμές οριακής αντοχής για τις παραμέτρους για τις οποίες χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που $c = c_c$ και $\phi = \phi_c$ ο συντελεστής ασφάλειας της σχέσης [6.1] γίνεται ίσος με τη μονάδα και η ισορροπία εξασφαλίζεται οριακά. Ο παραπάνω ορισμός ταυτίζεται με τον κλασικό ορισμό όπως αυτός χρησιμοποιείται στην περίπτωση της ανάλυσης με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Brinkgreve and Bakker, 1991).

Με βάση τους Brinkgreve and Bakker (1991), ο συντελεστής ασφάλειας 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 το σημείο που βρίσκεται πάνω στο φρύδι του πρανούς. Η μορφή της καμπύλης που σχηματίζεται είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10.

Με τη σταδιακή μείωση των παραμέτρων της αντοχής των υλικών που συμμετέχουν στο πρότυπο του εδαφικού πρανούς, μειώνεται ο παρονομαστής του πηλίκου της σχέσης [6.1], 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 6.10: Καμπύλη ΣΜsf συναρτήσει της μετατόπισης του σημείου που βρίσκεται στο φρύδι του εδαφικού πρανούς (Brinkgreve and Bakker, 1991).

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, εφόσον αναμένεται ο συντελεστής ασφάλειας να αποκτήσει μια σταθερή τιμή μετά την αστοχία και να μην 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 ΣΜsf η οποία αντιστοιχεί στην επιπέδωση της καμπύλης είναι ο συντελεστής ασφάλειας που αντιπροσωπεύει το δεδομένο πρότυπο. Ειδικότερα είναι:

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad [6.2]$$

όπου ϕ_{input} και c_{input} οι τιμές των παραμέτρων αντοχής του υλικού που εισάγονται στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος και $\phi_{reduced}$ και $c_{reduced}$ οι κρίσιμες τιμές των παραμέτρων αυτών κατά την αστοχία.

Για λόγους σύγκρισης, στα αποτελέσματα που προέκυψαν από καθεμία από τις επιμέρους περιπτώσεις επίλυσης του αρχικού εδαφικού προτύπου που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, παρατίθενται δύο συντελεστές ασφάλειας: ένας που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης (peak) και ένας που αντιστοιχεί στην περιοχή επιπέδωσής της (stable).

6.2.7 ΕΠΙΛΥΣΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Μετά από το τέλος υπολογισμού των υδραυλικών συνθηκών ακολουθεί η φάση της επίλυσης του προτύπου. Ο καθορισμός της διαδικασίας επίλυσης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας εδαφικών πρανών από το πρόγραμμα Plaxis, αποτέλεσε μια αρκετά επίπονη διαδικασία εφόσον δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία αρκετές σχετικές πληροφορίες. Οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν όμως, φαίνεται να δίνουν αποτελέσματα αρκετά κοντά σε αυτά που προκύπτουν από τη διαδικασία επίλυσης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας όπως αυτή περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η σειρά των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας των διαφόρων περιπτώσεων του εδαφικού πρανούς που προσομοιώθηκαν.

Καθορισμός φάσεων υπολογισμών

Για καθεμία από τις περιπτώσεις του εδαφικού πρανούς που μελετήθηκε, ορίστηκαν αρχικά τρεις φάσεις υπολογισμών εκτός της αρχικής, η οποία αναφέρεται στους υπολογισμούς των αρχικών συνθηκών των εδαφικών μοντέλων. Ο τύπος των υπολογισμών που πραγματοποιείται σε κάθε φάση φαίνεται στον Πίνακα 6.2, ενώ καθεμία από αυτές επεξηγείται αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

Πίνακας 6.2: Τύπος υπολογισμών που πραγματοποιείται σε καθεμία από τις εισαγόμενες φάσεις.

Φάση	Τύπος υπολογισμών
1 ^η	Εφαρμογή του ίδιου του βάρους των εδαφικών υλικών
2 ^η	Φάση εξομάλυνσης των δυνάμεων που βρίσκονται εκτός ισορροπίας
3 ^η	Σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής των υλικών για τον προσδιορισμό συντελεστή ασφάλειας

Φάση 1^η

Γενικά

Στην πρώτη φάση επίλυσης γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων που προκαλούνται από το βάρος των ίδιων των σχηματισμών που αποτελούν το πρανές. Το παράθυρο διαλόγου στο οποίο εισάγονται οι γενικές ρυθμίσεις της πρώτης φάσης επίλυσης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11.

Σχήμα 6.11: Παράθυρο διαλόγου γενικών ρυθμίσεων 1^{ης} φάσης υπολογισμών.

Όπως είναι φανερό, ο τύπος της επίλυσης αναφέρεται σε θεώρηση πλαστικού καταστατικού μοντέλου (plastic calculation type), ενώ οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τον αλγόριθμο προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου (load advancement ultimate level). Η φάση που προηγείται της 1^{ης} φάσης υπολογισμών είναι η αρχική, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αντιπροσωπεύει την κατάσταση του προβλήματος όπως αυτή ορίστηκε στον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων. Η φάση αυτή δεν επιλύεται εκ νέου, αποτελεί όμως το σημείο έναρξης των περαιτέρω υπολογισμών.

Παράμετροι

Οι παράμετροι που εισάγονται για την επίλυση της πρώτης φάσης υπολογισμών είναι αυτές που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.12.

Στις παραμέτρους ελέγχου τα βήματα υπολογισμών είναι προεπιλεγμένα σε 100. Επίσης επιλέγεται η διαγραφή των ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών. Έτσι, όλα τα

Σχήμα 6.12: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής παραμέτρων υπολογισμών για την 1^η φάση.

πρόσθετα βήματα υπολογισμών στη δεδομένη φάση (εκτός του τελευταίου), διαγράφονται, εφόσον βέβαια η φάση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία. Όσο αφορά την επαναληπτική διαδικασία έγινε προσπάθεια να κρατηθεί χαμηλά το ποσοστό σφάλματος και ο αριθμός των επαναλήψεων σε κάθε βήμα επίλυσης. Έτσι, τα περισσότερα από τα μοντέλα επιλύθηκαν με τις ρυθμίσεις του Σχήματος 5.10 (Κεφάλαιο 5, σελ. 99). Για τη διαδικασία φόρτισης επιλέχθηκαν οι ολικοί πολλαπλασιαστές για την επιβολή του συνόλου του βάρους των υλικών σε αυτή τη φάση. Έτσι, $\Sigma Mweight = 1$.

Φάση 2^η

Γενικά

Η δεύτερη φάση υπολογισμών εισάγεται με σκοπό τη μείωση των δυνάμεων που βρίσκονται εκτός ισορροπίας. Με βάση απάντηση σε μια από τις συχνές ερωτήσεις στην ιστοσελίδα του Plaxis, σε περιπτώσεις που αμέσως μετά την επιβολή του ιδίου βάρους το πρότυπο δεν βρίσκεται σε ισορροπία (η μαθηματική επίλυση παρουσιάζει αοριστίες), η διαδικασία της σταδιακής μείωσης των παραμέτρων αντοχής δεν μπορεί να ξεκινήσει. Για το λόγο αυτό εισάγεται μια φάση υπολογισμών σταδιακής κατασκευής στην οποία δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή της γεωμετρίας του προτύπου, ούτε ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται στοιχεία αυτού όπως γίνεται συνήθως. Σε κάποιες περιπτώσεις, η διαδικασία αυτή της εξομάλυνσης μπορεί να μην επιλυθεί σωστά, με αποτέλεσμα να πρέπει να επαναληφθεί με τη χρήση χαμηλότερου ολικού σφάλματος γιατί η σταθερότητα του προτύπου θεωρείται ήδη κρίσιμη (Plaxis, 2002). Στην περίπτωση όμως που η φάση αυτή επιλυθεί, οι δυνάμεις που βρίσκονται εκτός ισορροπίας έχουν εξομαλυνθεί αρκετά ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της επίλυσης με τη διαδικασία της σταδιακής μείωσης των παραμέτρων αντοχής (Plaxis, 2002).

Οι γενικές ρυθμίσεις που γίνονται στη δεύτερη φάση υπολογισμών είναι ίδιες με αυτές που γίνονται στην πρώτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.11.

Παράμετροι

Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων της επίλυσης για τη φάση 2 επίσης δεν διαφέρουν από αυτές της φάσης 1 παρά μόνο στο ότι στη διαδικασία φόρτισης χρησιμοποιείται η σταδιακή κατασκευή, χωρίς – όπως αναφέρθηκε – την αλλαγή της γεωμετρίας του

προτύπου. Όπως και στη φάση 1 γίνεται προσπάθεια επίλυσης με τις προεπιλεγμένες τιμές για την επαναληπτική διαδικασία και μόνο στην περίπτωση που δεν επιτυγχάνεται ισορροπία οι τιμές αυτές μεταβάλλονται για την επίτευξή της και την προχώρηση σε μια τρίτη φάση επίλυσης.

Φάση 3^η

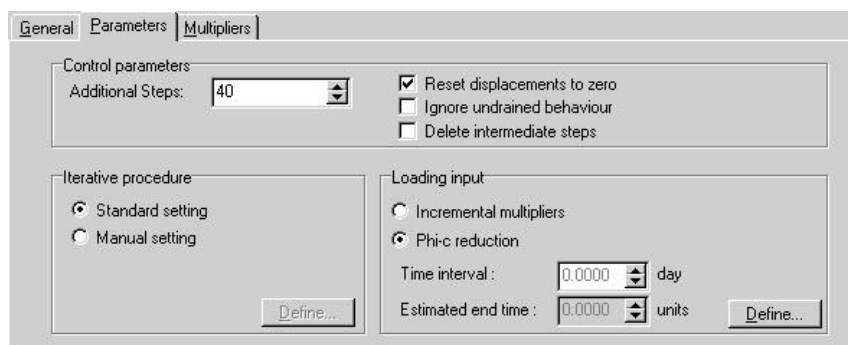
Γενικά

Η τρίτη φάση υπολογισμών είναι και η πιο σημαντική και αναφέρεται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας με βάση τη διαδικασία της σταδιακής μείωσης των παραμέτρων αντοχής του υλικού, μέχρις ότου αυτό αστοχήσει. Οι γενικές ρυθμίσεις που γίνονται στην περίπτωση αυτή είναι αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 6.13. Η διαφορά εδώ με τις προηγούμενες δύο φάσεις είναι ότι ενώ επιλύεται και πάλι η πλαστική συμπεριφορά του προτύπου, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η επίλυση που θεωρεί προοδευτικά βήματα φόρτισης.

Παράμετροι

Στις παραμέτρους ελέγχου για την 3^η φάση υπολογισμών, τα βήματα υπολογισμών είναι προεπιλεγμένα σε 30, πολλές φορές όμως η τιμή αυτή διαφοροποιήθηκε για την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων με σκοπό την επίτευξη ισορροπίας και την επιτυχή επίλυση του κάθε προτύπου. Στην περίπτωση αυτή όμως δεν επιλέγεται η διαγραφή των ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών, αλλά ο μηδενισμός των παραμορφώσεων που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες φάσεις υπολογισμών. Η ρύθμιση αυτή, όπως έχει

Σχήμα 6.13: Παράθυρο διαλόγου γενικών ρυθμίσεων 3^{ης} φάσης υπολογισμών.



Σχήμα 6.14: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής παραμέτρων υπολογισμών για την 3^η φάση.

προαναφερθεί, επιλέγεται επειδή οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από την επίδραση του ίδιου του βάρους των υλικών, δεν έχουν καμία φυσική σημασία κατά την επίλυση. Έτσι, αυτές αγνοούνται κατά την έναρξη της τρίτης φάσης, έτσι ώστε αυτή να ξεκινά από μια κατάσταση μηδενικών παραμορφώσεων.

Όσο αφορά την επαναληπτική διαδικασία, και σε αυτή την περίπτωση έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, ενώ για τη φόρτιση επιλέχτηκε η σταδιακή διαδικασία μείωσης των παραμέτρων αντοχής. Στο παράθυρο διαλόγου του Σχήματος 6.14 φαίνονται οι παράμετροι υπολογισμών που εισήχθησαν.

Πολλαπλασιαστές

Η διαδικασία μείωσης των παραμέτρων αντοχής γίνεται με τη βοήθεια του πολλαπλασιαστή M_{sf} ο οποίος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βήματος μείωσης της αντοχής για το πρώτο υπολογιστικό βήμα. Η προεπιλεγμένη τιμή 0,1 θεωρείται γενικά μια αποδεκτή τιμή για τις περισσότερες επιλύσεις και χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο των μοντέλων που εξετάστηκαν. Με βάση την τιμή αυτή προκύπτει και ο τελικός συντελεστής ΣM_{sf} που ταυτίζεται με τον συντελεστή ασφάλειας για καθεμία από τις επιλύσεις όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα.

6.2.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PLAXIS

Στην ενότητα αυτή δίνονται τρία παραδείγματα επίλυσης μοντέλων ευστάθειας πρανών όπως αυτά σχεδιάστηκαν για την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Για κάθε μια από τις περιπτώσεις παρατίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εδαφικών πρανών που σχεδιάστηκαν, οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, τα χαρακτηριστικά των φάσεων επίλυσης και οι καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας. Για τις επιλύσεις που δεν επεξηγούνται στο

σημείο αυτό, τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας.

Περίπτωση 1^η

Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται σε πρανές με κλίση αργιλικού στρώματος 10° και πάχος 1,25 m. Το πρανές αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο αλλά και όλα τα πρανή της παραμετρικής ανάλυσης φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.3.

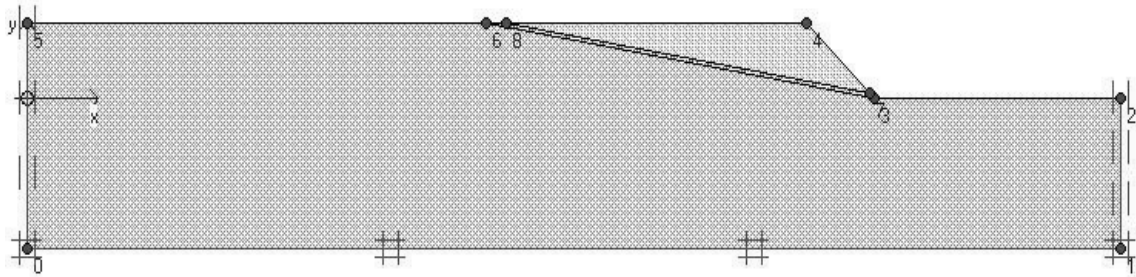
Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση.

	Ψαμμίτης 1	Άργιλος	Ψαμμίτης 2
Μοντέλο συμπεριφοράς	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Συνθήκες στράγγισης	Drained	Drained	Undrained
γ_{dry} (kN/m ³)	21	16	21
γ_{wet} (kN/m ³)	22	18	22
k_x, k_y (m/day)	$1.69 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$1.69 \cdot 10^{-4}$
E_{ref} (kN/m ²)	$2.6 \cdot 10^5$	1000	$2.6 \cdot 10^5$
ν	0.25	0.33	0.25
c_{ref} (kN/m ²)	1000	150	1000
ϕ°	37	24	37
ψ°	0	0	0
Tension cut off	NAI	NAI	NAI

Οι φάσεις που εισήχθησαν για την επίλυση των μοντέλων περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα και χρησιμοποιήθηκαν επίσης για το σύνολο των επιλύσεων με ελαφρές παραλλαγές.

Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας φάσεων υπολογισμών όπως αυτές ορίστηκαν για το 1^ο παράδειγμα επίλυσης που παρατίθεται από την παραμετρική ανάλυση.

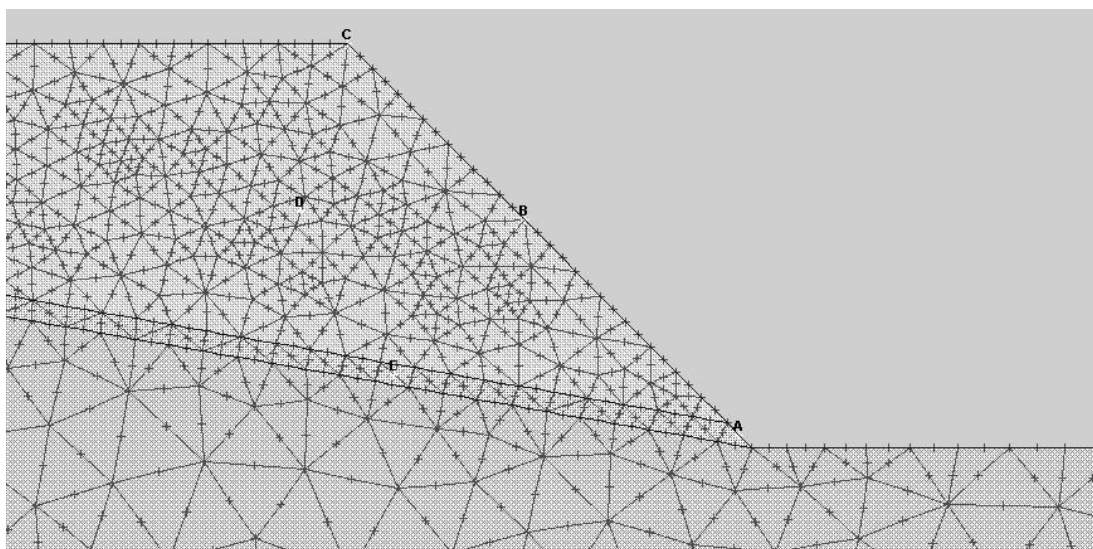
Ρυθμίσεις υπολογισμών	Φάση 1	Φάση 2	Φάση 3
Τύπος υπολογισμών	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου
	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης
Παράμετροι ελέγχου	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 25
	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Μηδενισμός παραμορφώσεων προηγούμενης φάσης
Επαναληπτική διαδικασία	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις
Ρυθμίσεις φόρτισης	Ολικοί Πολλαπλασιαστές	Σταδιακή κατασκευή	Σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής
	ΣΜweight = 1		Πολλαπλασιαστής Msf = 0.1



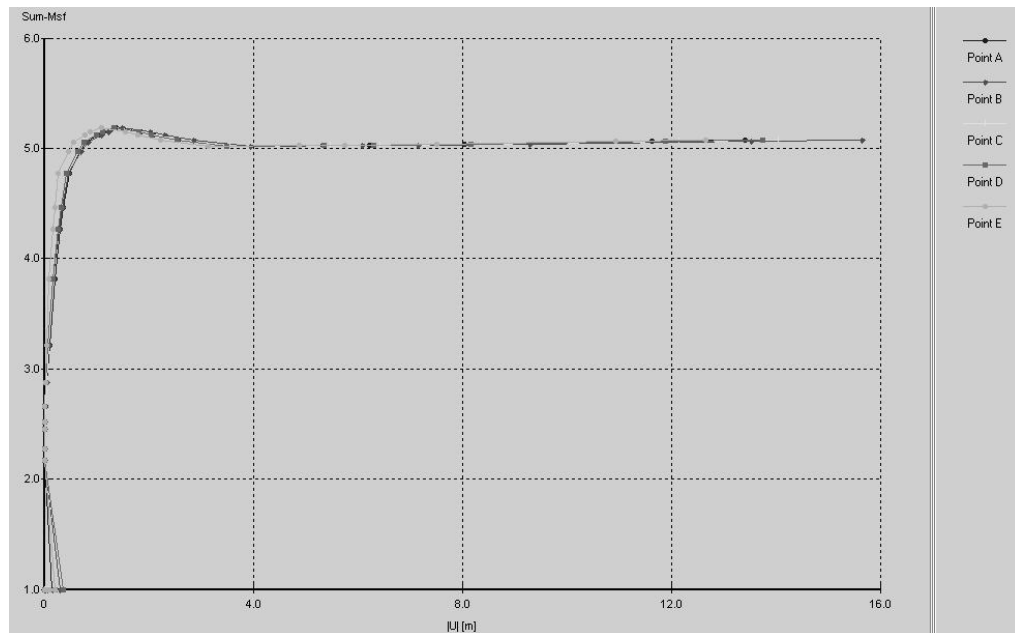
Σχήμα 6.15: Γεωμετρία εδαφικού πρανούς για την 1^η περίπτωση.

Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων υπολογισμών επιλέχτηκαν τα σημεία για τα οποία θα σχεδιαστούν οι σχετικές καμπύλες μετά την επίλυση. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς προτείνεται από τους Brinkgreve and Bakker (1991) η επιλογή του σημείου που βρίσκεται στο φρύδι του πρανούς. Παρ' όλ' αυτά έχουν επιλεγεί και κάποια επιπλέον σημεία για να εξεταστεί κατά πόσο υπάρχει διαφοροποίηση του αποτελέσματος μεταξύ τους (Σχήμα 6.16). Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους και μετά την επιτυχή επίλυση της δεδομένης περίπτωσης του προτύπου του εδαφικού πρανούς, προέκυψε η καμπύλη του Σχήματος 6.17.

Όπως είναι φανερό και από το διάγραμμα, για όλα τα εδαφικά σημεία που έχουν προεπιλεγεί, η καμπύλη ΣMsf συναρτήσει του μέτρου της μετατόπισης $|u|$ έχει την ίδια μορφή. Επομένως ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας είναι ανεξάρτητος του σημείου που επιλέγεται και η καμπύλη παρουσιάζει το ίδιο μέγιστο και την ίδια τιμή επιπέδωσης. Η τιμή του συντελεστή ασφάλειας για την περίπτωση αυτή είναι 5,186 στο μέγιστο της καμπύλης και 5,041 στην περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης.



Σχήμα 6.16: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για το 1^ο παράδειγμα υπολογισμών (σχήμα σε μεγέθυνση).

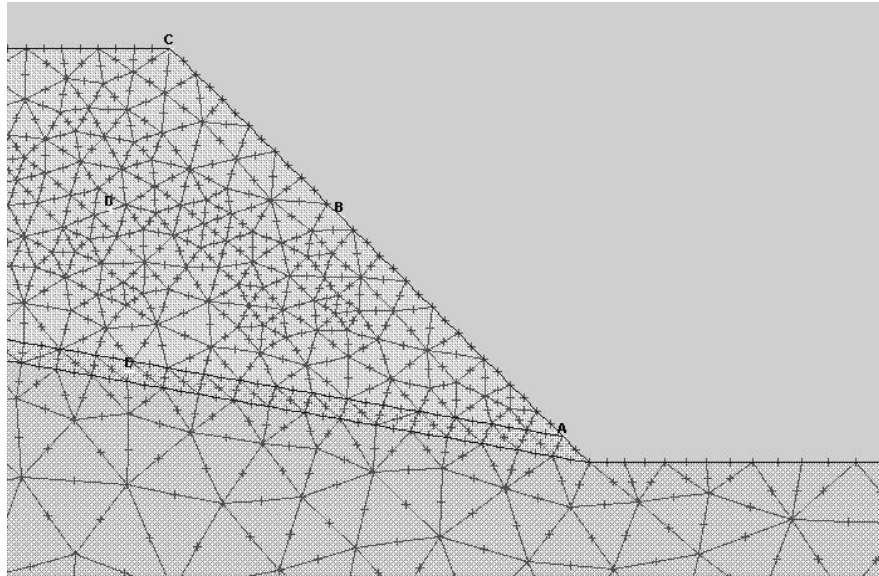


Σχήμα 6.17: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία του 1^{ου} παραδείγματος.

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι στην καμπύλη που σχεδιάστηκε με βάση την παραπάνω περίπτωση, αλλά και στην πλειοψηφία των καμπυλών που παρατίθενται στο παράρτημα είναι ευδιάκριτες οι περιοχές που καθορίζει καθεμία από τις φάσεις επίλυσης. Έτσι, στο κάτω μέρος της καμπύλης και στην περιοχή που αυτή τέμνει τη μονάδα στον άξονα y , διακρίνεται ότι η καμπύλη παρουσιάζει σταθερή τιμή ίση με τη μονάδα, παρόλη την θεωρητική αύξηση της παραμόρφωσης. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στην 1^η φάση επίλυσης κατά την οποία εφαρμόζεται το ίδιο βάρος του υλικού στο μοντέλο. Ο συντελεστής ασφάλειας στην περίπτωση αυτή είναι ίσος με τη μονάδα. Στη δεύτερη φάση επίλυσης μηδενίζονται οι παραμορφώσεις που προκάλεσε η εφαρμογή του ίδιου του βάρους του υλικού και γι' αυτό το λόγο η καμπύλη «επιστρέφει» προς τον y άξονα. Από το σημείο αυτό και πάνω τα σημεία της καμπύλης αντιστοιχούν στην τρίτη φάση υπολογισμών και υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας με βάση τη λογική που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Περίπτωση 2^η

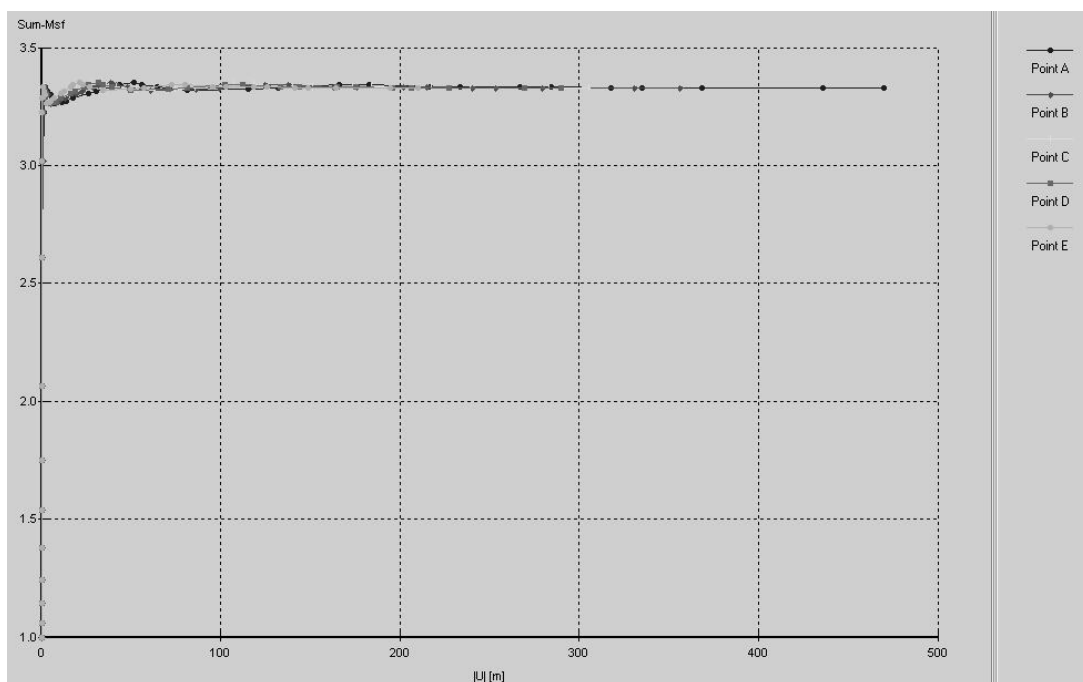
Στο δεύτερο παράδειγμα που αναφέρεται σε αυτό το σημείο εξετάζεται η ευστάθεια του πρανούς με ίδια γεωμετρία με αυτή της 1^{ης} περίπτωσης, αλλά συνοχή αργίλου κατά 100 kN/m^2 μικρότερη. Οι υπόλοιπες ιδιότητες των υλικών είναι αυτές του Πίνακα 6.3. Οι φάσεις που εισήχθησαν για την επίλυση του προτύπου είναι αυτές του Πίνακα 6.4, με τη διαφορά ότι τα βήματα υπολογισμών στη φάση 3 είναι 40, έναντι 25 της πρώτης



Σχήμα 6.18: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για το 2^ο παράδειγμα υπολογισμών (σχήμα σε μεγέθυνση).

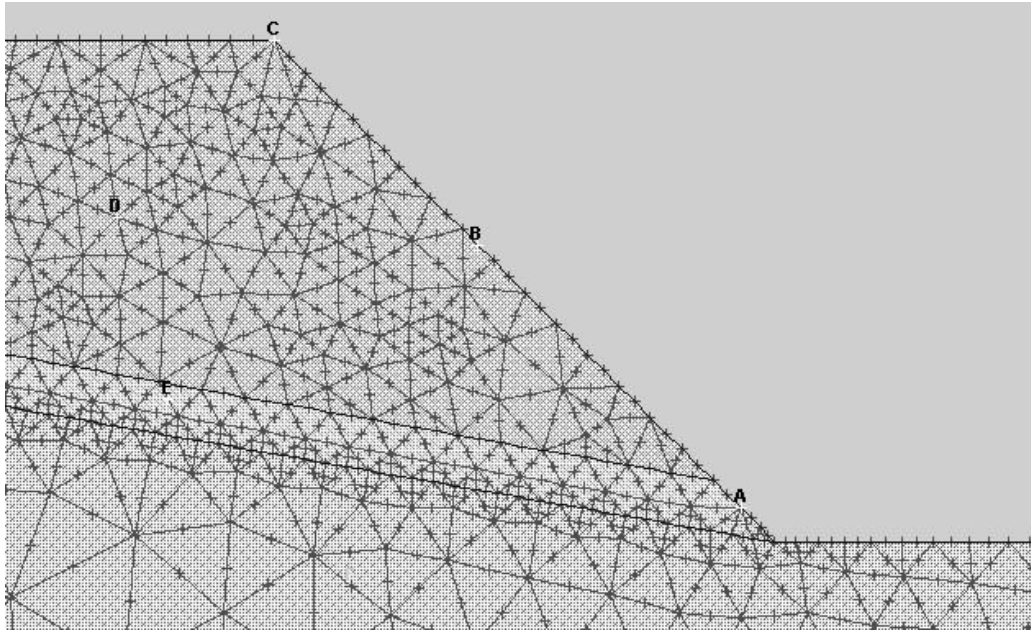
περίπτωσης. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο ότι στα 25 βήματα δεν ήταν σαφής η επιπέδωση της καμπύλης επομένως δεν είχε σαφώς επέλθει η αστοχία του πρανούς για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Για το λόγο αυτό τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν στα 40, με αποτέλεσμα να είναι σαφής η περιοχή επιπέδωσης και ο προσδιορισμός του ΣΜsf.

Τα σημεία που προεπιλέχτηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών είναι αυτά του Σχήματος 6.18, ενώ η καμπύλη ΣΜsf - $|u|$ για τα σημεία αυτά παρουσιάζεται στο



Σχήμα 6.19: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία του 2^{ου} παραδείγματος.

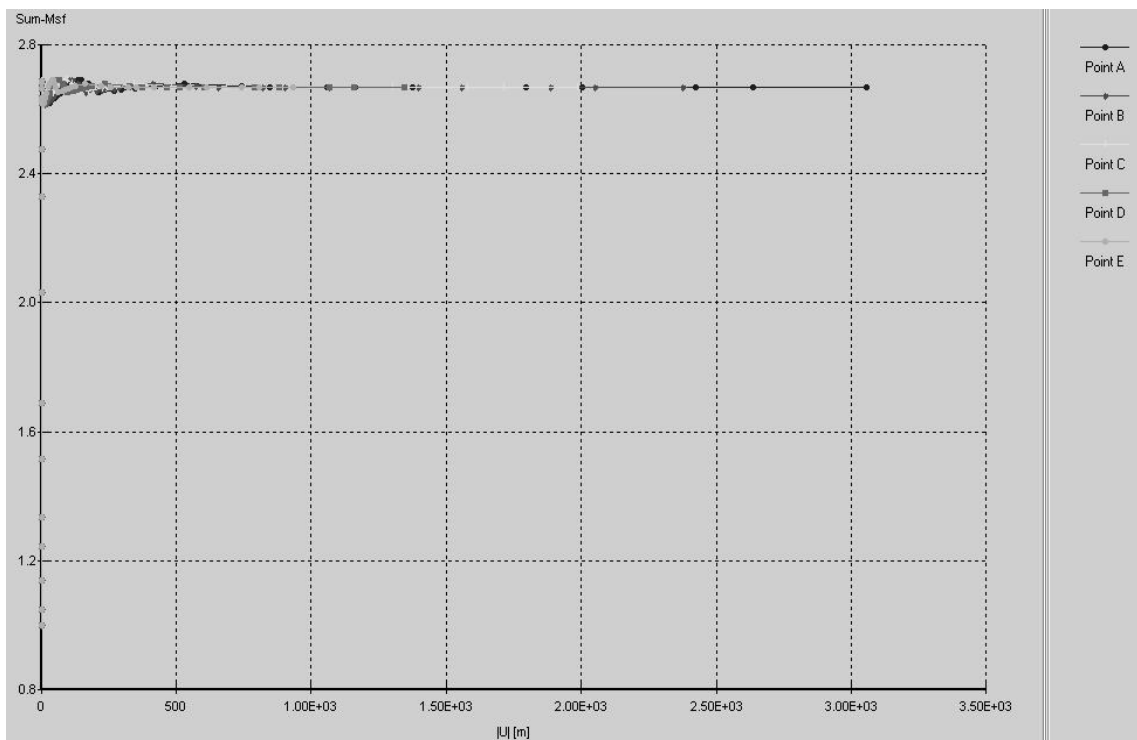
Σχήμα 6.19. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.18 τα σημεία που επιλέγονται είναι κοντά στο μέτωπο του πρανούς και ειδικότερα: το σημεία Α βρίσκεται κοντά στο πόδι, το Β στη μέση περίπου του μετώπου, το C ακριβώς πάνω στο φρύδι του πρανούς, ενώ τα D και E βρίσκονται στη μάζα του υπερκείμενου ψαμμίτη και του στρώματος της αργίλου αντίστοιχα.



Σχήμα 6.21: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για το 2^ο παράδειγμα υπολογισμών (σχήμα σε μεγέθυνση).

σημεία που επιλέχτηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών και οι καμπύλες $\Sigma Msf - |u|$ αντίστοιχα. Η επιλογή των σημείων έγινε όπως και στην 2^η περίπτωση.

Ο συντελεστής ασφάλειας στην περίπτωση αυτή είναι 2,691 για το μέγιστο της καμπύλης και 2,665 για την περιοχή επιπέδωσής της. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών



Σχήμα 6.22: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία του 3^{ου} παραδείγματος.

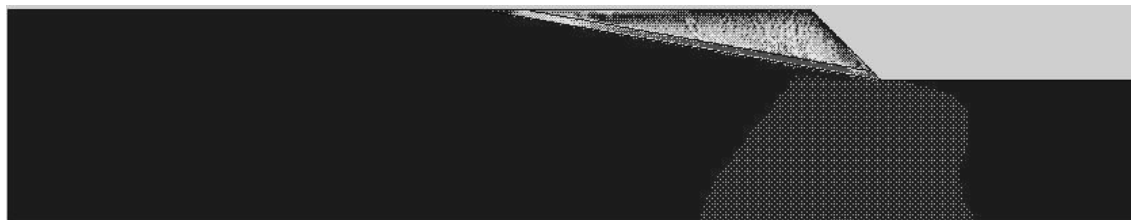
συντελεστών είναι ελάχιστη, ενώ όπως παρατηρείται η τιμή του συντελεστή ασφάλειας στην περίπτωση αυτή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη 2^η στην οποία το πάχος του στρώματος της αργίλου είναι 1,25 m. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση το ότι το πάχος της επιφάνειας ολίσθησης που αντιστοιχεί στο εδαφικό στρώμα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες γίνεται στην περίπτωση αυτή μεγαλύτερο, επομένως το πρανές είναι λιγότερο ασφαλές, όπως και αποδεικνύεται.

6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ PLAXIS

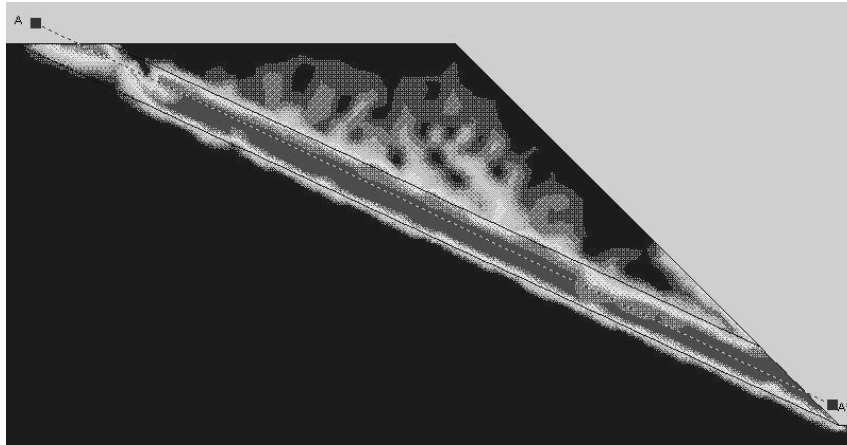
Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, το Plaxis δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να απεικονίσει την κατανομή των τάσεων πάνω σε μια τυχαία ευθεία που εκείνος επιλέγει μέσα στη μάζα του προτύπου. Με βάση αυτό το δεδομένο και μετά από την επιτυχή επίλυση κάθε μιας από τις περιπτώσεις, επιλέχτηκαν κάποιες ευθείες από τις οποίες εξάγεται η διατμητική και η κατακόρυφη ενεργή τάση που εφαρμόζονται μετά το τέλος της επίλυσης στη δεδομένη περιοχή.

Η επιλογή των ευθειών αυτών δεν έγινε τυχαία αλλά πραγματοποιήθηκε σε περιοχές όπου από τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνεται να υπάρχει υψηλή συγκέντρωση διατμητικών τάσεων. Οι περιοχές αυτές, βρίσκονται μεταξύ των εδαφικών στρωμάτων του ψαμμίτη, μέσα στη μάζα της αργίλου όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο εφόσον η άργιλος επιλέχτηκε να έχει χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στη μάζα του μοντέλου δίνεται για μία από τις περιπτώσεις στο Σχήμα 6.23 (πάχος στρώματος αργίλου: 2,5m, κλίση στρώματος αργίλου: 10° και συνοχή αργίλου: 150 kN/m²) ενώ για τις υπόλοιπες δίνεται στο παράρτημα της εργασίας.

Όπως είναι φανερό από το Σχήμα 6.23 (και τα αντίστοιχα σχήματα για τα υπόλοιπα πρότυπα στο παράρτημα) οι περιοχές που επιλέχτηκαν για την εξαγωγή της διατμητικής



Σχήμα 6.23: Απεικόνιση κατανομής των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του μοντέλου για μια από τις περιπτώσεις επίλυσης. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η υψηλή συγκέντρωση των σχετικών διατμητικών τάσεων μέσα στη μάζα της αργίλου.



Σχήμα 6.24: Σχεδιασμός ευθείας για την εξαγωγή της μέγιστης διατμητικής τάσης που επικρατεί στο πρότυπο.

τάσης για κάθε μια από τις επιμέρους επιλύσεις βρίσκονται μέσα στη μάζα της αργίλου (ευθεία Σχήμα 6.24) όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση διατμητικών τάσεων.

Για την ίδια ευθεία που σχεδιάζεται για την εξαγωγή των διατμητικών τάσεων, μπορούν να εξαχθούν και οι ενεργές κύριες τάσεις στο πρότυπο. Με βάση την τιμή της ενεργής κύριας τάσης που υπολογίζεται για το σημείο στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη διατμητική τάση αλλά και των παραμέτρων αντοχής του υλικού (αργίλου), υπολογίζεται η διατμητική αντοχή αυτού από τη σχέση:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad [6.3]$$

όπου: τ = η διατμητική αντοχή της αργίλου,

c = η συνοχή της αργίλου,

σ_n = η ενεργή κύρια τάση και

ϕ = η γωνία εσωτερικής τριβής της αργίλου.

Δεδομένης λοιπόν της διατμητικής αντοχής τ αλλά και της διατμητικής τάσης τ_{sh} που υπολογίστηκε όπως περιγράφηκε παραπάνω, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας FS του πρανούς από τη σχέση:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_{sh}} \quad [6.4]$$

Έτσι, εξάγεται από το Plaxis ένας συντελεστής ασφάλειας ο οποίος ουσιαστικά προκύπτει με την κλασσική μέθοδο ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό. Για λόγους σύγκρισης λοιπόν και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων που δίνει το Plaxis για το συντελεστή ασφάλειας καθεμιάς από τις επιλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρατίθενται και τα αποτελέσματα από τους παραπάνω υπολογισμούς στην επόμενη ενότητα.

6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες σχεδιάστηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες για όλα τα μοντέλα που επιλύθηκαν στην παρούσα εργασία. Καθένα από τα διαγράμματα που σχεδιάστηκαν περιέχει μια σειρά καμπυλών για περισσότερα του ενός σημεία τα οποία προεπιλέχτηκαν για τον έλεγχο του αν ο συντελεστής ασφάλειας είναι ο ίδιος για όλα τα σημεία του προτύπου. Έτσι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα μοντέλα που επιλύθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό, με βάση πάντα τις τιμές των τάσεων που προέκυψαν από το Plaxis.

Πίνακας 6.5: Συντελεστής ασφάλειας μοντέλων εδαφικών πρανών όπως υπολογίστηκε από το Plaxis στο peak των καμπυλών και στις περιοχές επιπέδωσης αυτών, αλλά και ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό.

Επίλυση	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	Συντελεστής ασφάλειας από PLAXIS		
				Στο μέγιστο της καμπύλης	Στην περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης	Λόγος $\frac{\tau}{\tau_{sh}}$
1	1,25	150	5	6,777	6,739	7,122
2	1,25	150	10	5,186	5,041	5,232
3	1,25	150	15	4,023	3,983	4,049
4	1,25	150	20	3,685	3,504	3,529
5	1,25	150	25	3,608	3,376	3,405
6	1,25	150	30	3,825	3,728	3,755
7	2,5	150	5	6,214	6,008	6,137
8	2,5	150	10	4,293	4,138	4,232
9	2,5	150	15	4,080	3,704	3,740
10	2,5	150	20	3,566	3,257	3,327
11	2,5	150	25	3,489	3,379	3,420
12	2,5	150	30	3,656	3,650	3,713
13	1,25	50	5	7,414	7,250	7,299
14	1,25	50	10	3,352	3,332	3,381
15	1,25	50	15	2,440	2,420	2,474
16	1,25	50	20	1,936	1,930	2,000
17	1,25	50	25	1,788	1,780	1,869
18	1,25	50	30	1,800	1,734	1,798
19	2,5	50	5	3,666	3,419	3,595
20	2,5	50	10	2,691	2,665	2,788
21	2,5	50	15	2,192	2,160	2,219
22	2,5	50	20	1,902	1,844	1,927
23	2,5	50	25	1,743	1,726	1,791
24	2,5	50	30	1,736	1,702	1,800

Όπως προαναφέρθηκε, οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα για το σύνολο των 24^{ων} μοντέλων παρατίθενται στο παράρτημα. Ακολουθεί η περιγραφή της επίλυσης με τη μέθοδο της ισορροπίας δυνάμεων καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή και τέλος η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

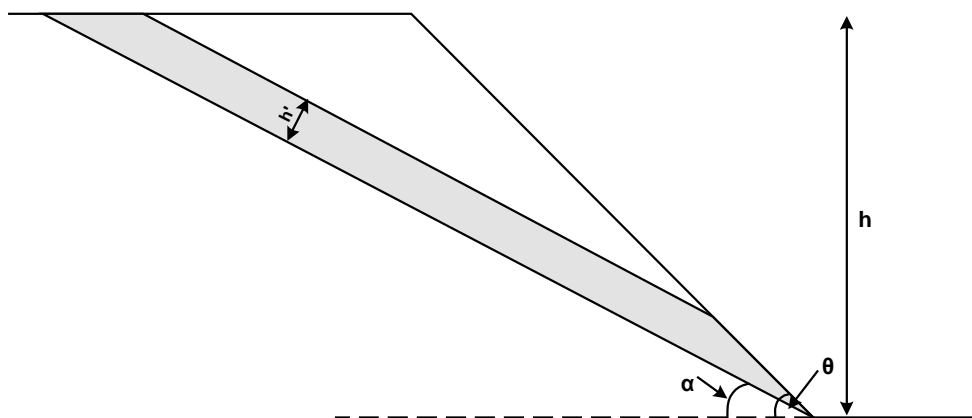
6.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε, η επίλυση των μοντέλων εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειάς τους πραγματοποιήθηκε και με την απλή θεώρηση της ισορροπίας δυνάμεων για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Έστω λοιπόν το πρανές του Σχήματος 6.25 που αποτελεί τη γενική περίπτωση που εξετάζεται. Η κλίση του πρανού ανέρχεται στις 45° (γωνία θ), ενώ το ύψος του είναι $h = 25\text{m}$. Το λεπτό αργιλικό στρώμα το έχει πάχος (h') ίσο με το 1/10 ή 1/20 του ύψους του πρανού, δηλαδή 2,5 m ή 1,25 m αντίστοιχα.

Εξετάζεται η ευστάθεια του εν λόγω πρανού στην περίπτωση που η κλίση του αργιλικού στρώματος (γωνία α) κυμαίνεται από 5°-30° με βήμα 5° και η τιμή της συνοχής της αργίλου ισούται με 50 ή 150kN/m². Στο Σχήμα 6.25 απεικονίζεται η γενική περίπτωση για την οποία το αργιλικό στρώμα σχηματίζει γωνία α με την οριζόντιο.

6.5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΦΗΝΑΣ

Για να γίνει ο απλός υπολογισμός της ευστάθειας μέσω των δυνάμεων που τείνουν να κινήσουν την εδαφική σφήνα και αυτών που τείνουν να αντισταθούν στην κίνησή της, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός ορισμένων γεωμετρικών στοιχείων του πρανού, τα



Σχήμα 6.25: Πρανές με λεπτό εδαφικό στρώμα αργιλικού υλικού.

οποία φαίνονται στο Σχήμα 6.26. Ενδιαφέρει κυρίως ο υπολογισμός των εμβαδών των επιφανειών A , A_1 , A_2 και A_3 , καθώς και των μηκών έδρασης της εκάστοτε σφήνας. Η επίλυση με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας πραγματοποιήθηκε για τρεις περιπτώσεις:

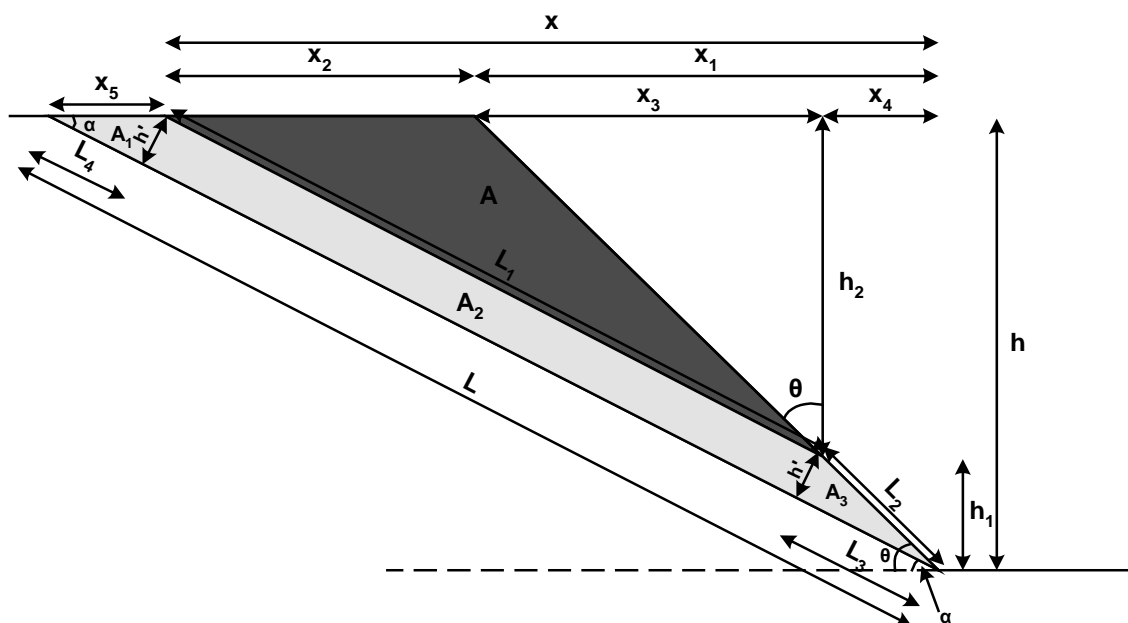
- για την περίπτωση που η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του υπερκείμενου στρώματος ψαμμίτη και του στρώματος της αργίλου,
- για την περίπτωση που η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του στρώματος της αργίλου και του υποκείμενου στρώματος ψαμμίτη,
- για την περίπτωση που η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται μέσα στη μάζα του στρώματος της αργίλου (στο μέσο του πάχους του).

Ακολουθεί ανάλυση των γεωμετρικών στοιχείων της σφήνας για τον υπολογισμό των εμβαδών και τελικά του βάρους της για καθεμία περίπτωση ξεχωριστά.

Περίπτωση 1''

Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του υπερκείμενου στρώματος ψαμμίτη και του στρώματος της αργίλου. Δεδομένου του ύψους h και της κλίσης του πρανούς θ , υπολογίζεται το μήκος x_1 από τη σχέση:

$$x_1 = h \cdot \tan \theta \quad [6.5]$$



Σχήμα 6.26: Γεωμετρικά στοιχεία απαραίτητα για την ανάλυση της ευστάθειας της εδαφικής σφήνας.

Το μήκος L_2 προκύπτει από το τρίγωνο A_3 ως εξής:

$$L_2 = \frac{h'}{\sin(\theta - \alpha)} \quad [6.6]$$

Από το μήκος L_2 υπολογίζεται το ύψος h_1 :

$$h_1 = L_2 \cdot \cos(90 - \theta) \quad [6.7]$$

ενώ για το h_2 είναι:

$$h_2 = h - h_1 \quad [6.8]$$

Δεδομένου του ύψους του τριγώνου A απαιτείται ο υπολογισμός του μήκους της βάσης του για να προκύψει τελικά το εμβαδόν του. Το μήκος x_2 λοιπόν προκύπτει πολύ εύκολα από τη σχέση:

$$x_2 = h_2 \cdot [\tan(90 - \alpha) - \tan \theta] \quad [6.9]$$

Άρα τελικά η επιφάνεια A θα είναι ίση με:

$$A = \frac{1}{2} h_2 \cdot x_2 \quad [6.10]$$

Η επιφάνεια A αντιστοιχεί στο εμβαδόν της τομής του στρώματος του ψαμμίτη που υπέρκειται της αργίλου και είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του βάρους της σφήνας του ψαμμίτη.

Περίπτωση 2η

Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του στρώματος της αργίλου και του υποκείμενου στρώματος ψαμμίτη. Για το λόγο αυτό, εκτός του εμβαδού A πρέπει να υπολογιστούν και τα εμβαδά των επιφανειών A_1 , A_2 και A_3 . Για τον υπολογισμό του εμβαδού A_2 απαιτείται το μήκος L_1 .

Αρχικά υπολογίζεται το μήκος x_3 :

$$x_3 = h_2 \cdot \tan(90 - \theta) \quad [6.11]$$

Έτσι, από το Πυθαγόρειο θεώρημα προκύπτει ότι:

$$L_1 = \sqrt{(x_2 + x_3)^2 + h_2^2} \quad [6.12]$$

Άρα το εμβαδόν της επιφάνειας A_2 είναι:

$$A_2 = L_1 \cdot h' \quad [6.13]$$

Οι επιφάνειες A_1 και A_2 υπολογίζονται εύκολα από τα γεωμετρικά στοιχεία των αντίστοιχων τριγώνων. Έτσι για την επιφάνεια A_1 αρκεί να υπολογιστεί το μήκος L_4 . Είναι:

$$x_5 = \frac{h'}{\sin \alpha} \quad [6.14]$$

Άρα:

$$L_4 = \sqrt{x_5^2 - (h')^2} \quad [6.15]$$

Επομένως τελικά είναι:

$$A_1 = \frac{1}{2} L_4 \cdot h' \quad [6.16]$$

Αντίστοιχα για την επιφάνεια A_2 υπολογίζεται αρχικά το μήκος L_3 :

$$L_3 = \frac{h'}{\tan(\theta - \alpha)} \quad [6.17]$$

Επομένως τελικά είναι:

$$A_3 = \frac{1}{2} L_3 \cdot h' \quad [6.18]$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται το εμβαδόν της επιφάνειας της τομής του στρώματος της αργίλου, ως το άθροισμα των επιφανειών A_1 , A_2 και A_3 .

Περίπτωση 3''

Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση, η επιφάνεια ολίσθησης του πρανούς βρίσκεται μέσα στη μάζα του στρώματος της αργίλου και ειδικότερα στο μέσο του πάχους αυτού. Για την περίπτωση αυτή, το εμβαδόν της επιφάνειας του αργιλικού στρώματος που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης υπολογίζεται με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία του Σχήματος 6.26 αλλά και του Σχήματος 6.27. Για το μήκος L_4' είναι:

$$L_4' = \frac{h'/2}{\tan \alpha} \quad [6.19]$$

Άρα το εμβαδόν A_1' του τριγώνου θα είναι:

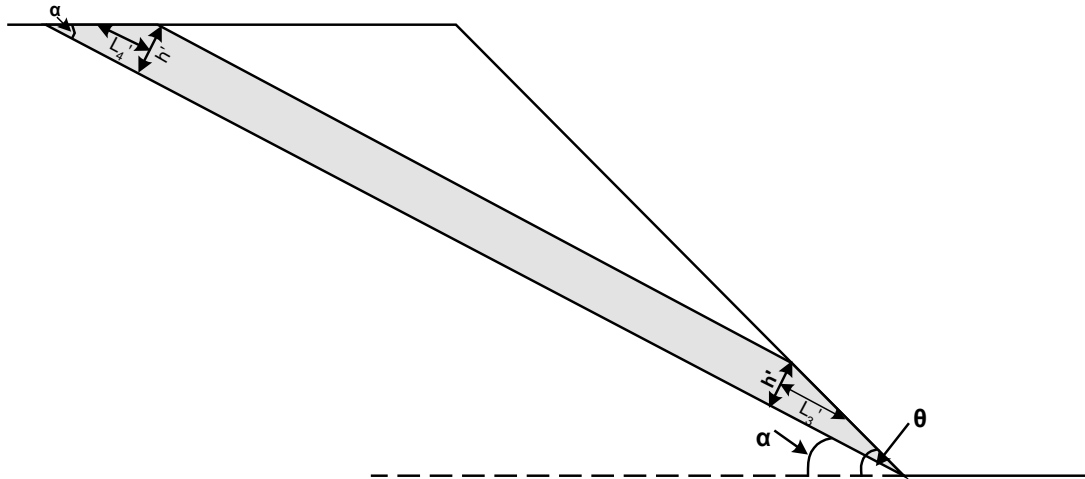
$$A_1' = \frac{1}{2} L_4' \cdot \frac{h'}{2} \quad [6.20]$$

Αντίστοιχα για το μήκος L_3' είναι:

$$L_3' = \frac{h'/2}{\tan(\theta - \alpha)} \quad [6.21]$$

Τελικά το εμβαδόν A_3' του τριγώνου θα είναι:

$$A_3' = \frac{1}{2} L_3' \cdot \frac{h'}{2} \quad [6.22]$$



Σχήμα 6.27: Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς για τον υπολογισμό του εμβαδού των τριγώνων της τομής της επιφάνειας της αργίλου με μια ευθεία που περνάει από το μέσο του πάχους της.

Με βάση τα παραπάνω, το εμβαδόν της επιφάνειας της αργίλου που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης θα ισούται με το άθροισμα των εμβαδών A_1' , $A_2/2$ και A_3' .

6.5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια γενική περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Για το σκοπό αυτό, το εμβαδόν της υπερκείμενης της επιφάνειας ολίσθησης μάζας του υλικού, αναφέρεται γενικά σαν εμβαδόν A , το οποίο βέβαια διαφοροποιείται για κάθε περίπτωση επίλυσης. Δεδομένου όμως ότι στην ενότητα αυτή επεξηγείται η φιλοσοφία επίλυσης και μόνο, δεν θα γίνει αναφορά σε καθεμία περίπτωση ξεχωριστά, αλλά στην γενικότερη των περιπτώσεων.

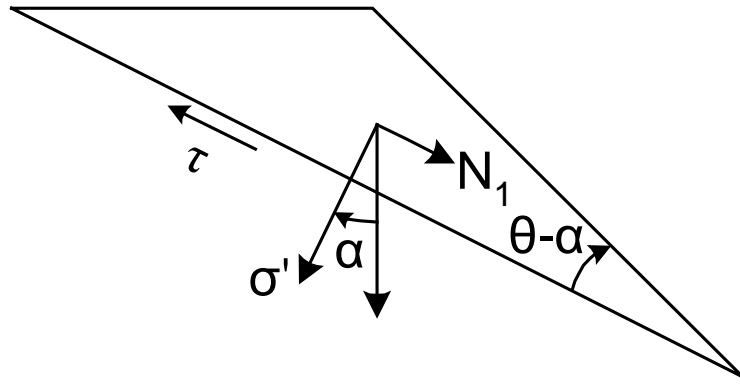
Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στη σφήνα απεικονίζονται στο Σχήμα 6.28. Για τον υπολογισμό του βάρους της εκάστοτε σφήνας θεωρείται ότι αυτή έχει μοναδιαίο πάχος, επομένως ο όγκος της (στην τρίτη διάσταση θεωρείται μοναδιαίο το πάχος της) θα είναι ίσος με:

$$V = A \cdot 1m \quad [6.23]$$

Από τον όγκο της σφήνας (στην περίπτωση που σε αυτή συμμετέχουν διαφορετικά υλικά, από τον όγκο καθενός από αυτά) και το φαινόμενο βάρος των εδαφικών υλικών που απαντώνται σε αυτή ($\gamma_{\psi\alpha\mu} = 21 \text{ kN/m}^3$ και $\gamma_{\alpha\rho\gamma} = 16 \text{ kN/m}^3$) υπολογίζεται τελικά το βάρος W της σφήνας, ως το άθροισμα των βαρών (W_i) των επιμέρους εδαφικών όγκων:

$$W = \sum W_i = \sum (V_i \cdot \gamma_i) \quad [6.24]$$

όπου V_i είναι ο όγκος καθενός από τα εδαφικά υλικά στη σφήνα και γ_i το αντίστοιχο φαινόμενο βάρος. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι το φαινόμενο βάρος που



Σχήμα 6.28: Ανάλυση δυνάμεων που εφαρμόζονται στη σφήνα για την γενική περίπτωση κλίσης στρώματος αργίλου α και κλίση πρανούς θ .

χρησιμοποιείται αντιστοιχεί στο ξηρό φαινόμενο βάρος κατ' αντιστοιχία με την επίλυση στο Plaxis όπου τα δεδομένα εδαφικά υλικά βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Το βάρος της σφήνας αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την κάθετη στο επίπεδο έδρασης της σ' και στην παράλληλη με αυτό N_1 , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.28.

Από το Σχήμα 6.28 φαίνεται ότι για τη δύναμη σ' θα είναι:

$$\sigma' = \cos \alpha \cdot W \quad [6.25]$$

Το μήκος έδρασης της σφήνας (επομένως και το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης) διαφέρει σε κάθε περίπτωση και για το λόγο αυτό θα αναφέρεται γενικά σαν μήκος L . Η δύναμη σ' όπως υπολογίστηκε στη σχέση [6.25] μετατρέπεται σε τάση αν διαιρεθεί με το εμβαδόν στο οποίο εφαρμόζεται και το οποίο είναι ίσο με το μήκος L επί το μοναδιαίο πάχος της σφήνας. Με βάση τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ' και τη συνοχή c' της αργίλου προκύπτει η διατμητική της αντοχή από τη σχέση:

$$\tau' = c' + \sigma \tan \phi' \quad [6.26]$$

όπου σ είναι η ορθή τάση που εφαρμόζεται στο επίπεδο έδρασης της σφήνας. Η διατμητική δύναμη είναι αυτή που αντιστέκεται στη μετακίνηση και προκύπτει από πολλαπλασιασμό της τάσης με το εμβαδόν στο οποίο αυτή εφαρμόζεται. Έτσι θα είναι:

$$\tau = \tau' \cdot L \cdot 1m \quad [6.27]$$

Η δύναμη N_1 είναι η συνιστώσα του βάρους η οποία τείνει να οδηγήσει τη σφήνα σε ολίσθηση. Με βάση το Σχήμα 6.28 είναι:

$$N_1 = \sin \alpha \cdot W \quad [6.28]$$

Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς προκύπτει ως το πηλίκο των δυνάμεων που

τείνουν να συγκρατήσουν τη σφήνα, προς αυτές που τείνουν να τη μετακινήσουν. Έτσι είναι τελικά:

$$FS = \frac{\tau}{N_1} \quad [6.29]$$

6.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, τα δεδομένα της γεωμετρίας της σφήνας και των υλικών τα οποία αυτή περιλαμβάνει εισήχθησαν σε φύλλο εργασίας του Excel και έγινε η αντίστοιχη παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε και στο Plaxis για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας του εδαφικού πρανούς. Τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Συντελεστής ασφάλειας επιμέρους επιλύσεων όπως υπολογίστηκε από την ισορροπία δυνάμεων.

Επίλυση	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	Συντελεστής ασφάλειας από Μ.Ο.Ι.		
				Πάνω επιφάνεια αργίλου	Μέσα στη μάζα της αργίλου	Κάτω επιφάνεια αργίλου
1	1,25	150	5	12,721	12,595	12,490
2	1,25	150	10	6,848	6,765	6,701
3	1,25	150	15	5,022	4,945	4,889
4	1,25	150	20	4,274	4,190	4,130
5	1,25	150	25	4,072	3,965	3,887
6	1,25	150	30	4,388	4,219	4,095
7	2,5	150	5	13,193	12,911	12,677
8	2,5	150	10	7,152	6,963	6,818
9	2,5	150	15	5,298	5,121	4,992
10	2,5	150	20	4,580	4,381	4,239
11	2,5	150	25	4,479	4,211	4,021
12	2,5	150	30	5,067	4,611	4,289
13	1,25	50	5	7,633	7,591	7,556
14	1,25	50	10	3,966	3,938	3,917
15	1,25	50	15	2,782	2,756	2,737
16	1,25	50	20	2,240	2,212	2,192
17	1,25	50	25	1,994	1,958	1,932
18	1,25	50	30	1,977	1,920	1,879
19	2,5	50	5	7,790	7,696	7,618
20	2,5	50	10	4,067	4,004	3,956
21	2,5	50	15	2,874	2,815	2,772
22	2,5	50	20	2,342	2,276	2,228
23	2,5	50	25	2,129	2,040	1,977
24	2,5	50	30	2,203	2,051	1,944

6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον Πίνακα 6.7 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση με τις δύο μεθόδους: τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την εφαρμογή του Plaxis και τη μέθοδο της ισορροπίας δυνάμεων μέσω του Excel.

Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επίλυσης με το Plaxis και την ισορροπία δυνάμεων.

Επίλυση	Πάχος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση αργίλου (°)	Συντελεστής ασφάλειας από Plaxis (ΜΠΣ και τ/τ_{sh})			Συντελεστής ασφάλειας από Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας		
				Από καμπύλη (ΜΠΣ)		FS= τ/τ_{sh}	Πάνω επιφάνεια αργίλου	Στη μάζα της αργίλου	Κάτω επιφάνεια αργίλου
				Στο μέγιστο	Στην περιοχή επιπέδωσης				
1	1.25	150	5	6.777	6.739	7.122	12.721	12.595	12.490
2	1.25	150	10	5.186	5.041	5.232	6.848	6.765	6.701
3	1.25	150	15	4.023	3.983	4.049	5.022	4.945	4.889
4	1.25	150	20	3.685	3.504	3.529	4.274	4.190	4.130
5	1.25	150	25	3.608	3.376	3.405	4.072	3.965	3.887
6	1.25	150	30	3.825	3.728	3.755	4.388	4.219	4.095
7	2.5	150	5	6.214	6.008	6.137	13.193	12.911	12.677
8	2.5	150	10	4.293	4.138	4.232	7.152	6.963	6.818
9	2.5	150	15	4.080	3.704	3.740	5.298	5.121	4.992
10	2.5	150	20	3.566	3.257	3.327	4.580	4.381	4.239
11	2.5	150	25	3.489	3.379	3.420	4.479	4.211	4.021
12	2.5	150	30	3.656	3.650	3.713	5.067	4.611	4.289
13	1.25	50	5	7.414	7.250	7.299	7.633	7.591	7.556
14	1.25	50	10	3.352	3.332	3.381	3.966	3.938	3.917
15	1.25	50	15	2.440	2.420	2.474	2.782	2.756	2.737
16	1.25	50	20	1.936	1.930	2.000	2.240	2.212	2.192
17	1.25	50	25	1.788	1.780	1.869	1.994	1.958	1.932
18	1.25	50	30	1.800	1.734	1.798	1.977	1.920	1.879
19	2.5	50	5	3.666	3.419	3.595	7.790	7.696	7.618
20	2.5	50	10	2.691	2.665	2.788	4.067	4.004	3.956
21	2.5	50	15	2.192	2.160	2.219	2.874	2.815	2.772
22	2.5	50	20	1.902	1.844	1.927	2.342	2.276	2.228
23	2.5	50	25	1.743	1.726	1.791	2.129	2.040	1.977
24	2.5	50	30	1.736	1.702	1.800	2.203	2.051	1.944

Όπως είναι φανερό από τα στοιχεία του Πίνακα 6.7, η επίλυση με το Plaxis και με τις δύο μεθόδους (με τη μέθοδο που προτείνει το λογισμικό αλλά και ως ο λόγος της

διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό), δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά μεταξύ τους, με ελάχιστες περιπτώσεις μικρής απόκλισης η οποία φτάνει τη μέγιστη τιμή της (0,383) στην 1^η περίπτωση επίλυσης. Το γεγονός αυτό δίνει μια ένδειξη του ότι η διαδικασία επίλυσης με το Plaxis και τη μέθοδο που αυτό ακολουθεί για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αυτό προκύπτει από το ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δίνει αδιαμφισβήτητα αξιόπιστα αποτελέσματα όσο αφορά την κατανομή των τάσεων στη μάζα του προτύπου. Με βάση λοιπόν τις τάσεις αυτές υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς, ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό, με βάση πάντα τις τιμές των τάσεων που προέκυψαν από το Plaxis. Δεδομένου ότι η ταύτιση των τιμών που προέκυψαν από την ισορροπία δυνάμεων με αυτές που προέκυψαν από την επίλυση με τη μέθοδο που προτείνουν οι κατασκευαστές του λογισμικού για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας είναι αρκετά ικανοποιητική, επιβεβαιώνεται τελικά η διαδικασία.

Συγκριτικά με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας όπως αυτή πραγματοποιήθηκε με την θεώρηση της ισορροπίας δυνάμεων, φαίνεται να υπάρχει μια σχετικά καλή ταύτιση των τιμών που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους στις υψηλές τιμές της κλίσης του αργιλικού στρώματος. Έτσι, και για τις δύο διαφορετικές τιμές πάχους του αργιλικού στρώματος αλλά και για τους συνδυασμούς αυτών με τη διαφορετική συνοχή, για κλίση από 20° και πάνω, φαίνεται οι τιμές των συντελεστών ασφάλειας να είναι όχι μόνο της ίδιας τάξης μεγέθους αλλά και αρκετά κοντά με τη μέγιστη διαφορά να υπερβαίνει σε μία μόνο περίπτωση τη μονάδα, ενώ κατά μέσο όρο κυμαίνεται γύρω στη μισή μονάδα.

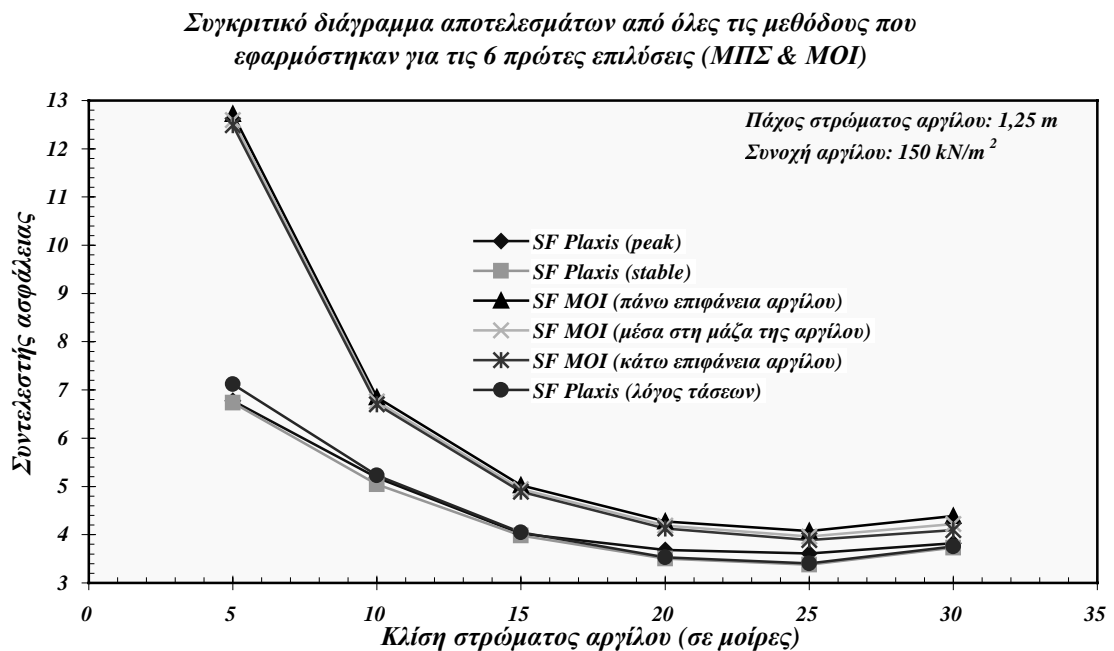
Για κλίση 15°, υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από την μέθοδο οριακής ισορροπίας και από την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, για την περίπτωση που το πάχος του στρώματος της αργίλου είναι 1,25 m και η συνοχή της $c = 150 \text{ kN/m}^2$, η μέθοδος οριακής ισορροπίας δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 4,9, ενώ το Plaxis δίνει ένα συντελεστή μια μονάδα σχεδόν μικρότερο (3,983). Για την περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι 2,5 m και η συνοχή της $c = 150 \text{ kN/m}^2$, η ισορροπία δυνάμεων δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 5,1, ενώ ο συντελεστής που δίνει το Plaxis είναι αρκετά μικρότερος (3,704).

Για την περίπτωση που το πάχος του στρώματος της αργίλου είναι 1,25 m και η συνοχή της $c = 50 \text{ kN/m}^2$, η ταύτιση των συντελεστών ασφάλειας είναι αρκετά καλύτερη. Η μέθοδος οριακής ισορροπίας δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 2,7, ενώ το Plaxis δίνει ένα συντελεστή λίγο μικρότερο (2,420). Τέλος, όταν το πάχος της αργίλου είναι 2,5 m και η συνοχή της $c = 50 \text{ kN/m}^2$ ο συντελεστής ασφάλειας που εξάγεται σε κάθε περίπτωση είναι 2,82 περίπου από την ισορροπία δυνάμεων και 2,160 από το Plaxis αντίστοιχα, διαφορά που δεν θεωρείται αρκετά μεγάλη.

Στις 10° η απόκλιση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη, ξεπερνώντας τη μονάδα σε ορισμένες περιπτώσεις και ειδικότερα στην περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 και 1,25 m αντίστοιχα, αλλά και στην περίπτωση που $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της αργίλου είναι 2,5 m. Για $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και πάχος 1,25 m η ταύτιση είναι καλύτερη με διαφορά λίγο μεγαλύτερη της μισής μονάδας για τις δύο περιπτώσεις (3,94 περίπου και 3,332 για ισορροπία δυνάμεων και Plaxis αντίστοιχα).

Τέλος για κλίση 5° του στρώματος της αργίλου τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων αποκλίνουν σημαντικά, έτσι ώστε σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι διπλάσιος ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την ισορροπία δυνάμεων από αυτόν που προκύπτει από το Plaxis. Ειδικότερα, για την περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 m ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από τις δύο μεθόδους είναι 12,9 περίπου για την ισορροπία δυνάμεων και 6,008 για το Plaxis. Για $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και πάχος 1,25 m, οι τιμές του SF είναι 12,6 περίπου και 6,739 για τις δύο μεθόδους επίλυσης. Στην περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 m, η ισορροπία δυνάμεων δίνει έναν συντελεστή ασφάλειας 7,7 περίπου ενώ το Plaxis υπολογίζει το συντελεστή αυτό σε 3,419. Στην τελευταία περίπτωση που $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της αργίλου είναι 1,25 m, η ταύτιση είναι πολύ καλύτερη για τις δύο μεθόδους (7,6 περίπου και 7,250 αντίστοιχα).

Στα Σχήματα 6.29 – 6.32 φαίνεται μια γραφική απεικόνιση των 6 διαφορετικών συντελεστών ασφάλειας που προέκυψαν για κάθε επίλυση για τις 4 εξάδες επιλύσεων για οπτική κυρίως σύγκριση των αποτελεσμάτων.



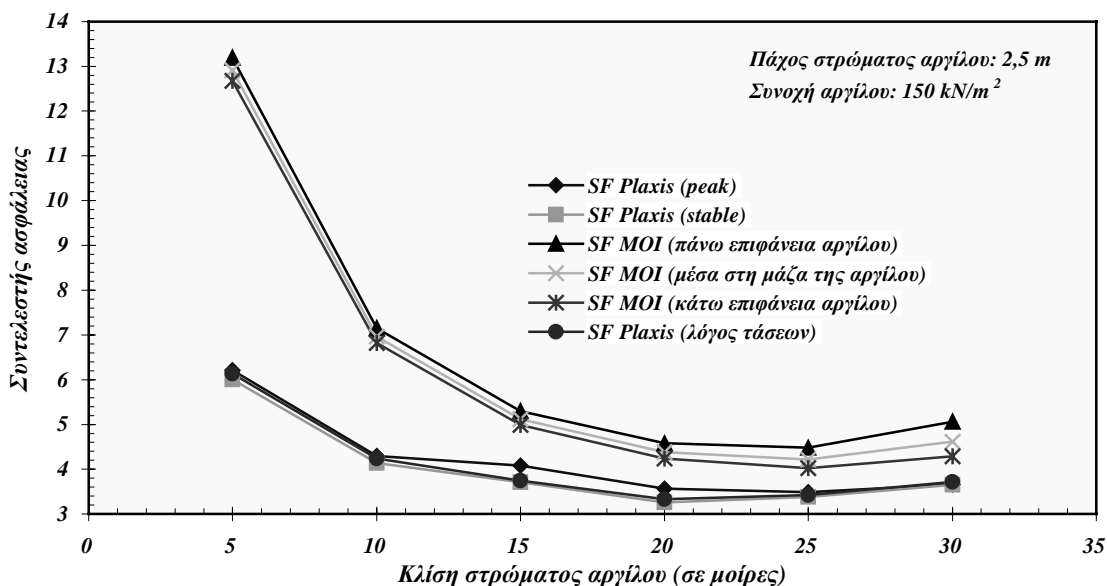
Σχήμα 6.29: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για την πρώτη εξάδα επιλύσεων με όλες τις μεθόδους.

Όπως είναι φανερό στο σύνολο των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και με τις δύο μεθόδους, ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίστηκε είναι άνω της μονάδας που σημαίνει ότι τα εδαφικά πρανά που σχεδιάστηκαν είναι σταθερά και δεν υπάρχει κίνδυνος κατολίσθησής τους. Όσο αφορά την ταύτιση των συντελεστών ασφαλείας, αυτή θεωρείται αρκετά ικανοποιητική δεδομένου ότι η επίλυση με την ισορροπία δυνάμεων όπως πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δεν λαμβάνει υπόψη της αρκετούς από τους παράγοντες που συνυπολογίζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας των υλικών, την επίδραση του υποκείμενου στρώματος ψαμμίτη και τις ιδιότητες αυτού κλπ.).

Επίσης πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι οι δύο μέθοδοι πραγματοποιούν μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευστάθειας πρανών. Η μέθοδος της οριακής ισορροπίας επιλύει το δισδιάστατο εδαφικό πρότυπο με βάση τη θεωρία της ισορροπίας δυνάμεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς.

Από την άλλη, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων 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. Η διαφορετική αυτή φιλοσοφία προσέγγισης είναι

Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων από όλες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν για τις επόμενες 6 επιλύσεις (ΜΠΣ & ΜΟΙ)

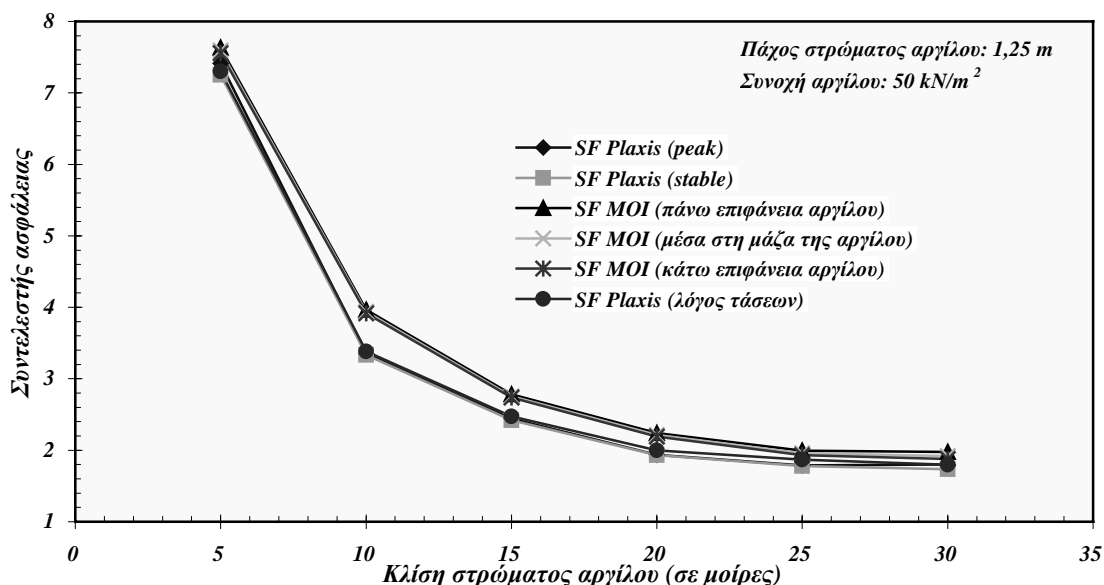


Σχήμα 6.30: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για την δεύτερη εξάδα επιλύσεων με όλες τις μεθόδους.

ένας από τους βασικούς παράγοντες για τους οποίους φαίνεται να υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

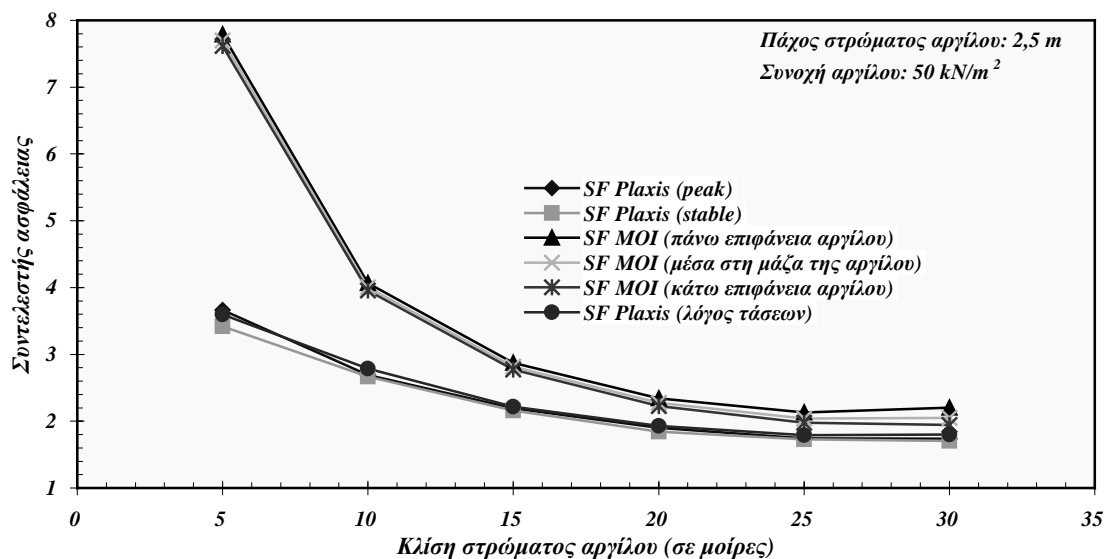
Ακόμη, δεν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη ενός υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού με δεδομένες ιδιότητες οι οποίες προφανώς επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Σημαντικό παράγοντα αποτελούν και οι ιδιότητες του ίδιου του στρώματος της αργίλου οι οποίες

Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων από όλες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν για τις επόμενες 6 επιλύσεις (ΜΠΣ & ΜΟΙ)



Σχήμα 6.31: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για την τρίτη εξάδα επιλύσεων με όλες τις μεθόδους.

Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων από όλες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν για τις τελευταίες 6 επιλύσεις (ΜΠΣ & ΜΟΙ)



Σχήμα 6.32: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για την τελευταία εξάδα επιλύσεων με όλες τις μεθόδους.

όντας αρκετά χαμηλότερες από αυτές του ψαμμίτη είναι φυσικό να δίνουν μεγαλύτερη πιθανότητα ολίσθησης στο πρανές.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, είναι φανερό ότι σχετικές διαφορές στο συντελεστή ευστάθειας όπως αυτός προκύπτει από τις δύο μεθόδους είναι αναμενόμενες λόγω της απλουστευμένης θεώρησης του προβλήματος κατά την επίλυση με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας, αλλά και της διαφορετικής φιλοσοφίας προσέγγισης του προβλήματος από τις δύο μεθόδους.

Δεδομένου του καθορισμού της διαδικασίας επίλυσης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας ενός προτύπου εδαφικού πρανούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα με το λογισμικό πακέτο Plaxis, ακολουθούν κάποιες πιο σύνθετες επιλύσεις εδαφικών προτύπων για την εξέταση της επίδρασης επιπλέον παραγόντων στην ευστάθεια ενός πρανούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ**

Μετά την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 6 για εδαφικά πρηνή ψαμμίτη παρουσία λεπτού στρώματος αργίλου και αφού καθορίστηκε η διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας με το Plaxis σχεδιάστηκαν και επιλύθηκαν κάποια πιο σύνθετα πρότυπα με βάση τα ήδη υπάρχοντα.

Μέρος από τα νέα πρότυπα σχεδιάστηκαν με τη χρήση στοιχείων διεπιφανειών στα όρια μεταξύ των εδαφικών στρωμάτων έτσι ώστε να υπάρχει μια ζώνη μετάβασης από το ένα υλικό στο άλλο με αντίστοιχη μετάβαση από τις τιμές των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του ενός υλικού στο άλλο. Ειδικότερα τα πρότυπα που σχεδιάστηκαν ομαδοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

- ✓ Σε εκείνα στα οποία το στρώμα της αργίλου αντικαταστάθηκε από στοιχεία διεπιφάνειας.
- ✓ Σε εκείνα στα οποία τα όρια του στρώματος της αργίλου αντικαταστάθηκαν από στοιχεία διεπιφάνειας.
- ✓ Σε εκείνα στα οποία χρησιμοποιήθηκε η επιλογή της αυξανόμενης συνοχής και του αυξανόμενου μέτρου ελαστικότητας των υλικών με το βάθος.
- ✓ Σε εκείνα στα οποία σχεδιάστηκαν πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου παράλληλα μεταξύ τους.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά τα πρότυπα που επιλύθηκαν και δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση με βάση

μόνο τις καμπύλες του Plaxis. Επίσης γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης με αντίστοιχα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης. Όσον αφορά τον τύπο των προτύπων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ για τη διακριτοποίηση των προτύπων χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία.

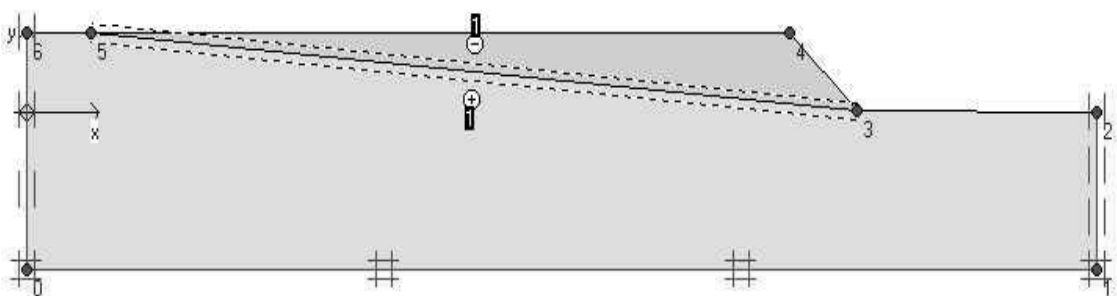
7.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΤΙ ΛΕΠΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΡΓΙΛΟΥ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποια πρότυπα στα οποία το λεπτό στρώμα αργίλου έχει αντικατασταθεί από στοιχεία διεπιφάνειας (κατά Plaxis οριζόμενη). Η γεωμετρία των προτύπων αυτών όσο αφορά τις εξωτερικές τους διαστάσεις είναι ίδια με αυτή των προτύπων της παραμετρικής ανάλυσης.

7.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ I^Η

Στην περίπτωση που εξετάζεται σχεδιάστηκε το πρότυπο του Σχήματος 7.1. Το στρώμα της αργίλου απουσιάζει και στη θέση του σχεδιάστηκε μια διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων ψαμμίτη. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η επιλογή του πάχους της ζώνης επιρροής της διεπιφάνειας είναι απενεργοποιημένη, λόγω του ότι χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που επιλέγεται το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους, ως μοντέλο συμπεριφοράς του υλικού, με αποτέλεσμα να μην δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να το μεταβάλλει. Η κλίση της διεπιφάνειας στην πρώτη αυτή περίπτωση είναι 5° και η διεπιφάνεια καταλήγει στο πόδι του πρανούς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1.

Ο σχεδιασμός της διεπιφάνειας γίνεται είτε εκατέρωθεν της γεωμετρικής γραμμής που την ορίζει ή από τη μια πλευρά αυτής. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, η διεπιφάνεια σχεδιάστηκε εκατέρωθεν της ευθείας που την ορίζει πράγμα που σημαίνει ότι επηρεάζονται και τα δύο εδαφικά στρώματα από τη μείωση των παραμέτρων αντοχής που αυτή προκαλεί στα όριά τους. Για το πρότυπο αυτό ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής έχει τιμή $R_{inter} = 0,7$.



Σχήμα 7.1: Γεωμετρία του πρώτου σύνθετου προτύπου.

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο σύνολο των προτύπων είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στην παραμετρική ανάλυση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα διέρχεται από τη βάση του πρανούς και είναι παράλληλο με το κάτω όριο του προτύπου. Για την επίλυση του προτύπου έγιναν οι ρυθμίσεις της υπολογιστικής διαδικασίας όπως αυτή είχε πραγματοποιηθεί και στην παραμετρική ανάλυση. Ορίστηκαν δηλαδή τρεις φάσεις υπολογισμών με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 7.1.

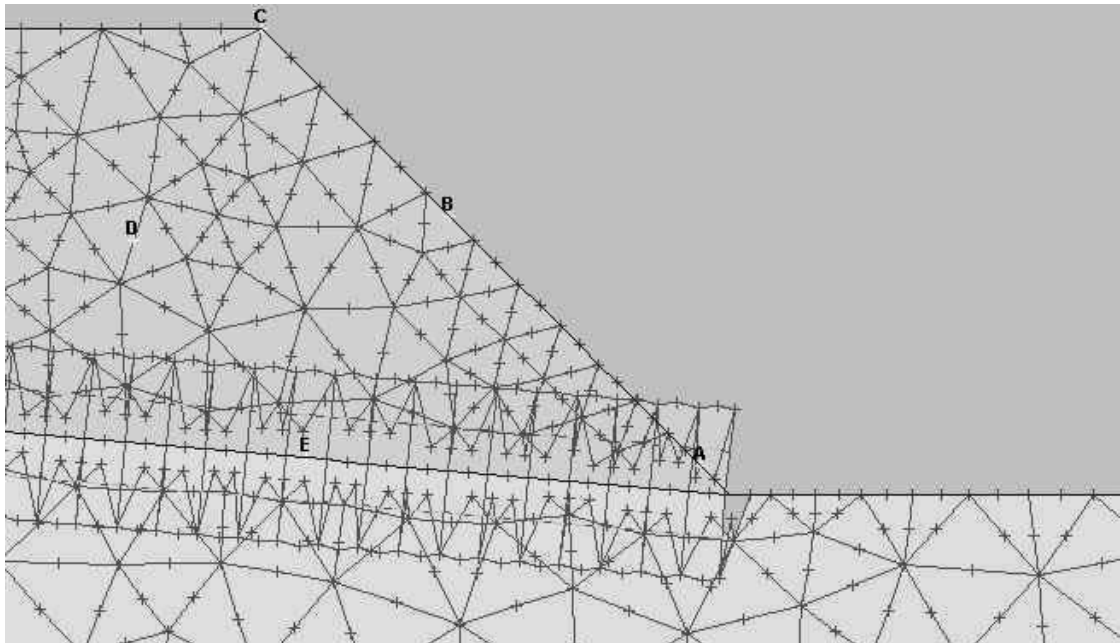
Πίνακας 7.1: Παράμετροι υπολογισμών για την πρώτη περίπτωση επίλυσης σύνθετου προτύπου.

Ρυθμίσεις υπολογισμών	Φάση 1	Φάση 2	Φάση 3
Τύπος υπολογισμών	Ανάλυση πλαστικότητας του προτύπου	Ανάλυση πλαστικότητας του προτύπου	Ανάλυση πλαστικότητας του προτύπου
	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης
Παράμετροι ελέγχου	Επιπλέον βήματα υπολογισμών: 100	Επιπλέον βήματα υπολογισμών: 100	Επιπλέον βήματα υπολογισμών: 30
	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Μηδενισμός παραμορφώσεων προηγούμενης φάσης
Επαναληπτική διαδικασία	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις
Ρυθμίσεις φόρτισης	Ολικοί Πολλαπλασιαστές	Σταδιακή κατασκευή	Σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής
	ΣMweight = 1		Πολλαπλασιαστής Msf = 0.1

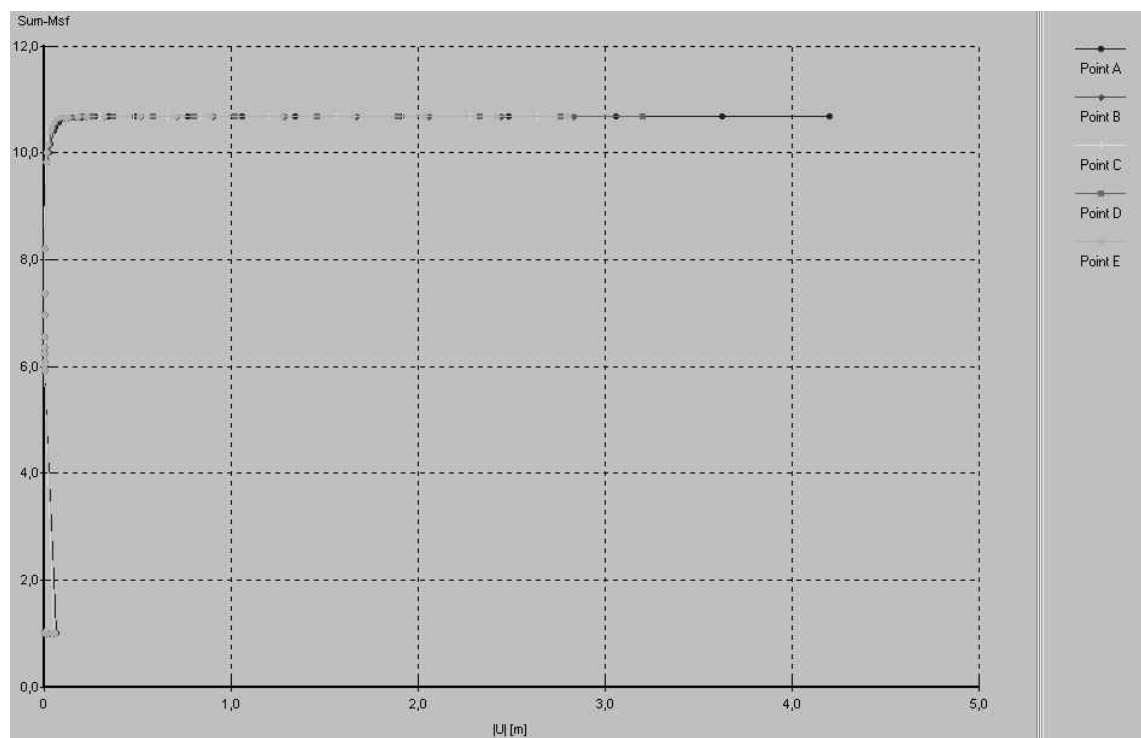
Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7.1, η μόνη διαφοροποίηση από τα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης είναι ότι τα επιπλέον βήματα υπολογισμού στην τρίτη φάση επίλυσης είναι 30 έναντι 25 που ήταν στην πλειοψηφία των προτύπων που σχεδιάστηκαν για την παραμετρική ανάλυση. Μετά τον ορισμό των φάσεων επίλυσης επιλέγονται τα σημεία για τα οποία σχεδιάζονται οι καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Με βάση τα παραπάνω και έπειτα από την επιτυχή επίλυση του προτύπου προέκυψαν τελικά οι καμπύλες του Σχήματος 7.3.

Όπως είναι φανερό, ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς που σχεδιάστηκε, για το μέγιστο και την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης είναι:

$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
10,686	10,673



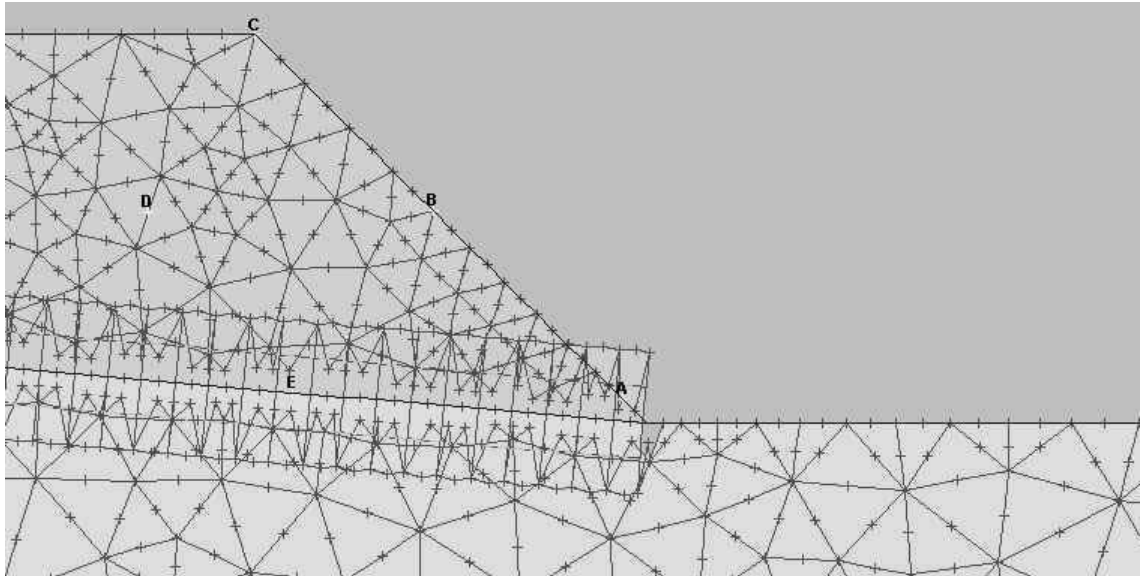
Σχήμα 7.2: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 1^η περίπτωση επίλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 7.3: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της 1^{ης} περίπτωσης επίλυσης.

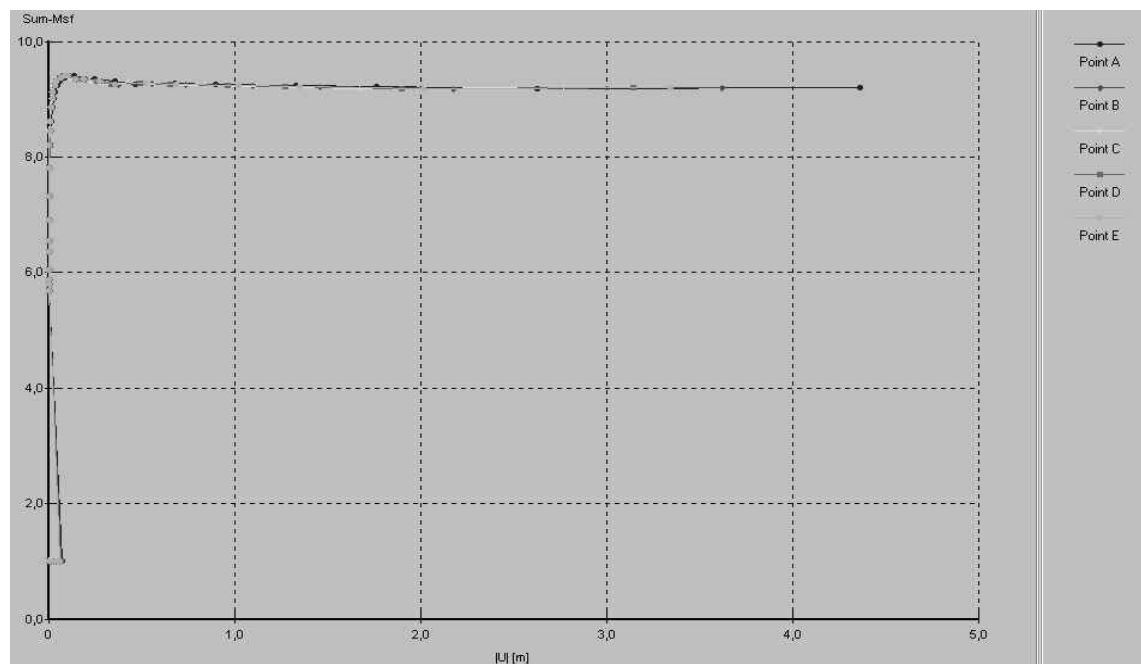
7.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η

Στη δεύτερη περίπτωση σχεδιάστηκε το ίδιο ακριβώς με το παραπάνω πρότυπο, μόνο που ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής της διεπιφάνειας ορίστηκε ίσος με $R_{inter} = 0,5$. Αυτό έγινε κυρίως για τον έλεγχο του κατά πόσο επηρεάζει η μείωση του



Σχήμα 7.4: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 2^η περίπτωση επίλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).

συντελεστή R_{inter} την ευστάθεια του εκάστοτε εδαφικού πρανούς. Στο Σχήμα 7.4 φαίνονται τα σημεία που προεπιλέχτηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών και στο Σχήμα 7.5 φαίνονται οι καμπύλες που προέκυψαν για τα σημεία αυτά μετά την επίλυση.



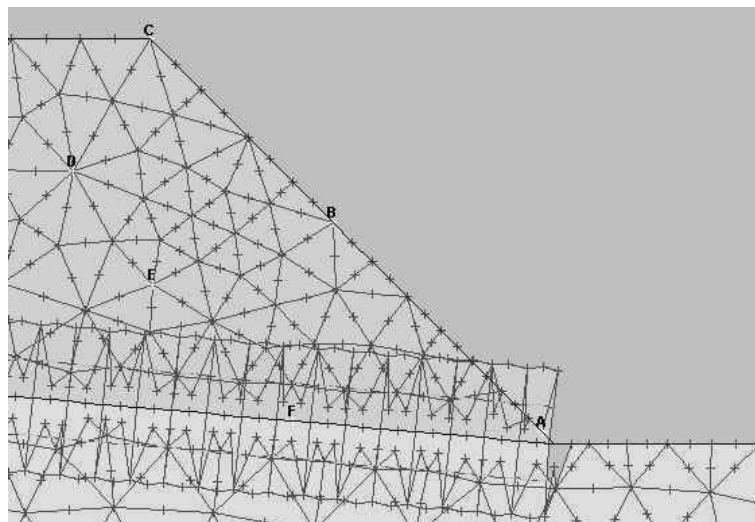
Σχήμα 7.5: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της 2^{ης} περίπτωσης επίλυσης.

Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς που σχεδιάστηκε, για το μέγιστο και την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης είναι:

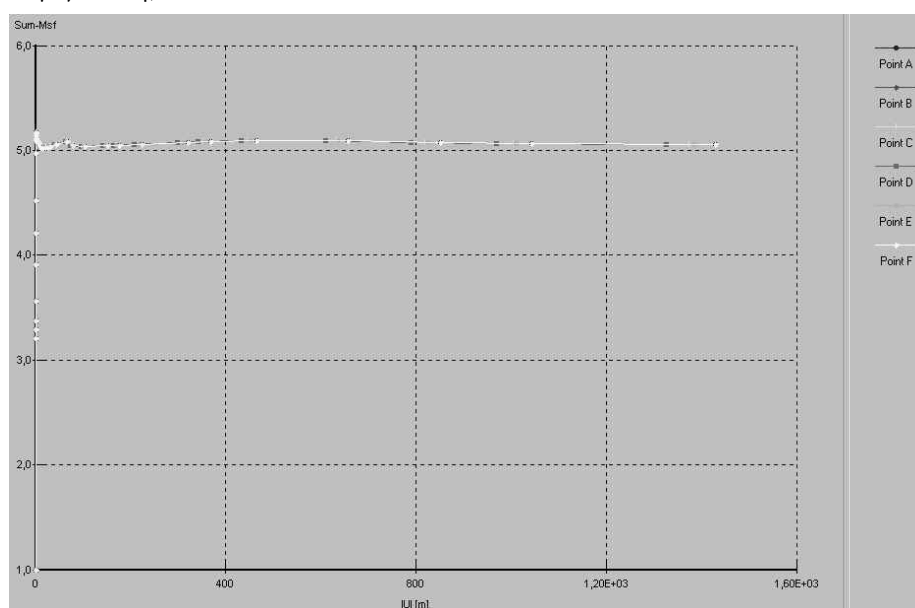
$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
9,414	9,173

7.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3^η

Στην τρίτη περίπτωση σχεδιάστηκε το ίδιο ακριβώς με το παραπάνω πρότυπο, μόνο που ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής της διεπιφάνειας ορίστηκε ίσος με $R_{inter} = 0,15$ και τα επιπλέον βήματα υπολογισμού για την 3^η φάση έγιναν 40. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται η περίπτωση στην οποία στο πρανές υπήρχε η παρουσία του λεπτού στρώματος της αργίλου με συνοχή $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, στα Σχήματα 7.6 και 7.7 φαίνονται τα σημεία που προεπιλέχθηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών και οι καμπύλες που προέκυψαν για τα σημεία αυτά μετά την επίλυση.



Σχήμα 7.6: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 3^η περίπτωση επίλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



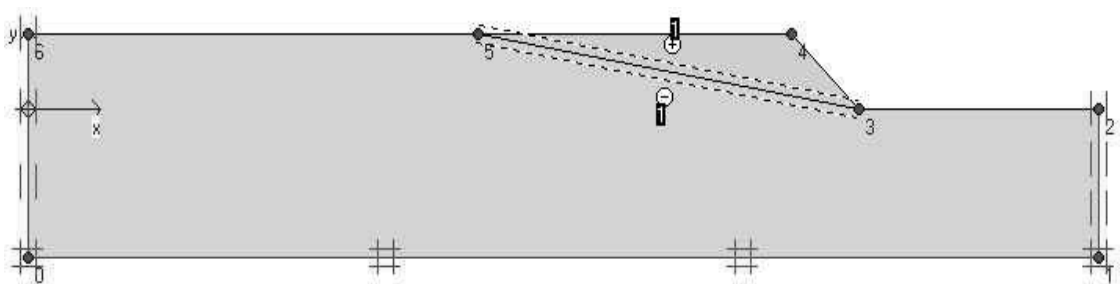
Σχήμα 7.7: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της 3^{ης} περίπτωσης επίλυσης.

Ο συντελεστής ασφάλειας του πρανού που σχεδιάστηκε είναι:

$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
5,171	5,068

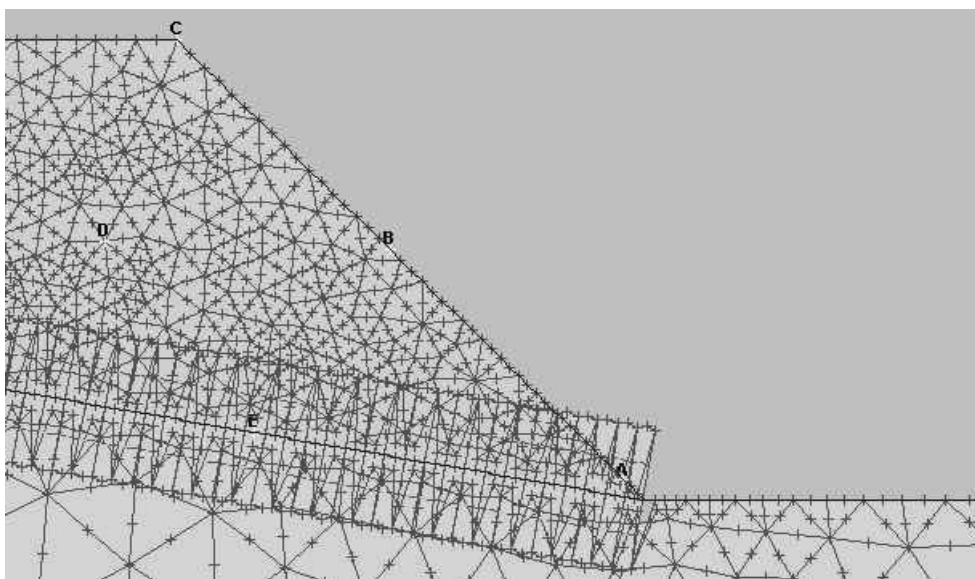
7.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4^η

Στα προηγούμενα τρία πρότυπα που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της επιλογής της διεπιφάνειας, η κλίση αυτής ήταν 5°. Στο πρότυπο αυτό, η κλίση αυτή μεγαλώνει και γίνεται ίση με 10°. Το γεωμετρικό πρότυπο του εδαφικού πρανού είναι αυτό του Σχήματος 7.8.

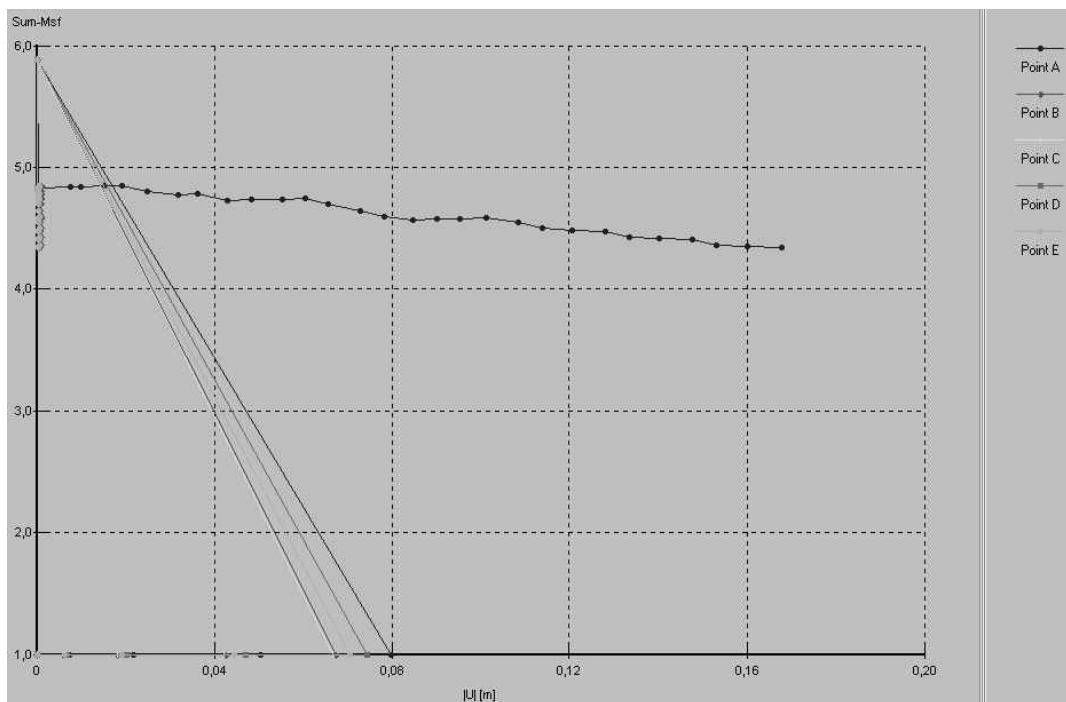


Σχήμα 7.8: Γεωμετρία του προτύπου της 4ης περίπτωσης.

Ο συντελεστής R_{inter} είναι ίσος με 0,5, ενώ τα επιπλέον βήματα υπολογισμών είναι 30. Παρόλο που η επίλυση φαίνεται να ολοκληρώνεται με επιτυχία στην περίπτωση αυτή, η μορφή των καμπυλών που προκύπτουν για τα προεπιλεγμένα σημεία του Σχήματος 7.9 δεν ακολουθεί τη τυπική μορφή καμπύλης για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας του εδαφικού πρανού. Οι καμπύλες που προέκυψαν για την περίπτωση



Σχήμα 7.9: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 4η περίπτωση επίλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



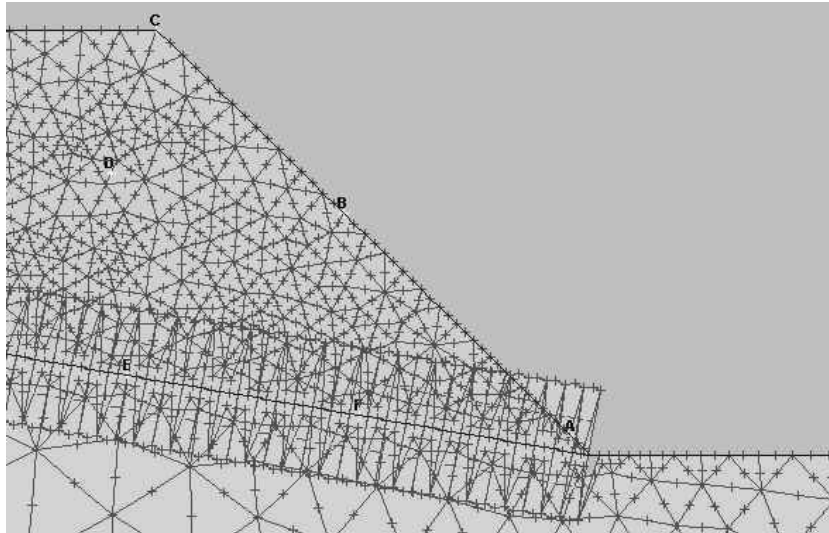
Σχήμα 7.10: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της 4^{ης} περίπτωσης επίλυσης.

αυτή είναι αυτές του Σχήματος 7.10 όπου φαίνεται χαρακτηριστικά ότι δεν υπάρχει περιοχή επιπέδωσης από όπου προσδιορίζεται ο συντελεστής ασφάλειας.

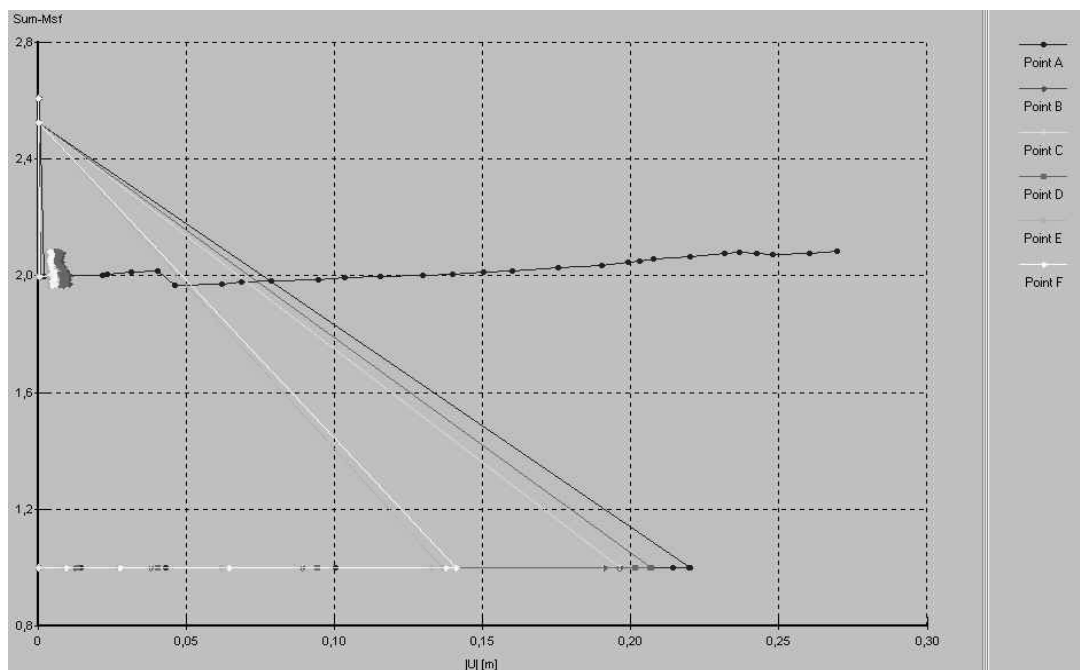
7.1.5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5^η

Το πρότυπο αυτό αναφέρεται σε πρανές με κλίση διεπιφάνειας 10° όπως και παραπάνω, αλλά με συντελεστή $R_{inter} = 0,15$. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται η περίπτωση στην οποία στη θέση της διεπιφάνειας του πρανούς υπήρχε το λεπτό στρώμα αργίλου με συνοχή $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Όσο αφορά τη διαδικασία υπολογισμών, η διαφοροποίηση των ρυθμίσεων που έγιναν κατά την επίλυση όλων των προηγούμενων προτύπων έγκειται στη μείωση του ανεκτού σφάλματος στην 1^η φάση υπολογισμών σε 0,025 από 0,030 που είναι η προεπιλεγμένη ρύθμιση του προγράμματος και χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο σχεδόν της παραμετρικής ανάλυσης. Στο Σχήμα 7.11 φαίνονται τα σημεία που προεπιλέχτηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών $\Sigma Msf - |u|$ του Σχήματος 7.12.

Όπως και στην 4^η περίπτωση, η μορφή της καμπύλης προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα σημεία που προεπιλέχτηκαν, δεν ακολουθεί την τυπική διαδρομή όπως αυτή ορίστηκε από τους Brinkgreve and Bakker, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφάλειας για την συγκεκριμένη περίπτωση. Η καμπύλη παρουσιάζει ένα μέγιστο και από εκεί και πέρα έχει μια καθοδική πορεία



Σχήμα 7.11: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 5^η περίπτωση επίλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 7.12: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της 5^{ης} περίπτωσης επίλυσης.

χωρίς τάση επιπέδωσης, περιοχή από την οποία σε κανονικές συνθήκες υπολογίζεται και ο συντελεστής ασφάλειας. Το ΣΜsf(peak) που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης είναι ίσο με 2,605.

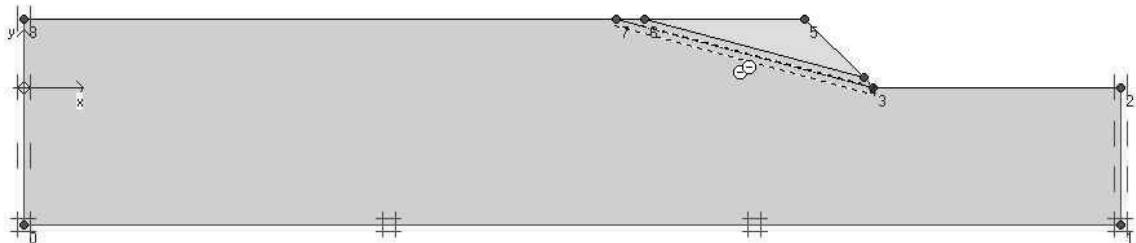
7.1.6 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6^η

Στην τελευταία αυτή περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η επιλογή της διεπιφάνειας σε αντικατάσταση του λεπτού εδαφικού στρώματος της αργίλου, χρησιμοποιήθηκε εδαφικό πρότυπο με διεπιφάνεια κλίσης 15°. Ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων

αντοχής τέθηκε ίσος με $R_{inter} = 0,80$, ενώ ορίστηκαν 30 επιπλέον βήματα υπολογισμών. Στην περίπτωση αυτή η επίλυση του προτύπου έδωσε τις καμπύλες που φαίνονται στο παράρτημα οι οποίες δεν δίνουν συμπεράσματα για το συντελεστή ασφάλειας δεδομένου ότι δεν ακολουθούν την τυπική μορφή.

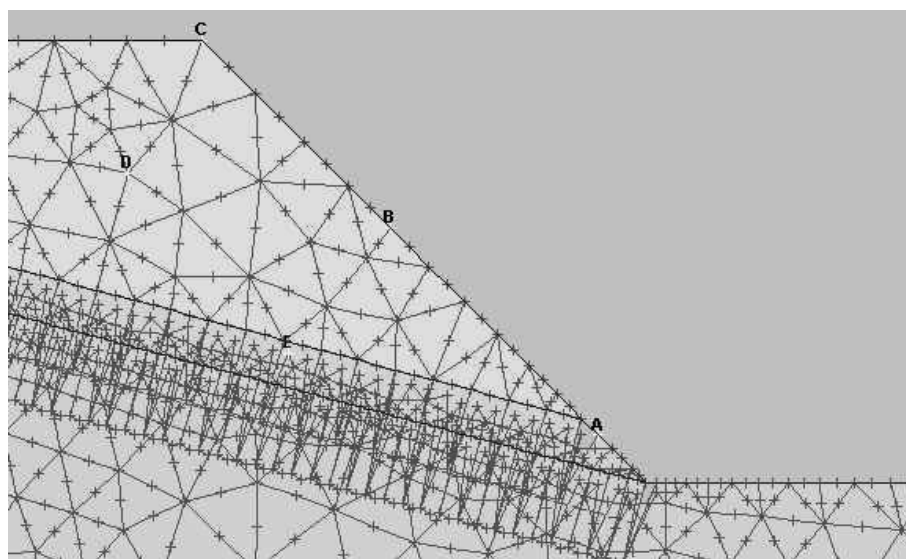
7.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΠΟΥ ΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΑΝ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο με στρώμα αργίλου πάχους 1,25 m, κλίσης 15° , και συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Η διεπιφάνεια χρησιμοποιήθηκε στα όρια του στρώματος της αργίλου και στην κάτω πλευρά αυτών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.13.

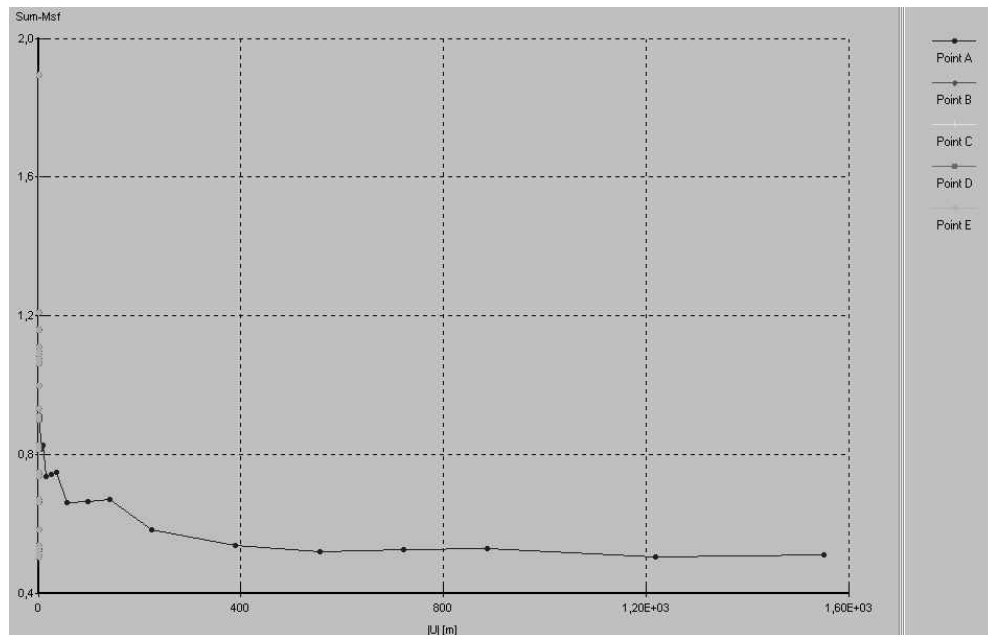


Σχήμα 7.13: Γεωμετρία του προτύπου της περίπτωσης εισαγωγής διεπιφανειών στα όρια του στρώματος της αργίλου.

Ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής τέθηκε ίσος με $R_{inter} = 0.8$. Τα σημεία που προεπιλέχτηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών είναι αυτά του Σχήματος 7.14 και οι καμπύλες που προέκυψαν απεικονίζονται στο Σχήμα 7.15.



Σχήμα 7.14: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την περίπτωση επίλυσης προτύπου με εισαγωγή διεπιφανειών στα όρια του στρώματος της αργίλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 7.15: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της δεδομένης περίπτωσης επίλυσης.

Όπως φαίνεται και από τις σχετικές καμπύλες, ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφάλειας στην περίπτωση αυτή γίνεται με βάση το μέγιστο για τις καμπύλες των σημείων B, C, D, και E και την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης του σημείου A εφόσον δεν διακρίνεται κάποια περιοχή επιπέδωσης στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα σημεία. Για το πρότυπο που επιλύθηκε λοιπόν και με βάση τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν, η τιμή του συντελεστή ΣMsf είναι:

ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)
1,894	0,506

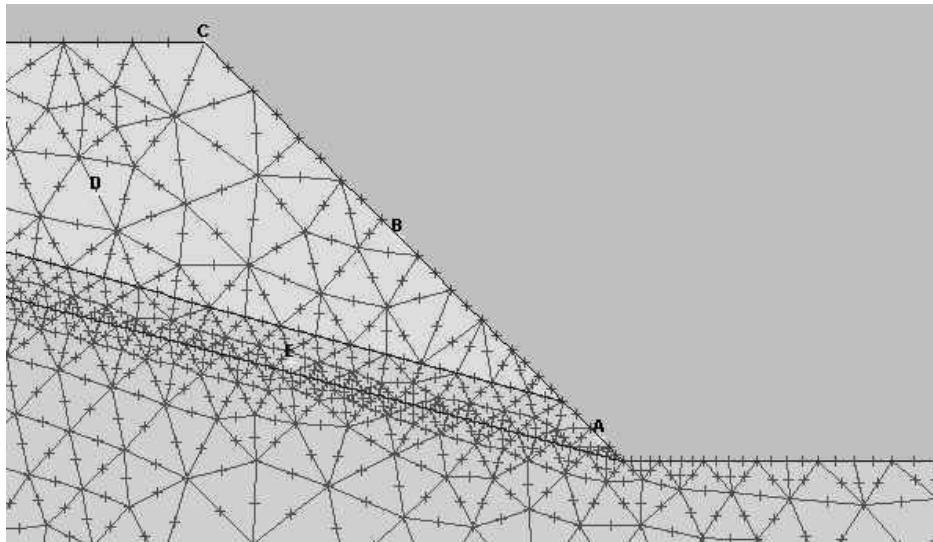
7.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΌΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΣΥΝΟΧΗ & ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ

Στην κατηγορία αυτή επιλύθηκαν δύο πρότυπα με τη χρήση της αυξανόμενης συνοχής και του αυξανόμενου μέτρου ελαστικότητας των υλικών με το βάθος. Η αύξηση αυτή προσομοιάζει καλύτερα τη φύση, δεδομένου ότι αυξανόμενου του βάθους για το ίδιο υλικό, αυξάνονται και οι παράμετροι αντοχής του.

7.3.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η

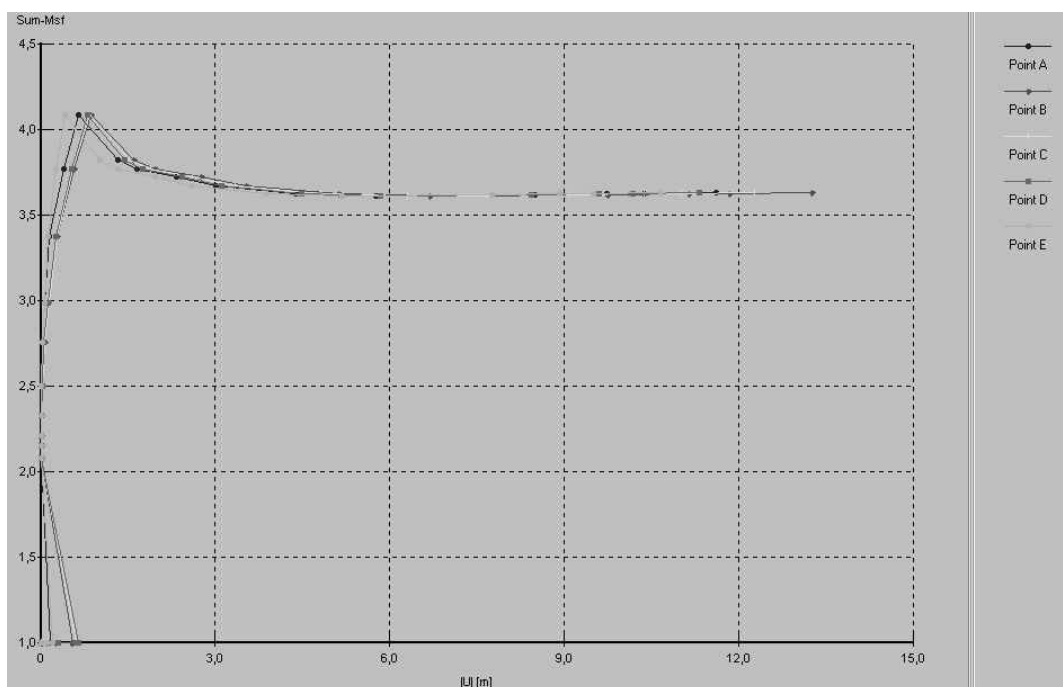
Η γεωμετρία του προτύπου που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση αυτή είναι:

- ✓ Πάχος στρώματος αργίλου: 2,5 m
- ✓ Κλίση στρώματος αργίλου: 10°
- ✓ Συνοχή αργίλου: 150 kN/m²



Σχήμα 7.16: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την περίπτωση επίλυσης προτύπου με σταδιακή αύξηση της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας (σχήμα σε μεγέθυνση).

Οι ιδιότητες των εδαφικών στρωμάτων του ψαμμίτη είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και κατά την παραμετρική ανάλυση, με τη διαφορά ότι στον υποκείμενο ψαμμίτη εφαρμόστηκε η σταδιακή αύξηση της συνοχής με $c_{\text{increment}} = 0,5 \text{ kN/m}^2/\text{m}$ και η σταδιακή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με $E_{\text{increment}} = 2,0 \text{ kN/m}^2/\text{m}$. Τα σημεία που επιλέχθηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών είναι αυτά του Σχήματος 7.16, ενώ οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν φαίνονται στο Σχήμα 7.17.



Σχήμα 7.17: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της δεδομένης περίπτωσης επίλυσης.

Με βάση τα παραπάνω και δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή η μορφή των καμπυλών είναι η τυπική για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας τιμών για το συντελεστή ασφάλειας από το μέγιστο και την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης:

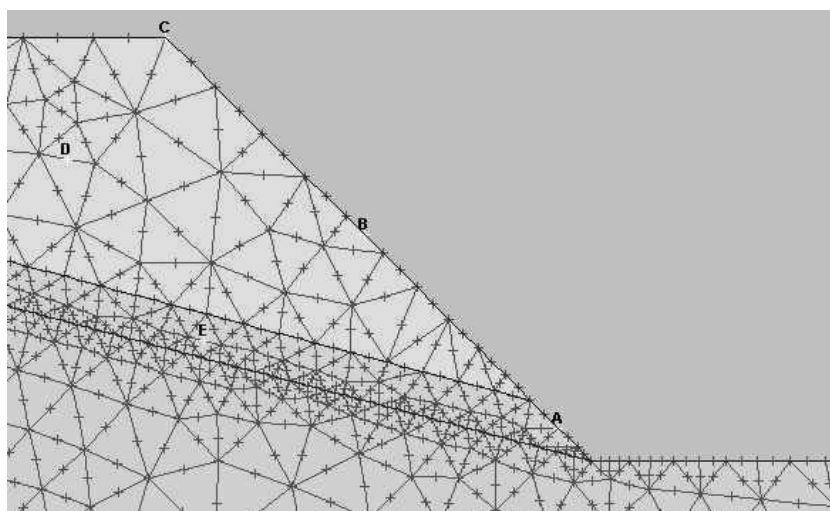
$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
4,080	3,619

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή για την επίλυση του προτύπου έγιναν κάποιες αλλαγές στις ρυθμίσεις υπολογισμών. Ειδικότερα, στη 2^η φάση αυξήθηκε το ανεκτό σφάλμα σε 0,040 και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ορίστηκε σε 60. Ακόμη, στην 3^η φάση υπολογισμών τα επιπλέον βήματα μειώθηκαν σε 20 από 25 που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση.

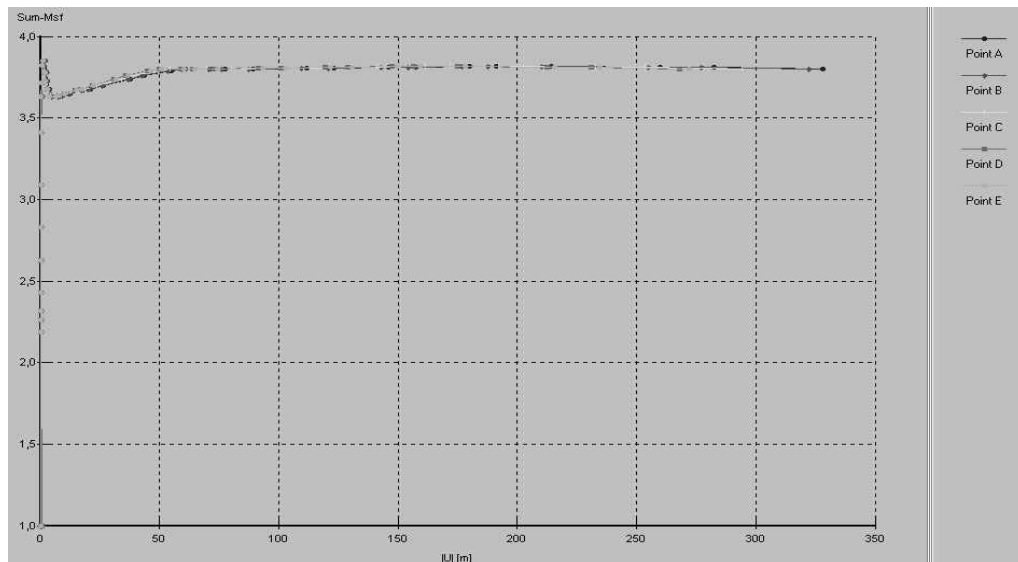
7.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η

Στην περίπτωση αυτή, η γεωμετρία του προτύπου που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με αυτή που αναφέρθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα. Οι ιδιότητες των εδαφικών στρωμάτων του προτύπου είναι επίσης αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση, με τη διαφορά ότι στο σύνολο των εδαφικών υλικών εφαρμόστηκε η σταδιακή αύξηση της συνοχής με $c_{\text{increment}} = 0,5 \text{ kN/m}^2/\text{m}$ και η σταδιακή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με $E_{\text{increment}} = 2,0 \text{ kN/m}^2/\text{m}$.

Στο Σχήμα 7.18 φαίνονται τα σημεία που επιλέχθηκαν για το σχεδιασμό των καμπυλών ενώ στο Σχήμα 7.19 φαίνονται οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν.



Σχήμα 7.18: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 2^η περίπτωση επίλυσης προτύπου με σταδιακή αύξηση της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 7.19: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της δεδομένης περίπτωσης επίλυσης.

Στην περίπτωση αυτή για την επίλυση του προτύπου έγιναν επίσης οι αλλαγές στις ρυθμίσεις υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και στην προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι στην 3^η φάση υπολογισμών τα επιπλέον βήματα αυξήθηκαν σε 40 από 25 που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση.

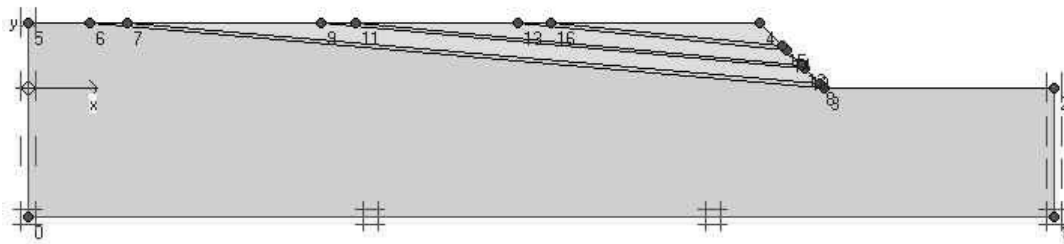
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας τιμών για το συντελεστή ασφάλειας από το μέγιστο και την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης:

$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
3,851	3,803

7.4 ΕΛΑΦΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΛΕΠΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ.

Στο σημείο αυτό εξετάζονται δύο περιπτώσεις εδαφικών πρανών στα οποία υπάρχει παρουσία τριών παράλληλων στρωμάτων αργίλου. Με αυτό τον τρόπο έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης κοιτασμάτων του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου (Λ.Κ.Π.-Α.), στα οποία εμφανίζονται διαδοχικές ενστρώσεις αργιλικού υλικού μεταξύ των στρωμάτων λιγνίτη και δημιουργούν πολλές φορές πρόβλημα ευστάθειας των πρανών της εκμετάλλευσης.

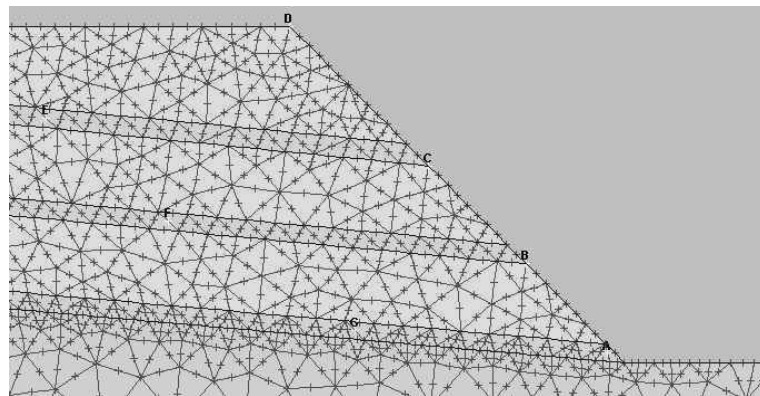
Η γεωμετρία των προτύπων αυτών απεικονίζεται στο Σχήμα 7.20. Η κλίση των στρωμάτων αργίλου είναι 5° ενώ το πάχος τους είναι 1,25 m. Το κατώτερο στρώμα αργίλου καταλήγει στο πόδι του εδαφικού πρανούς.



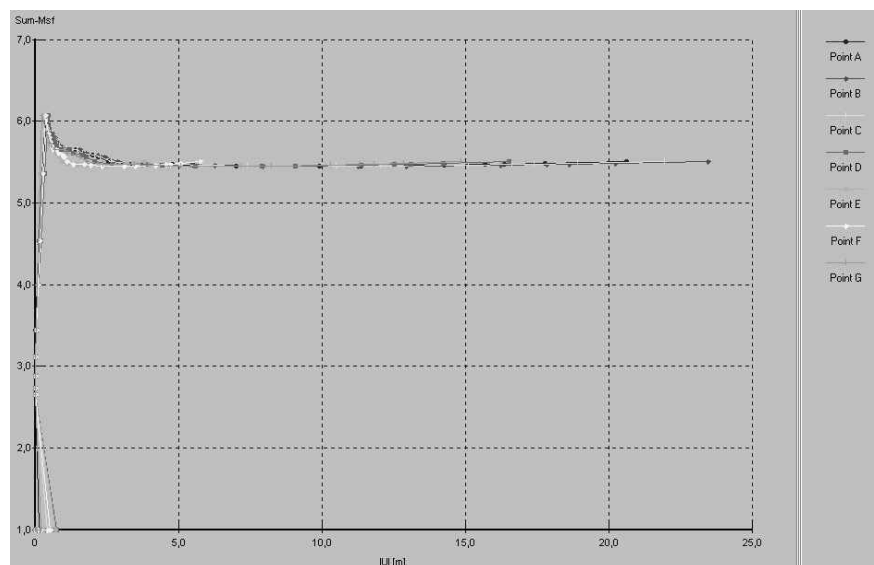
Σχήμα 7.20: Γεωμετρία του προτύπου πολλαπλών στρωμάτων αργίλου.

7.4.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η

Στην 1^η περίπτωση επίλυσης προτύπου παρουσία πολλαπλών λεπτών στρωμάτων αργίλου η συνοχή τους ορίστηκε ίση με $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Όπως και σε κάποιες από τις προηγούμενες περιπτώσεις επίλυσης, αυτό έγινε για λόγους σύγκρισης με τα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης. Όσο αφορά τις ρυθμίσεις υπολογισμών, στην 3^η φάση έγιναν 30 επιπλέον βήματα. Στο Σχήμα 7.21 φαίνονται τα επιλεγμένα σημεία για την εξαγωγή καμπυλών. Στο Σχήμα 7.22 φαίνονται οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν για τα



Σχήμα 7.21: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 1^η περίπτωση επίλυσης προτύπου με πολλαπλά στρώματα αργίλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



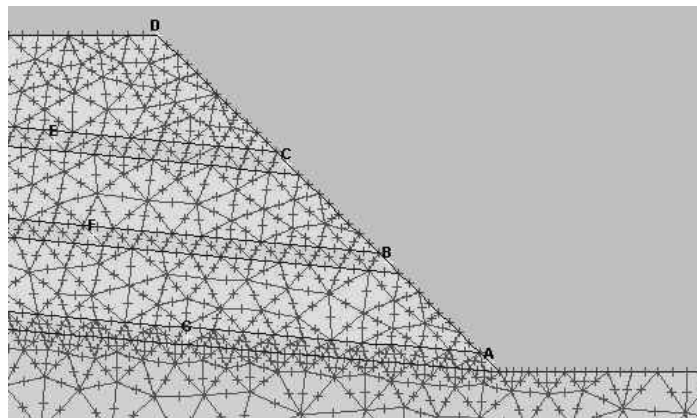
Σχήμα 7.22: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της δεδομένης περίπτωσης επίλυσης.

προεπιλεγμένα σημεία ενώ στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίστηκαν για την περίπτωση αυτή.

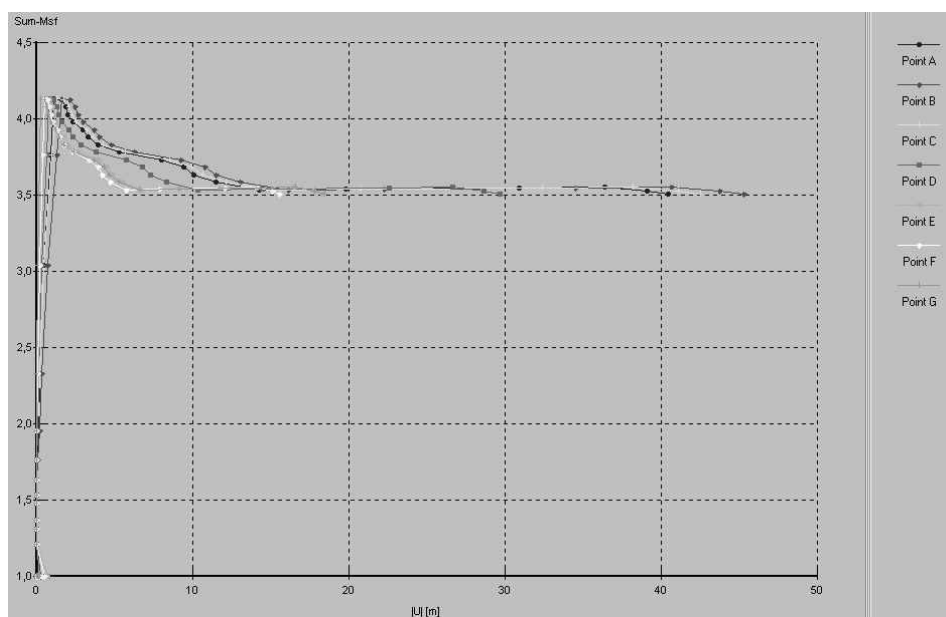
$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
6,071	5,568

7.4.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η

Στην 2^η περίπτωση επίλυσης προτύπου με πολλαπλά λεπτά εδαφικά στρώματα αργίλου η συνοχή ορίστηκε ίση με $c = 50 \text{ kN/m}^2$. Όσο αφορά τις ρυθμίσεις υπολογισμών, αυτές είναι ίδιες με της προηγούμενης περίπτωσης. Στο Σχήμα 7.23 φαίνονται τα επιλεγμένα σημεία για την εξαγωγή καμπυλών ενώ στο Σχήμα 7.24 φαίνονται οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν για τα προεπιλεγμένα σημεία.



Σχήμα 7.23: Επιλεγμένα σημεία για το σχεδιασμό καμπυλών για την 2^η περίπτωση επίλυσης προτύπου με πολλαπλά στρώματα αργίλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 7.24: Καμπύλες προσδιορισμού του συντελεστή ασφάλειας για τα προεπιλεγμένα σημεία της δεδομένης περίπτωσης επίλυσης.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίστηκαν για την περίπτωση αυτή.

$\Sigma Msf (peak)$	$\Sigma Msf (stable)$
4,127	3,545

7.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα πρότυπα που επιλύθηκαν και αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο, μπορούν να συγκριθούν όσο αφορά τα αποτελέσματα με τα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 6 και να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για τη χρήση και τη λειτουργία του λογισμικού πακέτου Plaxis. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από το σύνολο των επιλύσεων των σύνθετων προτύπων που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο αυτό, ενώ ακολουθεί σχολιασμός των διαφόρων περιπτώσεων επίλυσης.

Ειδικότερα, τα πρότυπα στα οποία το λεπτό στρώμα αργίλου αντικαταστάθηκε με διεπιφάνεια με συντελεστή $R_{inter} = 0,15$, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης στα οποία το στρώμα της αργίλου είχε μικρό πάχος (1,25 m) και συνοχή $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

Με βάση τον Πίνακα 7.3, είναι φανερό ότι η διεπιφάνεια λειτουργεί σαν ασθενέστερη ζώνη μέσα στο εδαφικό πρανές από ότι το λεπτό στρώμα αργίλου. Το γεγονός αυτό προκύπτει από τη σύγκριση και των δύο συντελεστών ασφάλειας ($\Sigma Msf(peak)$ και $\Sigma Msf(stable)$) για τις δύο περιπτώσεις κλίσεων.

Ειδικότερα για την κλίση της διεπιφάνειας 10° , η επίλυση του προτύπου δεν έδωσε χαρακτηριστική καμπύλη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του $\Sigma Msf(stable)$. Όσο αφορά τον συντελεστή $\Sigma Msf(peak)$, η τιμή του είναι πολύ χαμηλότερη από ότι στην περίπτωση που στη θέση της διεπιφάνειας βρισκόταν το λεπτό στρώμα αργίλου. Άρα η χρήση της διεπιφάνειας δίνει ασθενέστερες ιδιότητες στο εδαφικό πρανές από ότι ένα λεπτό στρώμα υλικού με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.

Στην περίπτωση των προτύπων που ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής της διεπιφάνειας R_{inter} είναι ίσος με 0,7 ή 0,5, όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής ασφάλειας των εδαφικών πρανών που σχεδιάστηκαν ήταν πολύ υψηλότερος από αυτών

οποιασδήποτε περίπτωσης της παραμετρικής ανάλυσης. Στον Πίνακα 7.4 φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των επιλύσεων σε όσα πρότυπα ολοκληρώθηκε η επίλυση και προέκυψε αποτέλεσμα.

Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις επιλύσεις των σύνθετων προτύπων.

Περίπτωση	Χαρακτηριστικά	ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)
Πρότυπα με διεπιφάνεια αντί λεπτού στρώματος αργίλου	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,7$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	10,686	10,673
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,5$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	9,414	9,173
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,15$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 40	5,171	5,068
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,5$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	5,881	x
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,15$ Φάση 1: Ανεκτό σφάλμα = 0,025 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	2,605	x
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,7$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	x	x
Πρότυπο όπου τα όρια του στρώματος αργίλου αντικαταστάθηκαν με διεπιφάνεια	Διεπιφάνεια στο πάνω και στο κάτω όριο του στρώματος της αργίλου με $R_{inter} = 0,8$ και για τις δύο περιπτώσεις. Μόνο αρνητική διεπιφάνεια.	0,506	
Πρότυπα με αυξανόμενη συνοχή και μέτρο ελαστικότητας των υλικών με το βάθος	Εφαρμογή του $E_{increment} = 2kN/m^2/m$ και $c_{increment} = 0,5kN/m^2/m$ για τον ψαμμίτη 2 από το ανώτερο μέχρι το κατώτερο σημείο του προτύπου και $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο με πάχος 2,5m. Φάση 2: Ανεκτό σφάλμα = 0,04, Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 20	4,080	3,619
	Εφαρμογή του $E_{increment} = 2kN/m^2/m$ και $c_{increment} = 0,5kN/m^2/m$ για το σύνολο των υλικών από το ανώτερο μέχρι το κατώτερο σημείο του προτύπου και $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο με πάχος 2,5m. Φάση 2: Ανεκτό σφάλμα = 0,04, Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 40	3,851	3,803
Πρότυπα με πολλαπλά στρώματα αργίλου παράλληλα μεταξύ τους	Πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου με πάχος περίπου 1,25m και ιδιότητες προτύπων με $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο. Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	6,071	5,568
	Πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου με πάχος περίπου 1,25m και ιδιότητες προτύπων με $c = 50kN/m^2$ για την άργιλο. Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	4,127	3,545

Πίνακας 7.3: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και διεπιφάνεια με $R_{\text{inter}} = 0,15$ αντίστοιχα.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας			
			Λεπτό στρώμα αργίλου		Διεπιφάνεια	
			$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$
5°	150	1,25	6,777	6,739	5,171	5,068
10°	150	1,25	5,186	5,041	2,605	x

Στην περίπτωση της κλίσης στρώματος 5° υπάρχει συγκριτικό αποτέλεσμα για διεπιφάνεια με $R_{\text{inter}} = 0,7$ και $R_{\text{inter}} = 0,5$. Είναι φανερό ότι μειούμενου του συντελεστή R_{inter} μειώνεται και ο συντελεστής ασφάλειας του προτύπου εδαφικού πρανούς που εξετάζεται. Παρόλα αυτά και πάλι ο συντελεστής ΣMsf είναι μεγαλύτερος από ότι στην περίπτωση που επιλύεται το πρότυπο με το λεπτό στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$.

Πίνακας 7.4: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και διεπιφάνεια με $R_{\text{inter}} = 0,5$ και $0,7$.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας					
			Λεπτό στρώμα αργίλου		Διεπιφάνεια			
					$R_{\text{inter}} = 0,7$		$R_{\text{inter}} = 0,5$	
			$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$
5°	150	1,25	6,777	6,739	10,686	10,673	9,414	9,173
10°	150	1,25	5,186	5,041	-	-	5,881	x
15°	150	1,25	4,023	3,983	x	x	-	-

Για κλίση του στρώματος της αργίλου στις 10°, επιλύθηκε μόνο η περίπτωση με διεπιφάνεια συντελεστή $R_{\text{inter}} = 0,5$. Η επίλυση έδωσε καμπύλη που δεν ακολουθεί την τυπική μορφή με αποτέλεσμα να υπάρχει μόνο ένα μέγιστο και να μην είναι εμφανής η περιοχή επιπέδωσης. Έτσι συγκρίνεται μόνο το $\Sigma \text{Msf (peak)}$ του προτύπου με την διεπιφάνεια με το $\Sigma \text{Msf (peak)}$ του προτύπου με το λεπτό στρώμα αργίλου. Είναι φανερό ότι στην δεύτερη περίπτωση ο συντελεστής ασφάλειας είναι μικρότερος λόγω του ότι η συνοχή της αργίλου είναι μικρότερη από αυτή που προσδίδει ο συντελεστής R_{inter} στην περιοχή γύρω από τη διεπιφάνεια. Τέλος στην περίπτωση της κλίσης 15° δεν κατέστη δυνατή η επίλυση του προτύπου.

Στην περίπτωση που επιλύθηκαν τα πρότυπα με σταδιακή αύξηση της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας των εδαφικών υλικών που εμφανίζονται στο πρανές, φαίνεται ότι υπάρχει μικρή μείωση του συντελεστή ασφάλειας σε σχέση με το αρχικό πρανές που

επιλύθηκε στην παραμετρική ανάλυση. Στον Πίνακα 7.5, δίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα αυτά.

Πίνακας 7.5: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με σταδιακή αύξηση μέτρου ελαστικότητας και συνοχής των υλικών σε σχέση με το αρχικό πρανές της παραμετρικής ανάλυσης.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας					
			Απλή επίλυση		$E_{incr.}=2\text{kN/m}^2/\text{m}$, $c_{incr.}=0,5\text{kN/m}^2/\text{m}$			
					Για ψαμμίτη		Για όλα τα υλικά	
			ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)	ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)	ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)
10°	150	2,5	4,293	4,138	4,080	3,619	3,851	3,803

Στην τελευταία περίπτωση αναφέρεται η επίλυση των εδαφικών προτύπων με πολλαπλά αργιλικά στρώματα. Οι δύο επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περίπτωση αυτή συγκρίνονται με τις αντίστοιχες δύο της παραμετρικής ανάλυσης. Στον Πίνακα 7.6, φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους συντελεστής ασφάλειας των περιπτώσεων αυτών.

Πίνακας 7.6: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με πολλαπλά στρώματα αργίλου σε σχέση με τα αρχικά πρανά της παραμετρικής ανάλυσης.

Κλίση στρωμάτων αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας			
			Απλή επίλυση		Πολλαπλά στρώματα αργίλου	
			$\Sigma\text{Msf(peak)}$	$\Sigma\text{Msf(stable)}$	$\Sigma\text{Msf(peak)}$	$\Sigma\text{Msf(stable)}$
5°	150	1,25	6,777	6,739	6,071	5,568
5°	50	1,25	7,414	7,250	4,127	3,545

Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι στην περίπτωση επίλυσης με πολλαπλά στρώματα αργίλου, ο συντελεστής ασφάλειας του εδαφικού πρανούς μειώνεται αρκετά σε σχέση με αυτόν του αρχικού προτύπου της παραμετρικής ανάλυσης. Ειδικότερα στην περίπτωση της συνοχής $c = 50 \text{ kN/m}^2$ η μείωση είναι αρκετά αισθητή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι και στις δύο περιπτώσεις η θέση του στρώματος της αργίλου που επιλέχτηκε στην παραμετρική ανάλυση δεν ήταν η χειρίστη. Είναι επίσης αρκετά πιθανό να υπάρχει κάποια θέση που δεν εξετάστηκε, η οποία να οδηγεί το πρανές σε αστοχία, ειδικά στην περίπτωση που επιλέγεται η συνοχή $c = 50 \text{ kN/m}^2$.

Γενικά πρέπει να αναφερθεί ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εκτός παραμετρικής ανάλυσης θα μπορούσαν να είναι εντελώς διαφορετικές και υπάρχουν

αρκετές περιπτώσεις που δεν εξετάστηκαν. Τα πρότυπα που επιλέχτηκε να επιλυθούν σχεδιάστηκαν με αυτό τον τρόπο και αυτές τις ιδιότητες κυρίως για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης. Στο παράρτημα παρατίθενται τα σχήματα όπου φαίνονται οι κατανομές των τάσεων στη μάζα του προτύπου καθώς και οι παραμορφωμένοι κάρναβοι για όλες τις περιπτώσεις επίλυσης. Επίσης αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι επίλυσης και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ****8.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΌΣΟ ΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS**

Στην ενότητα αυτή, αναφέρονται κάποιες παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη διαδικασία προσομοίωσης στο Plaxis, όσο αφορά τη λειτουργία του προγράμματος και την επίλυση του πρότυπου και των εναλλακτικών του περιπτώσεων.

Όσο αφορά τη διαδικασία σχεδιασμού του αρχικού πρότυπου, αυτή πραγματοποιείται πολύ εύκολα, με βάση τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό λογισμικό πακέτο τύπου AutoCad. Η συγκεκριμένη έκδοση του Plaxis βέβαια (Version 7.0) έχει τη δυνατότητα επίλυσης δισδιάστατων προτύπων μόνο, επομένως ο σχεδιασμός είναι ακόμη πιο απλοϊκός από ότι είναι στην περίπτωση της νέας έκδοσης του προγράμματος που επιλύει και τρισδιάστατα πρότυπα αλλά δυστυχώς δεν είναι διαθέσιμη.

Η ιδιαιτερότητα του προγράμματος σε σχέση με άλλα προγράμματα που χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής πετρωμάτων αφορά κυρίως το γεγονός ότι το Plaxis συνυπολογίζει στην επίλυση και την επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων, που αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα επίδρασης στην ευστάθεια εδαφικών πρανών. Το Plaxis (Version 7.0) λοιπόν, αποτελεί ένα λογισμικό πακέτο επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις.

Όσο αφορά τον προσδιορισμό του συντελεστή ευστάθειας μέσω του προγράμματος αυτού, ο καθορισμός της διαδικασίας επίλυσης αποτέλεσε μια αρκετά επίπονη διαδικασία, δεδομένου ότι το εγχειρίδιο του προγράμματος δεν ήταν αρκετά

διευκρινιστικό σε αυτό τον τομέα. Η σχετική με το πρόγραμμα βιβλιογραφία όσο αφορά την επίλυση προβλημάτων ευστάθειας ήταν επίσης ελλιπής, με αποτέλεσμα να μην είναι σαφώς καθορισμένος ο τρόπος προσομοίωσης και ο καθορισμός των διαδοχικών φάσεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή ευστάθειας. Η προσπάθεια λοιπόν που έγινε στην εργασία αυτή ήταν να προσδιοριστεί σαφώς η αλληλουχία των βημάτων που θα πρέπει κανείς να πραγματοποιήσει για την επίλυση ενός γεωτεχνικού προβλήματος ευστάθειας και τον προσδιορισμό του συντελεστή ευστάθειας ενός εδαφικού πρανούς.

Μια επιπλέον παρατήρηση αφορά την επιλογή του σημείου για την εξαγωγή της καμπύλης $\Sigma M_{sf} - |u|$ από όπου υπολογίζεται τελικά ο συντελεστής ευστάθειας του εδαφικού πρανούς. Με βάση τους Brinkgreve and Bakker, (1991), η καμπύλη σχεδιάζεται για το σημείο το οποίο βρίσκεται πάνω στο φρύδι του πρανούς. Από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν όμως, φαίνεται ότι η καμπύλη αυτή παρουσιάζει ακριβώς την ίδια μορφή για αρκετά από τα υπόλοιπα σημεία τα οποία είχαν προεπιλεγεί. Διαφοροποίηση υπάρχει για το σημείο που βρίσκεται ακριβώς πάνω στο πόδι του πρανούς και για τα σημεία που βρίσκονται στα όρια του προτύπου, για τα οποία η μορφή της καμπύλης παρουσιάζει ένα ακανόνιστο σχήμα.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό για άλλη μια φορά ότι για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το Plaxis ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του, με υπολογισμούς από τις τάσεις που υπολογίζει το πρόγραμμα με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

8.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΌΣΟ ΑΦΟΡΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Η επίλυση με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας στην παρούσα εργασία, έγινε με τη μέθοδο ανάλυσης σφήνας. Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τη μέθοδο αυτή είναι το βάρος του υλικού που αποτελεί την εδαφική σφήνα, και η διατμητική αντοχή του σχηματισμού πάνω στον οποίο εδράζεται η σφήνα αυτή. Είναι φανερό ότι η επίλυση γίνεται με την απλοϊκή θεώρηση της ισορροπίας δυνάμεων, ενώ δεν συνυπολογίζονται στη διαδικασία αρκετοί από τους παράγοντες που λαμβάνει υπόψη της η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, όπως αναφέρεται και στη συνέχεια. Για το

λόγο αυτό παρατηρείται και η διαφοροποίηση στους συντελεστές ασφάλειας που προέκυψαν από την επίλυση με τις δύο αυτές διαφορετικές μεθόδους. Παρόλα αυτά όμως στις περισσότερες των περιπτώσεων παρατηρήθηκε μια καλή ταύτιση των τιμών των συντελεστών ασφάλειας που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η επίλυση με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας πραγματοποιήθηκε για τρεις διαφορετικές θέσεις της θεωρούμενης επιφάνειας ολίσθησης. Έτσι, υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση επίλυσης ο συντελεστής ασφάλειας για την επιφάνεια που διέρχεται από τη βάση του υπερκείμενου ψαμμίτη, για την επιφάνεια που διέρχεται μέσα από τη μάζα της αργίλου (από το μέσο του πάχους του εδαφικού σχηματισμού) και τέλος για την επιφάνεια που διέρχεται από τη βάση του αργιλικού σχηματισμού.

Από τις επιλύσεις αυτές, εκείνες που ανταποκρίνονται περισσότερο στον πραγματικό μηχανισμό αστοχίας ενός εδαφικού πρανούς στη μάζα του οποίου απαντάται ένας σχηματισμός με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες, είναι εκείνες για τις οποίες η επιφάνεια ολίσθησης θεωρείται ότι διέρχεται μέσα από τη μάζα της αργίλου (στο μέσο του στρώματος). Οι άλλες δύο επιλύσεις παρατίθενται κυρίως για λόγους σύγκρισης.

8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στον Πίνακα 8.1 παρατίθενται και πάλι τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των συντελεστών ασφάλειας που προέκυψαν από την επίλυση με τις ακόλουθες τρεις μεθόδους:

1. τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την εφαρμογή του Plaxis,
2. το λόγο της διατμητικής αντοχής του υλικού προς τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του από τα αποτελέσματα για τις εφαρμοζόμενες στη μάζα του μοντέλου τάσεις που προέκυψαν από το Plaxis,
3. τη μέθοδο οριακής ισορροπίας (MOI) μέσω του Excel.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, αλλά και από τη διαδικασία προσομοίωσης καθεαυτή, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή των δύο μεθόδων σε προβλήματα ευστάθειας πρανών και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτές. Έτσι, στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα συμπεράσματα που

προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ενώ στην ακόλουθη ενότητα δίνονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα από την επίλυση των σύνθετων προτύπων που πραγματοποιήθηκε με το Plaxis.

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επίλυσης με το Plaxis και την ισορροπία δυνάμεων.

Επίλυση	Πάχος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση αργίλου (°)	Συντελεστής ασφάλειας από Plaxis (ΜΠΣ και τ/τ_{sh})			Συντελεστής ασφάλειας από Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας		
				Από καμπύλη (ΜΠΣ)		FS= τ/τ_{sh}	Πάνω επιφάνεια αργίλου	Στη μάζα της αργίλου	Κάτω επιφάνεια αργίλου
				Στο μέγιστο	Στην περιοχή επιπέδωσης				
1	1.25	150	5	6.777	6.739	7.122	12.721	12.595	12.490
2	1.25	150	10	5.186	5.041	5.232	6.848	6.765	6.701
3	1.25	150	15	4.023	3.983	4.049	5.022	4.945	4.889
4	1.25	150	20	3.685	3.504	3.529	4.274	4.190	4.130
5	1.25	150	25	3.608	3.376	3.405	4.072	3.965	3.887
6	1.25	150	30	3.825	3.728	3.755	4.388	4.219	4.095
7	2.5	150	5	6.214	6.008	6.137	13.193	12.911	12.677
8	2.5	150	10	4.293	4.138	4.232	7.152	6.963	6.818
9	2.5	150	15	4.080	3.704	3.740	5.298	5.121	4.992
10	2.5	150	20	3.566	3.257	3.327	4.580	4.381	4.239
11	2.5	150	25	3.489	3.379	3.420	4.479	4.211	4.021
12	2.5	150	30	3.656	3.650	3.713	5.067	4.611	4.289
13	1.25	50	5	7.414	7.250	7.299	7.633	7.591	7.556
14	1.25	50	10	3.352	3.332	3.381	3.966	3.938	3.917
15	1.25	50	15	2.440	2.420	2.474	2.782	2.756	2.737
16	1.25	50	20	1.936	1.930	2.000	2.240	2.212	2.192
17	1.25	50	25	1.788	1.780	1.869	1.994	1.958	1.932
18	1.25	50	30	1.800	1.734	1.798	1.977	1.920	1.879
19	2.5	50	5	3.666	3.419	3.595	7.790	7.696	7.618
20	2.5	50	10	2.691	2.665	2.788	4.067	4.004	3.956
21	2.5	50	15	2.192	2.160	2.219	2.874	2.815	2.772
22	2.5	50	20	1.902	1.844	1.927	2.342	2.276	2.228
23	2.5	50	25	1.743	1.726	1.791	2.129	2.040	1.977
24	2.5	50	30	1.736	1.702	1.800	2.203	2.051	1.944

Από τις παραπάνω τιμές, προκύπτουν τα εξής, όσο αφορά την επίλυση με το Plaxis:

- ✓ Όπως είναι φανερό, η επίλυση με το Plaxis με τη μέθοδο που προτείνει το λογισμικό αλλά και με το λόγο των τάσεων, δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά μεταξύ τους. Σε ελάχιστες περιπτώσεις παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των

αποτελεσμάτων η οποία φτάνει τη μέγιστη τιμή της (0,383) στην 1^η περίπτωση επίλυσης.

- ✓ Το παραπάνω γεγονός αποτελεί μια ένδειξη του ότι η διαδικασία επίλυσης με το Plaxis και τη μέθοδο που αυτό ακολουθεί για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτό προκύπτει από το ότι είναι κοινώς αποδεκτό ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων που εφαρμόζεται στη μάζα ενός μοντέλου. Με βάση λοιπόν τις τάσεις αυτές υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς, θεωρώντας ισορροπία. Δεδομένου ότι η ταύτιση των τιμών που προέκυψαν από τη μέθοδο αυτή, με αυτές που προέκυψαν από την επίλυση με τη μέθοδο που προτείνουν οι κατασκευαστές του λογισμικού για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας είναι αρκετά ικανοποιητική, επιβεβαιώνεται τελικά η διαδικασία.
- ✓ Η μεθοδολογία λοιπόν που χρησιμοποιεί το Plaxis για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας μπορεί να φαίνεται αρχικά ότι αντιτίθεται στις συμβατικές μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών, όπως προκύπτει όμως από τα παραπάνω, μπορεί να δώσει μια αρκετά καλή ένδειξη για την ασφάλεια ενός πρανούς.

Όσο αφορά την επίλυση με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, προκύπτουν τα εξής:

- ✓ Για τις τρεις διαφορετικές επιφάνειες ολίσθησης που θεωρήθηκαν και επομένως για τις τρεις διαφορετικές ομάδες αποτελεσμάτων, παρατηρείται μια μείωση του συντελεστή ασφάλειας για όλες τις ομάδες επιλύσεων όσο η επιφάνεια ολίσθησης κατεβαίνει από το πάνω τμήμα στο κάτω του σχηματισμού της αργίλου. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, δεδομένου ότι η οριακή ισορροπία θεωρεί τη διατμητική αντοχή της επιφάνειας έδρασης της εδαφικής σφήνας και τη δύναμη ολίσθησης που είναι μια από τις συνιστώσες του βάρους της σφήνας. Η διατμητική αντοχή της επιφάνειας έδρασης λοιπόν, παραμένει η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις επίλυσης (όσο αφορά τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης), ενώ το βάρος του υπερκείμενου υλικού (της σφήνας), αυξάνεται όσο η επιφάνεια ολίσθησης θεωρείται χαμηλότερα. Έτσι, εφόσον το βάρος αυτό βρίσκεται στον παρονομαστή, είναι λογικό το πηλίκο υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας να μειώνεται με την αύξησή του.

- ✓ Μια δεύτερη παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα, είναι ότι για κάποιες περιπτώσεις για την ίδια ομάδα επιλύσεων, ενώ η κλίση του αργιλικού σχηματισμού αυξάνεται μέσα στη μάζα του πρανούς, ο συντελεστής ασφάλειας αντί να μειώνεται, όπως θα περίμενε κανείς, αυξάνεται ελαφρώς. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι αυξανόμενης της κλίσης της αργίλου (ειδικότερα για γωνίες άνω των 27° όπως προέκυψε έπειτα από επίλυση για κλίση 25° - 40° με βήμα 1°) το μέγεθος της σφήνας του υπερκείμενου ψαμμίτη μειώνεται αρκετά με αποτέλεσμα να μειώνεται και το αντίστοιχο βάρος του που τείνει να κάνει τη σφήνα να ολισθήσει.

Με βάση το ότι οι δύο διαφορετικές μεθοδολογίες (Plaxis και Excel) στις επιμέρους επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την καθεμία, έδωσαν αποτελέσματα πολύ κοντά μεταξύ τους, θα συγκριθούν τώρα τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών σαν σύνολο. Σημειώνεται ότι όσο αφορά το Plaxis τα αποτελέσματα που συγκρίνονται με αυτά της οριακής ισορροπίας αφορούν την περιοχή επιπέδωσης της καμπύλης $\Sigma M_{sf} - |u|$ (τα οποία είναι ούτως ή άλλως πολύ κοντά με τα αποτελέσματα του peak της καμπύλης αλλά και του λόγου τ/τ_{sh}), δεδομένου ότι γίνεται μια προσπάθεια αξιολόγησης της μεθόδου επίλυσης που χρησιμοποιεί το Plaxis για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Έτσι:

- ✓ Παρατηρείται μια σχετικά καλή ταύτιση των τιμών που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους στις υψηλές τιμές της κλίσης του αργιλικού στρώματος. Έτσι, και για τις δύο διαφορετικές τιμές πάχους του αργιλικού στρώματος αλλά και για τους συνδυασμούς αυτών με τη διαφορετική συνοχή, για κλίσεις 30° 25° και 20° , οι τιμές των συντελεστών ασφάλειας να είναι όχι μόνο της ίδιας τάξης μεγέθους αλλά και αρκετά κοντά με τη μέγιστη διαφορά να υπερβαίνει σε μία μόνο περίπτωση τη μονάδα, ενώ κατά μέσο όρο κυμαίνεται γύρω στη μισή μονάδα.
- ✓ Στην περίπτωση που η κλίση του αργιλικού σχηματισμού είναι 15° , υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από την μέθοδο οριακής ισορροπίας και από την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, για πάχος του στρώματος της αργίλου 1,25 m και συνοχή $c = 150 \text{ kN/m}^2$, η μέθοδος της οριακής ισορροπίας δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 4,9, ενώ το Plaxis δίνει ένα συντελεστή μια μονάδα σχεδόν μικρότερο (3,983). Για την περίπτωση που το πάχος

της αργίλου είναι 2,5 m και η συνοχή της $c = 150 \text{ kN/m}^2$, μέθοδος οριακής ισορροπίας δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 5,1, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής που προκύπτει από το Plaxis είναι αρκετά μικρότερος (3,704).

Όταν το πάχος του εδαφικού σχηματισμού της αργίλου είναι 1,25 m και η συνοχή του $c = 50 \text{ kN/m}^2$, η ταύτιση των συντελεστών ασφάλειας φαίνεται να είναι αρκετά καλύτερη, με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας να δίνει έναν συντελεστή με μέσο όρο περίπου 2,7, ενώ το Plaxis αντίστοιχα δίνει ένα συντελεστή λίγο μικρότερο (2,420). Τέλος, για πάχος αργίλου 2,5 m και συνοχή $c = 50 \text{ kN/m}^2$ ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει σε κάθε περίπτωση είναι 2,82 περίπου από την ισορροπία δυνάμεων και 2,160 από το Plaxis αντίστοιχα, διαφορά που δεν θεωρείται αρκετά μεγάλη.

- ✓ Για την περίπτωση που η κλίση του εδαφικού σχηματισμού της αργίλου είναι 10° η απόκλιση των συντελεστών ασφάλειας που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους φαίνεται να είναι μεγαλύτερη και σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή ξεπερνά τη μονάδα. Αυτό συμβαίνει ειδικότερα στην περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 και 1,25 m αντίστοιχα, αλλά και στην περίπτωση που $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της αργίλου είναι 2,5 m. Για $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και πάχος 1,25 m η ταύτιση είναι σαφώς καλύτερη με διαφορά που υπερβαίνει κατά λίγο τη μισή μονάδα για τις δύο περιπτώσεις (3,94 περίπου και 3,332 για ισορροπία δυνάμεων και Plaxis αντίστοιχα).
- ✓ Για την τελευταία ομάδα επιλύσεων όπου ο αργιλικός σχηματισμός βρίσκεται υπό γωνία 5° σε σχέση με την οριζόντιο, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων αποκλίνουν σημαντικά, έτσι ώστε σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι διπλάσιος ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από την μέθοδο οριακής ισορροπίας από αυτόν που προκύπτει από το Plaxis. Ειδικότερα, για την περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 m ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από τις δύο μεθόδους είναι 12,9 περίπου για την ισορροπία δυνάμεων και 6,008 για το Plaxis. Για $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και πάχος 1,25 m, οι τιμές του SF είναι 12,6 περίπου και 6,739 για τις δύο μεθόδους επίλυσης. Στην περίπτωση που η συνοχή της αργίλου είναι $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της 2,5 m, η ισορροπία δυνάμεων δίνει έναν συντελεστή ασφάλειας 7,7 περίπου ενώ το Plaxis υπολογίζει το συντελεστή αυτό σε 3,419. Στην τελευταία περίπτωση που $c = 50 \text{ kN/m}^2$ και το πάχος της

αργίλου είναι 1,25 m, η ταύτιση είναι πολύ καλύτερη για τις δύο μεθόδους (7,6 περίπου και 7,250 αντίστοιχα).

- ✓ Στο σύνολο των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και με τις δύο μεθόδους, ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίστηκε είναι άνω της μονάδας που σημαίνει ότι τα εδαφικά πρανή που σχεδιάστηκαν θεωρούνται σταθερά (με ελάχιστες περιπτώσεις οριακών τιμών ειδικά στις μεγάλες κλίσεις) επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος κατολίσθησής τους.
- ✓ Όσο αφορά την ταύτιση των συντελεστών ασφαλείας, αυτή θεωρείται αρκετά ικανοποιητική δεδομένου ότι η επίλυση με την ισορροπία δυνάμεων δεν λαμβάνει υπόψη της αρκετούς από τους παράγοντες που συνυπολογίζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Γενικότερα, η διαφορετική φιλοσοφία προσέγγισης του προβλήματος της ευστάθειας πρανών από τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για τους οποίους φαίνεται να υπάρχει μια σχετική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης. Η ΜΟΙ επιλύει το δισδιάστατο εδαφικό πρότυπο με βάση τη θεωρία της ισορροπίας δυνάμεων συγκράτησης προς τις δυνάμεις ολίσθησης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς. Η ΜΠΣ 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 ασφαλείας στο Plaxis. Σχετικές διαφορές λοιπόν στο συντελεστή ευστάθειας όπως αυτός προκύπτει από τις δύο μεθόδους είναι αναμενόμενες λόγω της απλοϊκής θεώρησης του προβλήματος κατά την επίλυση με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας.

Ένας ακόμη παράγοντας που δεν λαμβάνεται υπόψη στην επίλυση με την ΜΟΙ είναι η πίεση του νερού των πόρων η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στους υπολογισμούς. Στη δεδομένη περίπτωση βέβαια, στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το Plaxis ο υδροφόρος ορίζοντας σχεδιάστηκε στο επίπεδο που διέρχεται από το πόδι του πρανούς. Έτσι, ουσιαστικά η επίδραση του νερού των πόρων δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Ακόμη, η ΜΟΙ δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη ενός υποκείμενου

εδαφικού σχηματισμού με δεδομένες ιδιότητες οι οποίες προφανώς επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Σημαντικό παράγοντα αποτελούν και οι ιδιότητες του ίδιου του στρώματος της αργίλου οι οποίες όντας αρκετά χαμηλότερες από αυτές του ψαμμίτη είναι φυσικό να δίνουν μεγαλύτερη πιθανότητα ολίσθησης στο πρυνές.

Τέλος μια πολύ σημαντική διαφορά των δύο μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι η ΜΟΙ 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 ΜΠΣ εξετάζει την κατάσταση στο σύνολο της μάζας του πρυνούς και δεν θεωρεί μια προκαθορισμένη επιφάνεια ολίσθησης. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη παραμετρική ανάλυση, οι ιδιότητες των υλικών ορίστηκαν έτσι ώστε η ολίσθηση να εμφανιστεί και στην επίλυση της ΜΠΣ στη μάζα του λεπτού στρώματος της αργίλου έτσι ώστε τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Τα σχήματα που υποδεικνύουν την ολίσθηση στη μάζα της αργίλου κατά την επίλυση με το Plaxis είναι αυτά του παραμορφωμένου δικτυώματος μετά το τέλος της επίλυσης, τα οποία παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας αυτής.

8.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Στο Κεφάλαιο 7 έγιναν κάποιες πιο σύνθετες επιλύσεις εδαφικών προτύπων από αυτές που πραγματοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση. Τα πρότυπα που επιλύθηκαν και αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο, μπορούν να συγκριθούν όσο αφορά τα αποτελέσματα με κάποιες από τις διαδοχικές επιλύσεις της παραμετρικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 6 για την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων όσο αφορά τη χρήση και τη λειτουργία του λογισμικού πακέτου Plaxis. Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από το σύνολο των επιλύσεων των σύνθετων προτύπων που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 7. Από τον Πίνακα 8.2 προκύπτουν τα εξής:

- ✓ Τα πρότυπα στα οποία το λεπτό στρώμα αργίλου αντικαταστάθηκε με διεπιφάνεια με συντελεστή $R_{inter} = 0,15$, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης στα οποία το στρώμα της αργίλου είχε μικρό πάχος (1,25 m) και συνοχή $c = 150 \text{ kN/m}^2$. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής φαίνονται στον Πίνακα 8.3. Με βάση τον Πίνακα 8.3, είναι φανερό ότι η

διεπιφάνεια λειτουργεί σαν ασθενέστερη ζώνη μέσα στο εδαφικό πρανές από ότι το λεπτό στρώμα αργίλου. Το γεγονός αυτό προκύπτει από τη σύγκριση και των δύο συντελεστών ασφάλειας ($\Sigma Msf(peak)$ και $\Sigma Msf(stable)$) για τις δύο περιπτώσεις κλίσεων.

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις επιλύσεις των σύνθετων προτύπων.

Περίπτωση	Χαρακτηριστικά	ΣMsf (peak)	ΣMsf (stable)
Πρότυπα με διεπιφάνεια αντί λεπτού στρώματος αργίλου	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,7$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	10,686	10,673
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,5$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	9,414	9,173
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,15$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 40	5,171	5,068
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,5$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	5,881	x
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,15$ Φάση 1: Ανεκτό σφάλμα = 0,025 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	2,605	x
	Αντί λεπτού στρώματος διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,7$ Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	x	x
Πρότυπο όπου τα όρια του στρώματος αργίλου αντικαταστάθηκαν με διεπιφάνεια	Διεπιφάνεια στο πάνω και στο κάτω όριο του στρώματος της αργίλου με $R_{inter} = 0,8$ και για τις δύο περιπτώσεις. Μόνο αρνητική διεπιφάνεια.	0,506	
Πρότυπα με αυξανόμενη συνοχή και μέτρο ελαστικότητας των υλικών με το βάθος	Εφαρμογή του $E_{increment} = 2kN/m^2/m$ και $c_{increment} = 0,5kN/m^2/m$ για τον ψαμμίτη 2 από το ανώτερο μέχρι το κατώτερο σημείο του πρότυπου και $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο με πάχος 2,5m. Φάση 2: Ανεκτό σφάλμα = 0,04, Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 20	4,080	3,619
	Εφαρμογή του $E_{increment} = 2kN/m^2/m$ και $c_{increment} = 0,5kN/m^2/m$ για το σύνολο των υλικών από το ανώτερο μέχρι το κατώτερο σημείο του πρότυπου και $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο με πάχος 2,5m. Φάση 2: Ανεκτό σφάλμα = 0,04, Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60 Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 40	3,851	3,803
	Πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου με πάχος περίπου 1,25m και ιδιότητες προτύπων με $c = 150kN/m^2$ για την άργιλο. Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	6,071	5,568
Πρότυπα με πολλαπλά στρώματα αργίλου παράλληλα μεταξύ τους	Πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου με πάχος περίπου 1,25m και ιδιότητες προτύπων με $c = 50kN/m^2$ για την άργιλο. Φάση 3: Επιπλέον βήματα υπολογισμών = 30	4,127	3,545

Πίνακας 8.3: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,15$ αντίστοιχα.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας			
			Λεπτό στρώμα αργίλου		Διεπιφάνεια	
			$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$
5°	150	1,25	6,777	6,739	5,171	5,068
10°	150	1,25	5,186	5,041	2,605	x

Ειδικότερα για την κλίση της διεπιφάνειας 10°, η επίλυση του πρότυπου δεν έδωσε χαρακτηριστική καμπύλη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του $\Sigma \text{Msf(stable)}$. Όσο αφορά τον συντελεστή $\Sigma \text{Msf(peak)}$, η τιμή του είναι πολύ χαμηλότερη από ότι στην περίπτωση που στη θέση της διεπιφάνειας βρισκόταν το λεπτό στρώμα αργίλου. Άρα η χρήση της διεπιφάνειας δίνει ασθενέστερες ιδιότητες στο εδαφικό πρανές από ότι ένα λεπτό στρώμα υλικού με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.

- ✓ Στην περίπτωση των προτύπων που ο συντελεστής μείωσης των παραμέτρων αντοχής της διεπιφάνειας R_{inter} είναι ίσος με 0,7 ή 0,5, όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής ασφάλειας των εδαφικών πρανών που σχεδιάστηκαν ήταν πολύ υψηλότερος από αυτόν οποιασδήποτε περίπτωσης της παραμετρικής ανάλυσης. Στον Πίνακα 8.4 φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των επιλύσεων σε όσα πρότυπα ολοκληρώθηκε η επίλυση και προέκυψε αποτέλεσμα.

Πίνακας 8.4: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$ και διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,5$ και 0,7.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας					
			Λεπτό στρώμα αργίλου		Διεπιφάνεια			
					$R_{inter} = 0,7$		$R_{inter} = 0,5$	
			$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$	$\Sigma \text{Msf (peak)}$	$\Sigma \text{Msf (stable)}$
5°	150	1,25	6,777	6,739	10,686	10,673	9,414	9,173
10°	150	1,25	5,186	5,041	-	-	5,881	x
15°	150	1,25	4,023	3,983	x	x	-	-

- ✓ Στην περίπτωση της κλίσης στρώματος 5° υπάρχει συγκριτικό αποτέλεσμα για διεπιφάνεια με $R_{inter} = 0,7$ και $R_{inter} = 0,5$. Μειούμενου του συντελεστή R_{inter} μειώνεται και ο συντελεστής ασφάλειας του πρότυπου εδαφικού πρανούς που εξετάζεται. Παρόλα αυτά και πάλι ο συντελεστής ΣMsf είναι μεγαλύτερος από ότι στην περίπτωση που επιλύεται το πρότυπο με το λεπτό στρώμα αργίλου συνοχής $c = 150 \text{ kN/m}^2$.

- ✓ Για κλίση του στρώματος της αργίλου στις 10° , επιλύθηκε μόνο η περίπτωση με διεπιφάνεια συντελεστή $R_{inter} = 0,5$. Η επίλυση έδωσε καμπύλη που δεν ακολουθεί την τυπική μορφή με αποτέλεσμα να υπάρχει μόνο ένα μέγιστο και να μην είναι εμφανής η περιοχή επιπέδωσης. Έτσι συγκρίνεται μόνο το $\Sigma Msf (peak)$ του πρότυπου με την διεπιφάνεια με το $\Sigma Msf (peak)$ του πρότυπου με το λεπτό στρώμα αργίλου. Είναι φανερό ότι στην δεύτερη περίπτωση ο συντελεστής ασφάλειας είναι μικρότερος λόγω του ότι η συνοχή της αργίλου είναι μικρότερη από αυτή που προσδίδει ο συντελεστής R_{inter} στην περιοχή γύρω από τη διεπιφάνεια.
- ✓ Στην περίπτωση της κλίσης 15° δεν κατέστη δυνατή η επίλυση του πρότυπου, παρόλο ότι έγιναν αρκετές προσπάθειες με μεταβολή των παραμέτρων επίλυσης και αρκετά μεγάλη αύξηση του ολικού σφάλματος (10%), όσο και των βημάτων επίλυσης. Το πρυνές έδειχνε να είναι ασταθές από την επιβολή του ιδίου βάρους των σχηματισμών και έπειτα.
- ✓ Στην περίπτωση που επιλύθηκαν τα πρότυπα με σταδιακή αύξηση της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας των εδαφικών υλικών που εμφανίζονται στο πρυνές, φαίνεται ότι υπάρχει μικρή μείωση του συντελεστή ασφάλειας σε σχέση με το αρχικό πρυνές που επιλύθηκε στην παραμετρική ανάλυση. Στον Πίνακα 8.5, δίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα αυτά.

Πίνακας 8.5: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με σταδιακή αύξηση μέτρου ελαστικότητας και συνοχής των υλικών σε σχέση με το αρχικό πρυνές της παραμετρικής ανάλυσης.

Κλίση στρώματος αργίλου	Συνοχή (kN/m^2)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας					
			Απλή επίλυση		$E_{incr.}=2kN/m^2/m, c_{incr.}=0,5kN/m^2/m$			
					Για ψαμμίτη		Για όλα τα υλικά	
			ΣMsf (<i>peak</i>)	ΣMsf (<i>stable</i>)	ΣMsf (<i>peak</i>)	ΣMsf (<i>stable</i>)	ΣMsf (<i>peak</i>)	ΣMsf (<i>stable</i>)
10°	150	2,5	4,293	4,138	4,080	3,619	3,851	3,803

- ✓ Στην τελευταία περίπτωση αναφέρεται η επίλυση των εδαφικών προτύπων με πολλαπλά αργιλικά στρώματα. Οι δύο επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περίπτωση αυτή συγκρίνονται με τις αντίστοιχες δύο της παραμετρικής ανάλυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την επίλυση των προτύπων αυτών έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης της στρωματογραφίας των λιγνιτικών κοιτασμάτων της Πτολεμαΐδας, όχι τόσο όσο αφορά τα υλικά και τις ιδιότητές τους, όσο την

εναλλαγή των λεπτών εδαφικών στρωμάτων χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων με μεγαλύτερα και πιο συνεκτικά πακέτα σχηματισμών. Στον Πίνακα 8.6, φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους συντελεστές ασφάλειας των περιπτώσεων αυτών.

Πίνακας 8.6: Συντελεστής ασφάλειας για πρότυπα με πολλαπλά στρώματα αργίλου σε σχέση με τα αρχικά πρανά της παραμετρικής ανάλυσης.

Κλίση στρωμάτων αργίλου	Συνοχή (kN/m ²)	Πάχος (m)	Συντελεστής ασφάλειας			
			Απλή επίλυση		Πολλαπλά στρώματα αργίλου	
			$\Sigma Msf(peak)$	$\Sigma Msf(stable)$	$\Sigma Msf(peak)$	$\Sigma Msf(stable)$
5°	150	1,25	6,777	6,739	6,071	5,568
5°	50	1,25	7,414	7,250	4,127	3,545

- ✓ Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι στην περίπτωση επίλυσης με πολλαπλά στρώματα αργίλου, ο συντελεστής ασφάλειας του εδαφικού πρανούς μειώνεται αρκετά σε σχέση με αυτόν του αρχικού πρότυπου της παραμετρικής ανάλυσης. Ειδικότερα στην περίπτωση της συνοχής $c = 50 \text{ kN/m}^2$ η μείωση είναι αρκετά αισθητή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι και στις δύο περιπτώσεις η θέση του στρώματος της αργίλου που επιλέχτηκε στην παραμετρική ανάλυση δεν ήταν η χειρίστη. Είναι επίσης αρκετά πιθανό να υπάρχει κάποια θέση που δεν εξετάστηκε, η οποία να οδηγεί το πρανές σε αστοχία, ειδικά στην περίπτωση που επιλέγεται η συνοχή $c = 50 \text{ kN/m}^2$.

Πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εκτός παραμετρικής ανάλυσης θα μπορούσαν να είναι εντελώς διαφορετικές και υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που δεν εξετάστηκαν. Τα πρότυπα που επιλέχτηκε να επιλυθούν σχεδιάστηκαν με αυτό τον τρόπο και αυτές τις ιδιότητες κυρίως για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα πρότυπα της παραμετρικής ανάλυσης.

Γενικά, οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου Plaxis είναι αρκετά μεγάλες και περιλαμβάνουν ακόμη πολλές παραμέτρους που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή. Παρόλα αυτά, όπως είναι φανερό και από τα παραπάνω, δεδομένου του καθορισμού της διαδικασίας επίλυσης και του προσδιορισμού του συντελεστή ευστάθειας, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προχωρήσει σε επίλυση πολύ πιο σύνθετων προτύπων εδαφικών πρανών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγιουτάντης, Ζ., (2002). “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις “ΙΩΝ”, Αθήνα.
2. Δημόπουλος, Γ., (1986). “Τεχνική Γεωλογία με βασικές έννοιες βραχομηχανικής και γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων”, Εκδόσεις “Γιαχούδη-Γιαπούλη”, Θεσσαλονίκη.
3. Μαρκέτος, Ε. Γ., (1992). “Τεχνική Μηχανική, Τόμος ΙΙ, Αντοχή των Υλικών”, Εκδόσεις “Συμμετρία”, Αθήνα.
4. Καββαδάς, Μ., (2000). “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Καλογήρου, Ειρ., (2000). “Εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και υπολογισμός της αναθόλωσης του δαπέδου της εκσκαφής του Τομέα 6 (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας)”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. Στειακάκης, Εμμ., (1996). “Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Στειακάκης, Στ., (2000). “Ανάλυση Ευστάθειας Δυτικών Πρανών του Λιγνιτωρυχείου «Τομέας 6» - Θεώρηση Παραμένουσας Διατμητικής Αντοχής”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. 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.
9. Chen, W. F. and D. J. Han, (1988). “Plasticity for Structural Engineering”, Springer-Verlag, New York.
10. Craig, R. F., (1997). “Soil Mechanics”, Department of Civil Engineering, University of Dundee.

11. Dunn, I. S., L. R. Anderson and F. W. Kiefer, (1980). “Fundamentals of Geotechnical Analysis”, John Wiley.
12. Griffiths, D. V. and P. A. Lane, (1999). “Slope Stability Analysis by Finite Elements”, *Geotechnique*, vol. 49, No. 3, pp. 387-403.
13. 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.
14. Miao, T., Ch. Ma and Sh. Wu, (1999). “Evolution Model of Progressive Failure of Landslides”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, October 1999, vol. 125, No. 10, pp. 827-831.
15. 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.
16. Plaxis, (1998). *User’s Manual for Version 7.0*, Balkema, Rotterdam.
17. Plaxis, (2002). *Plaxis faq*, www.plaxis.nl. Τελευταία πρόσβαση: Δεκέμβριος 2002.
18. 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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Για καθένα από τα πρότυπα που επιλύθηκαν δίνονται στο σημείο αυτό οι παράμετροι της επίλυσης, καθώς και οι ιδιότητες των υλικών και οι καμπύλες από όπου προέκυψαν οι εκάστοτε συντελεστές ασφάλειας. Επίσης, δίνεται ο παραμορφωμένος κάρναβος του προτύπου και η κατανομή των τάσεων ή των παραμορφώσεων στη μάζα του εδαφικού προτύπου για καθεμία από τις επιλύσεις. Οι πρώτες 12 επιλύσεις αναφέρονται σε πρότυπο με συνοχή αργίλου $c = 150 \text{ kN/m}^2$.

ΕΠΙΛΥΣΗ I^Η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

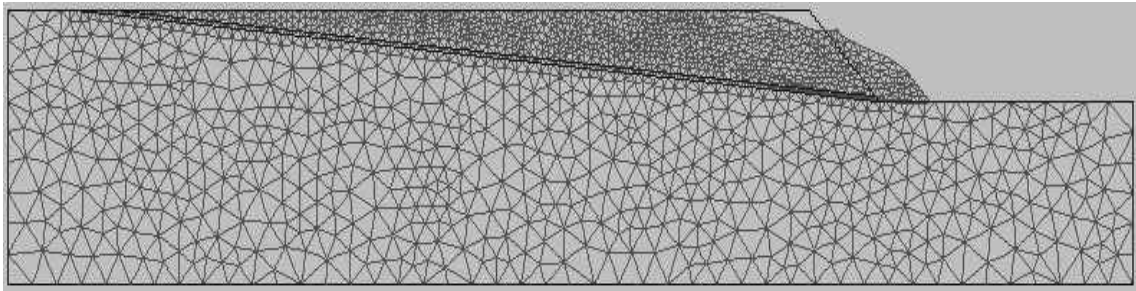
Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	5°	1,25 m

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικών για τις δώδεκα πρώτες επιλύσεις

	Ψαμμίτης 1	Άργιλος	Ψαμμίτης 2
Μοντέλο συμπεριφοράς	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Συνθήκες στράγγισης	Drained	Drained	Undrained
$\gamma_{dry} (\text{kN/m}^3)$	21	16	21
$\gamma_{wet} (\text{kN/m}^3)$	22	18	22
$k_x, k_y (\text{m/day})$	$1.69 * 10^{-4}$	10^{-4}	$1.69 * 10^{-4}$
$E_{ref} (\text{kN/m}^2)$	$2.6 * 10^5$	1000	$2.6 * 10^5$
ν	0.25	0.33	0.25
$c_{ref} (\text{kN/m}^2)$	1000	150	1000
ϕ°	37	24	37
ψ°	0	0	0
Tension cut off	NAI	NAI	NAI

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών:

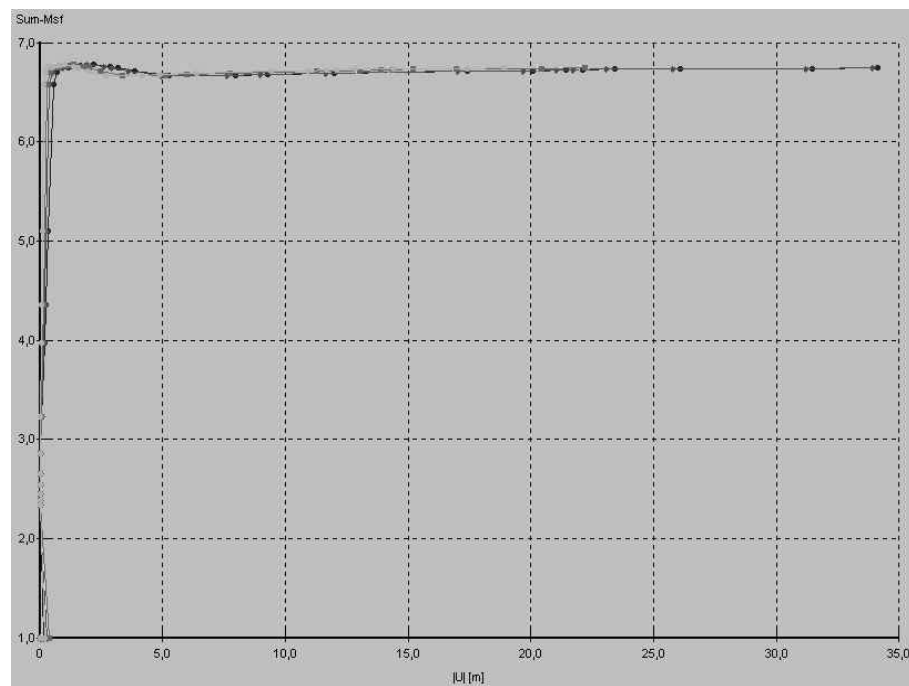
Ρυθμίσεις υπολογισμών	Φάση 1	Φάση 2	Φάση 3
Τύπος υπολογισμών	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου
	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης
Παράμετροι ελέγχου	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 25
	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Μηδενισμός παραμορφώσεων προηγούμενης φάσης
Επαναληπτική διαδικασία	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις
Ρυθμίσεις φόρτισης	Ολικοί Πολλαπλασιαστές	Σταδιακή κατασκευή	Σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής
	ΣΜweight = 1		Πολλαπλασιαστής Msf = 0.1



Σχήμα 1: Παραμορφωμένος κάναβος για την 1^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 2: Ολικές μετατοπίσεις της 1^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (υπόμνημα σε m).



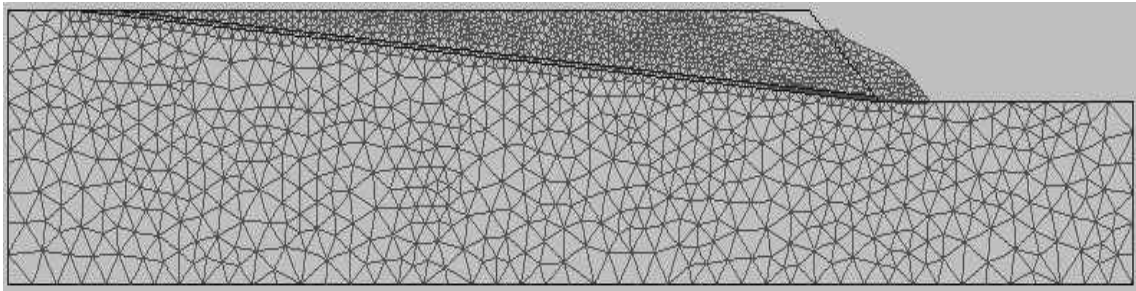
Σχήμα 3: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 1^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 2^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	10°	1,25 m

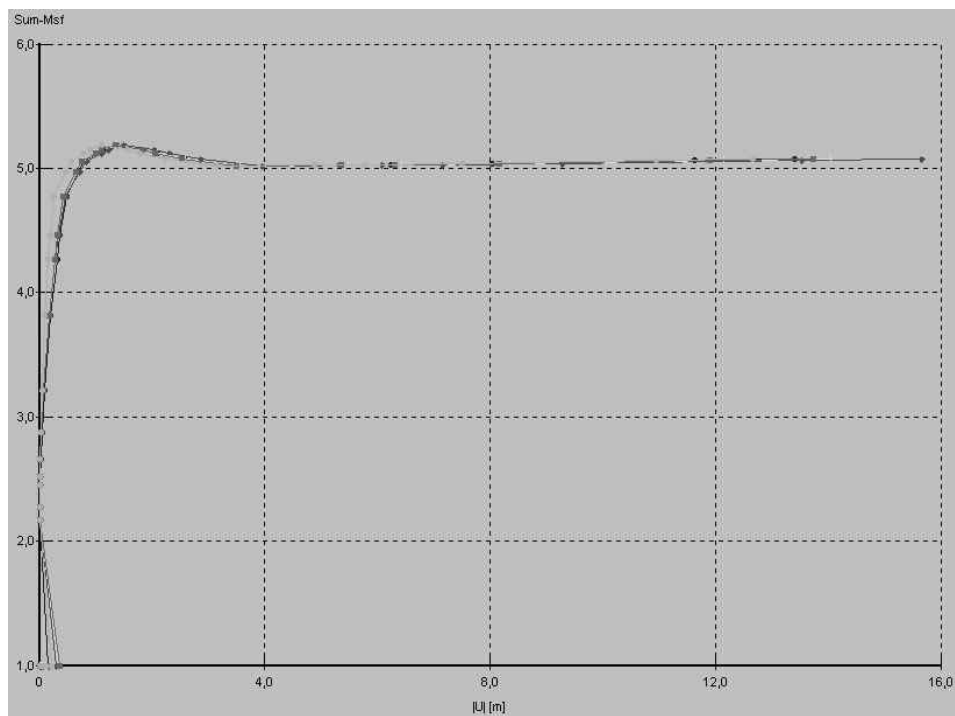
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1 Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1.



Σχήμα 4: Παραμορφωμένος κάρναβος για την 2^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 5: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 2^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



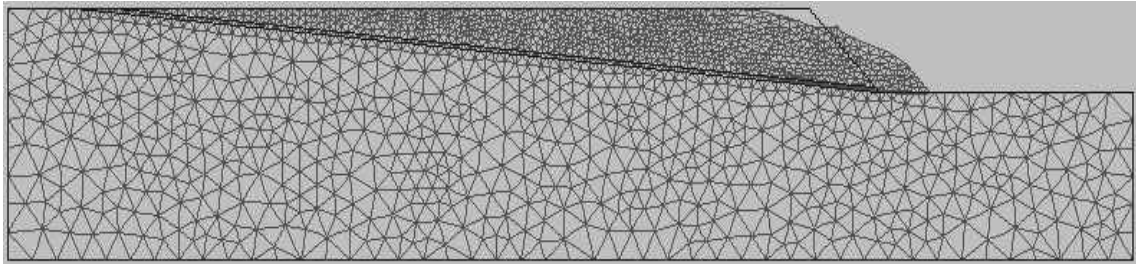
Σχήμα 6: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 2^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 3^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	15°	1,25 m

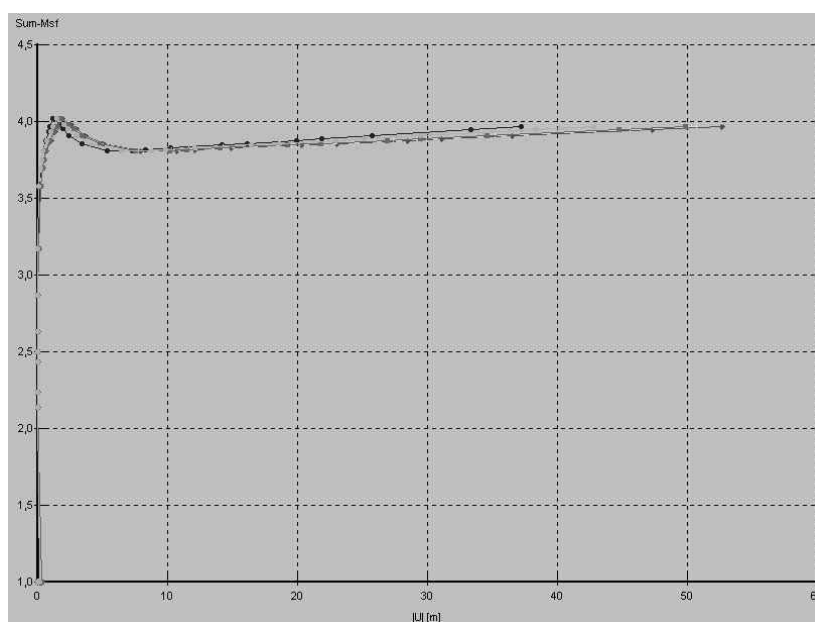
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 50.



Σχήμα 7: Παραμορφωμένος κάρναβος για την 3^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 8: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 3^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



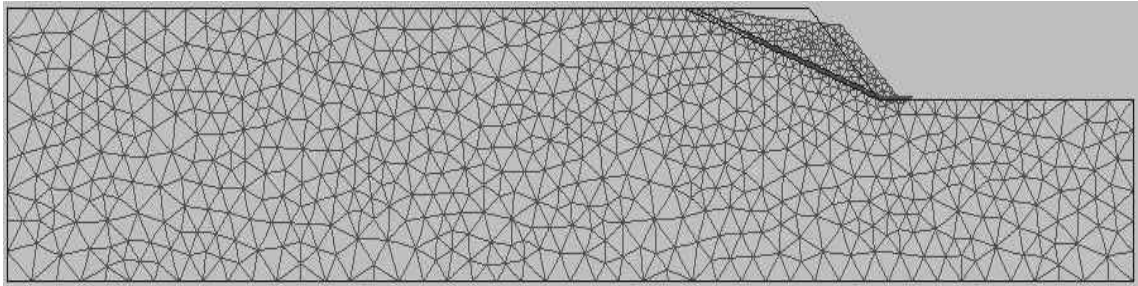
Σχήμα 9: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 3^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 4^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	20°	1,25 m

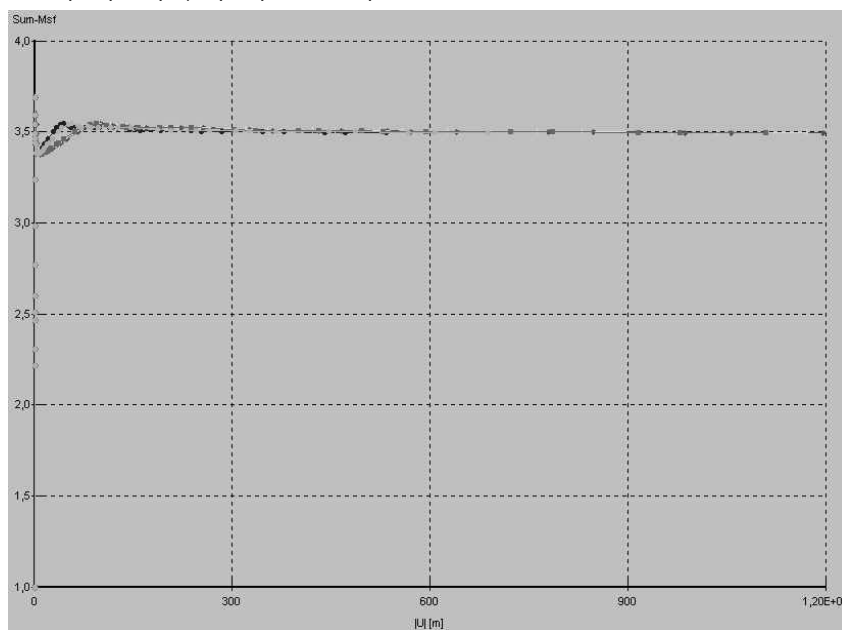
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 50.



Σχήμα 10: Παραμορφωμένος κάρναβος για την 4^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 11: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 4^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



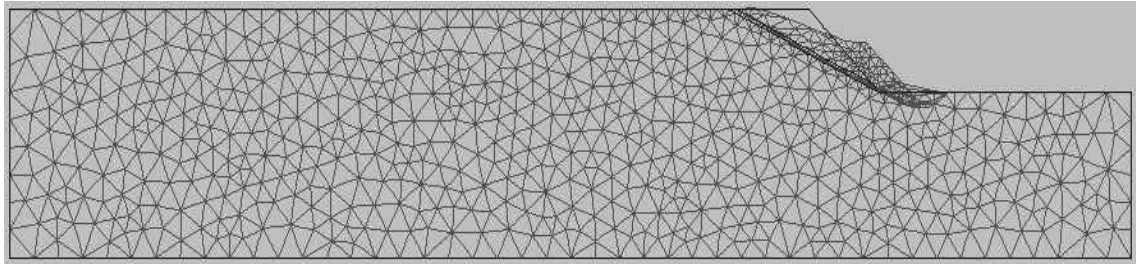
Σχήμα 12: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 4^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 5^η

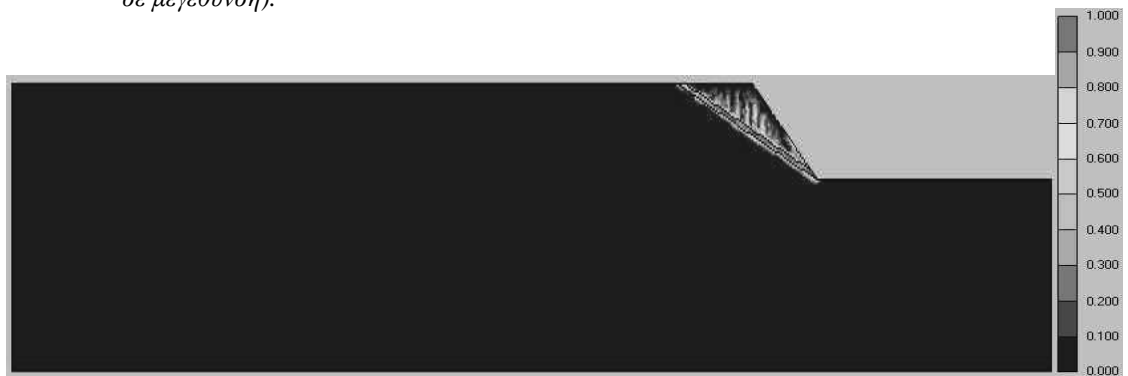
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	25°	1,25 m

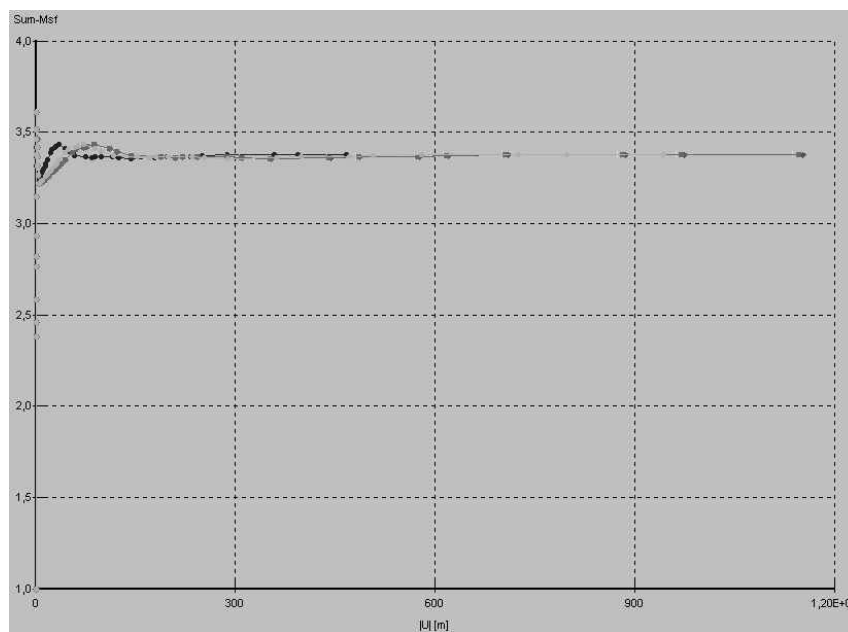
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 50.



Σχήμα 13: Παραμορφωμένος κάναβος για την 5^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 14: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 5^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



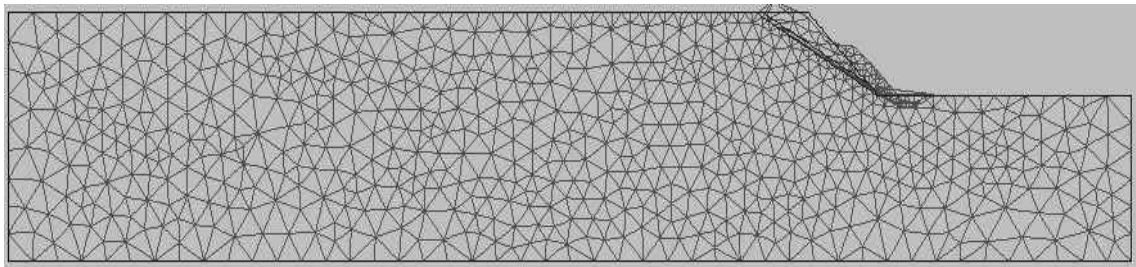
Σχήμα 15: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 5^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 6^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	30°	1,25 m

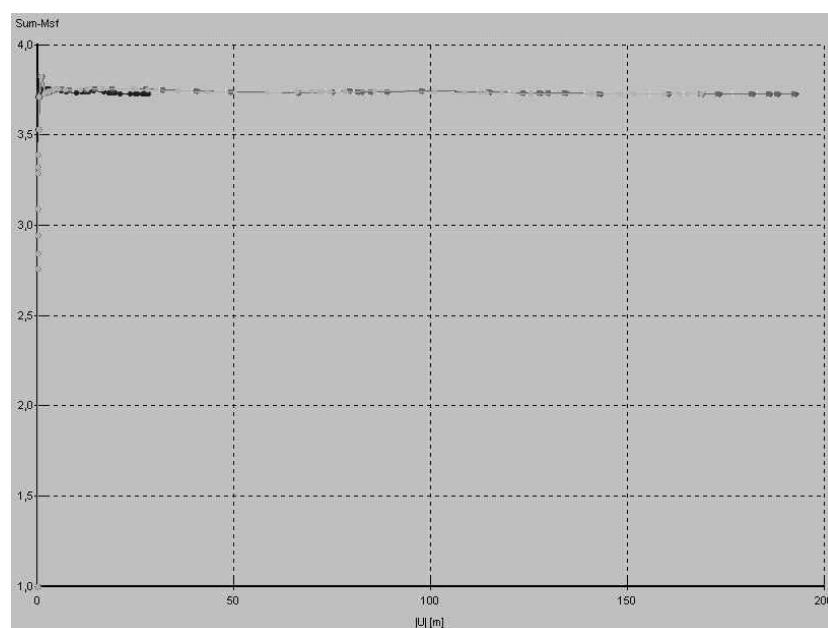
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 45.



Σχήμα 16: Παραμορφωμένος κάναβος για την 6^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 17: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 6^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



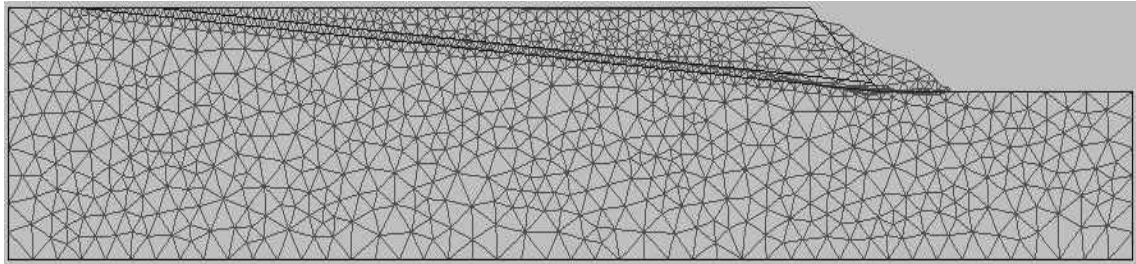
Σχήμα 18: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 6^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 7^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	5°	2,5 m

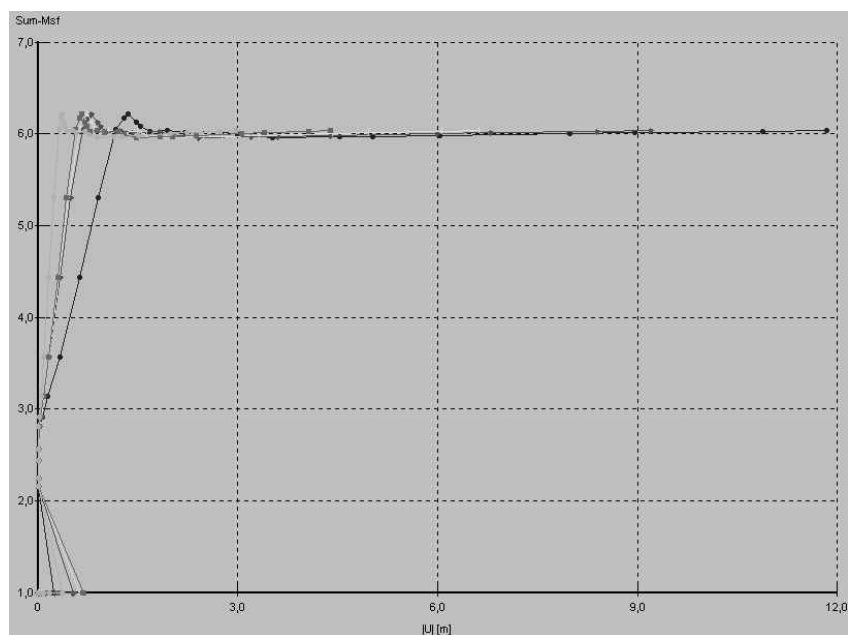
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 28.



Σχήμα 19: Παραμορφωμένος κάναβος για την 7^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 20: Ολικές μετατοπίσεις της 7^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (υπόμνημα σε m).



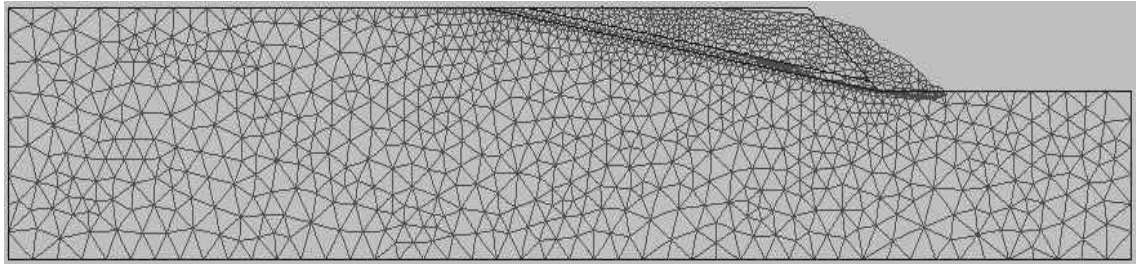
Σχήμα 21: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 7^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 8^η

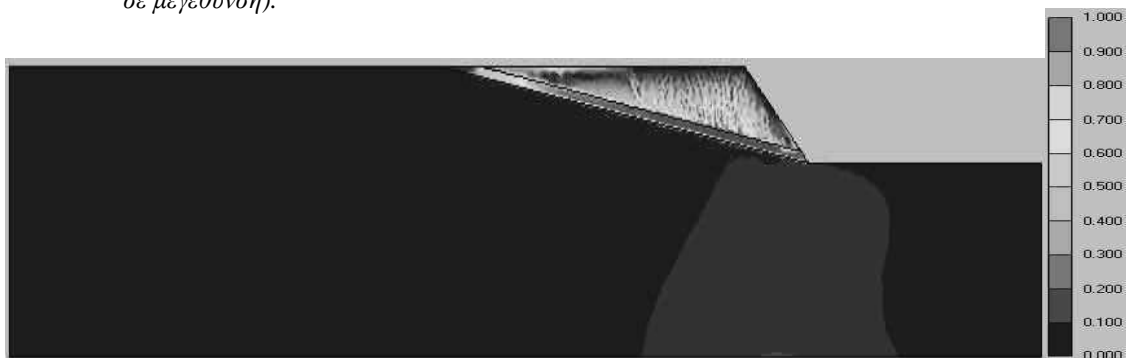
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	10°	2,5 m

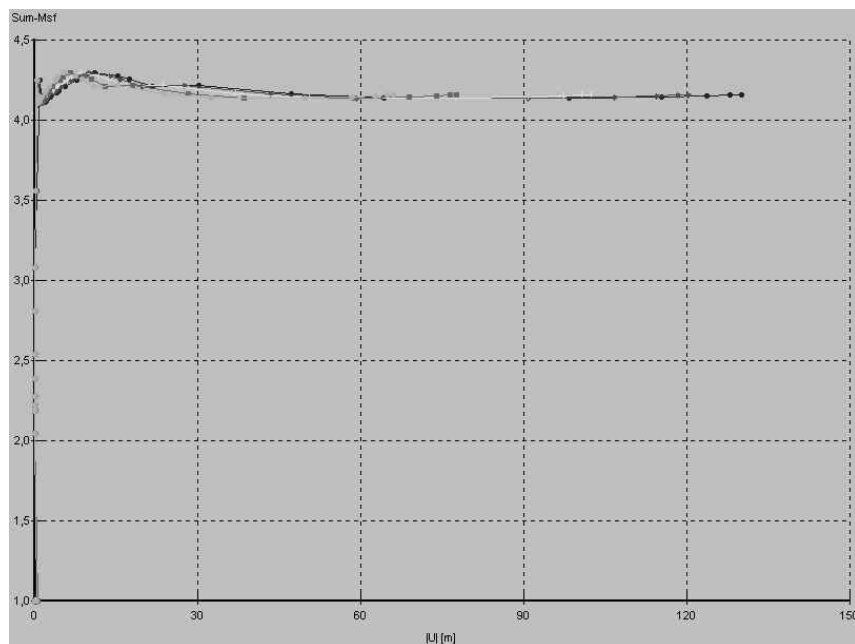
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 με τη μόνη διαφορά ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 35.



Σχήμα 22: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 8^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 23: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 8^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



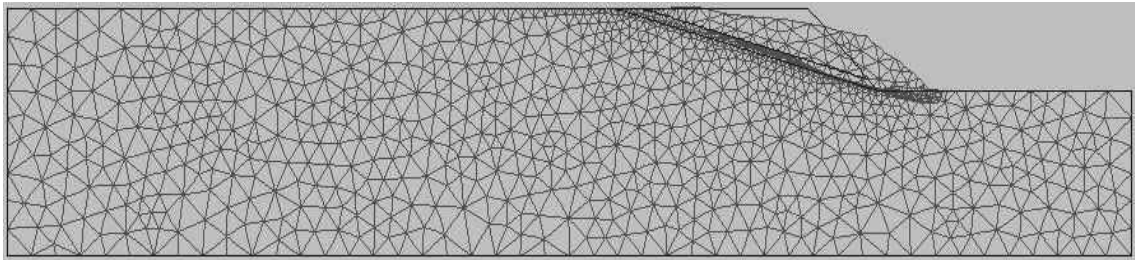
Σχήμα 24: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 8^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 9^η

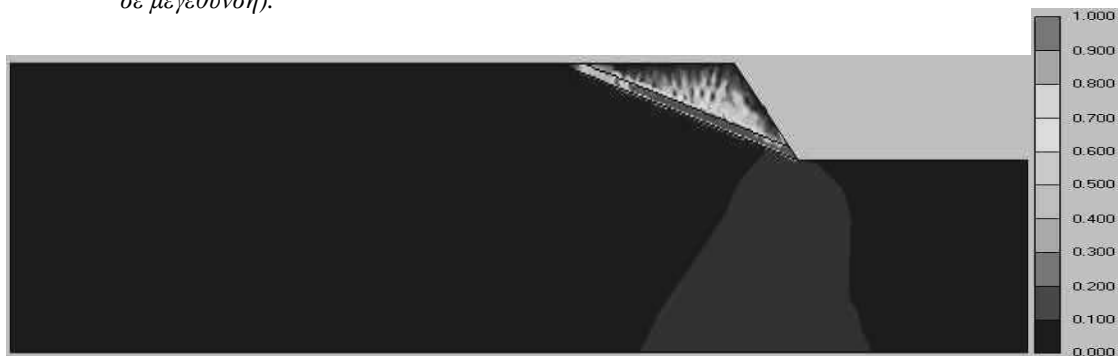
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	15°	2,5 m

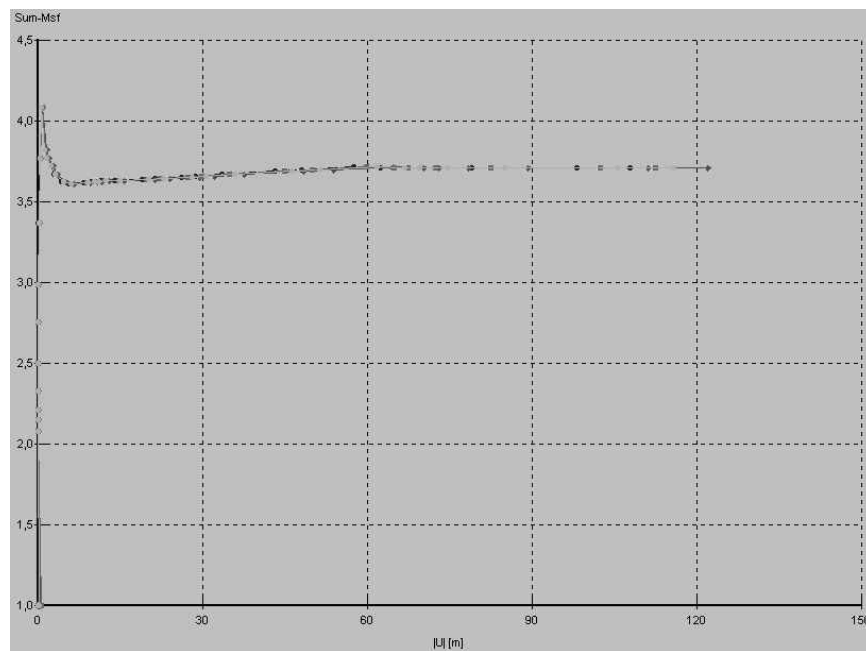
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 εκτός από το ότι στην 2^η φάση αυξήθηκε το ανεκτό σφάλμα σε 0,04 και στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 35.



Σχήμα 25: Παραμορφωμένος κάναβος για την 9^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 26: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 9^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



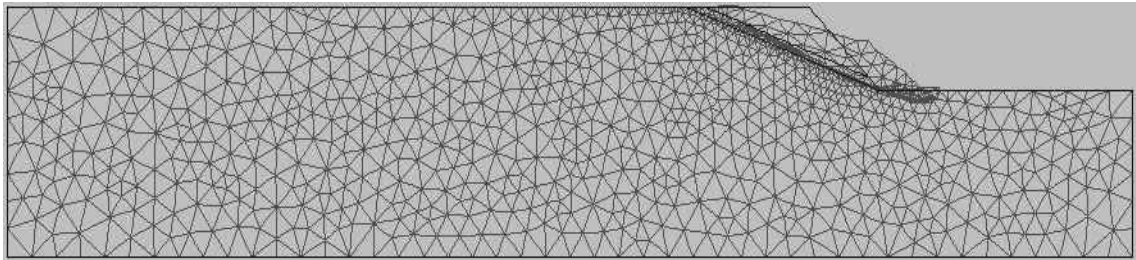
Σχήμα 27: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 9^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 10^Η

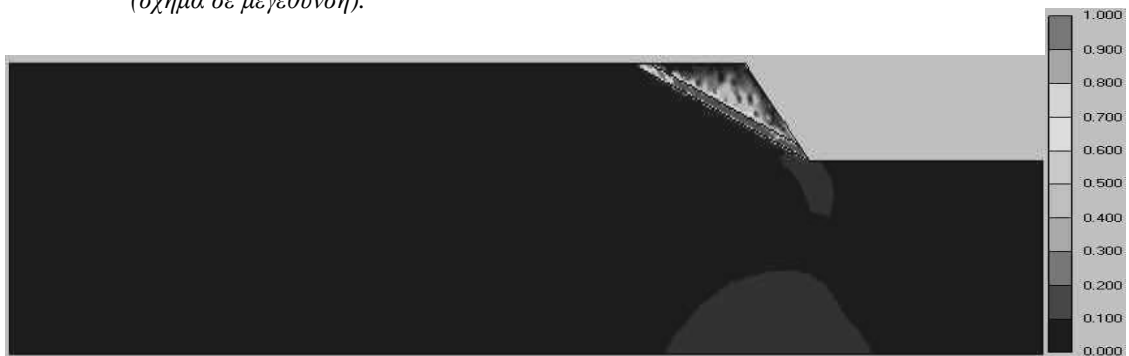
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	20°	2,5 m

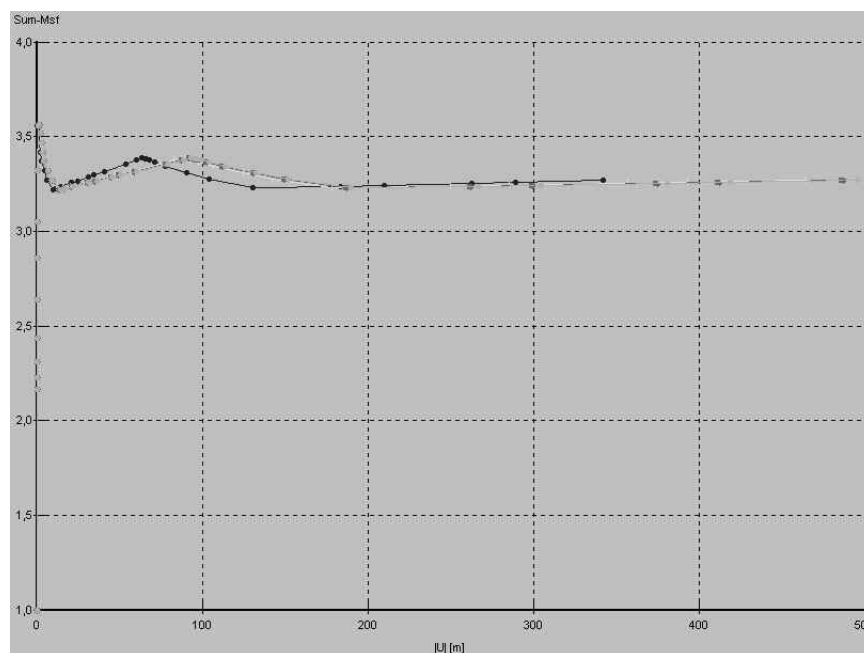
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 40.



Σχήμα 28: Παραμορφωμένος κάναβος για την 10^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 29: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 10^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



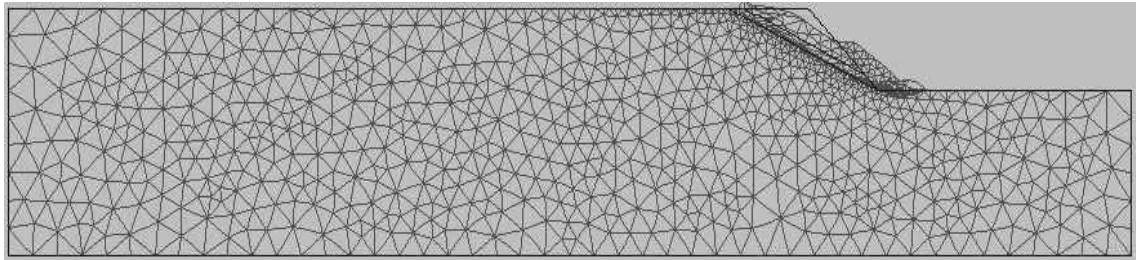
Σχήμα 30: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 10^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 11^η

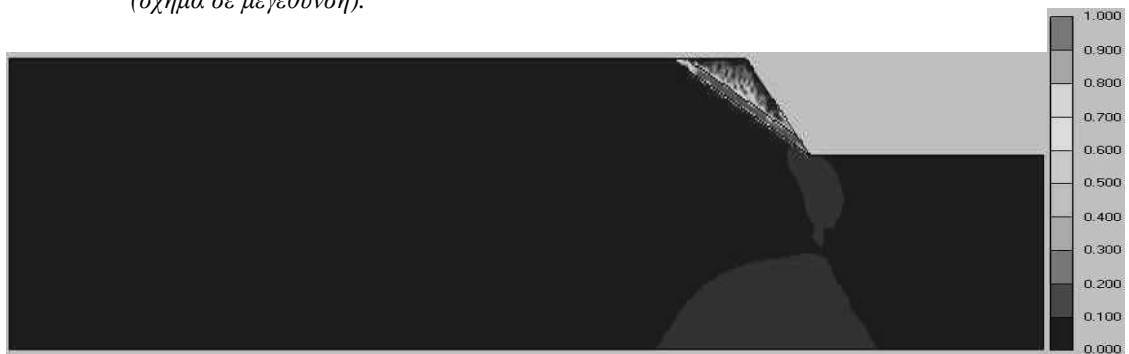
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	25°	2,5 m

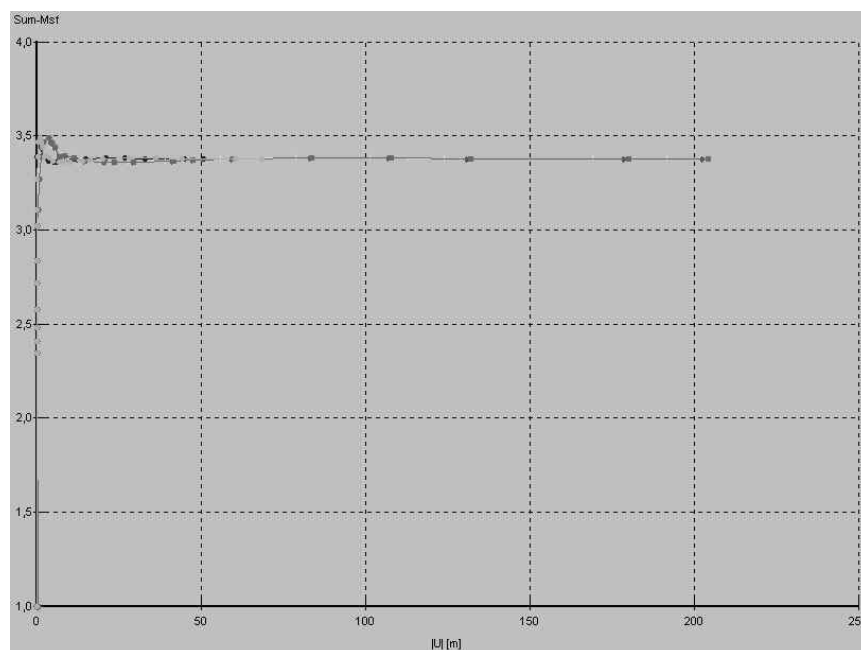
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 31: Παραμορφωμένος κάναβος για την 11^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 32: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 11^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



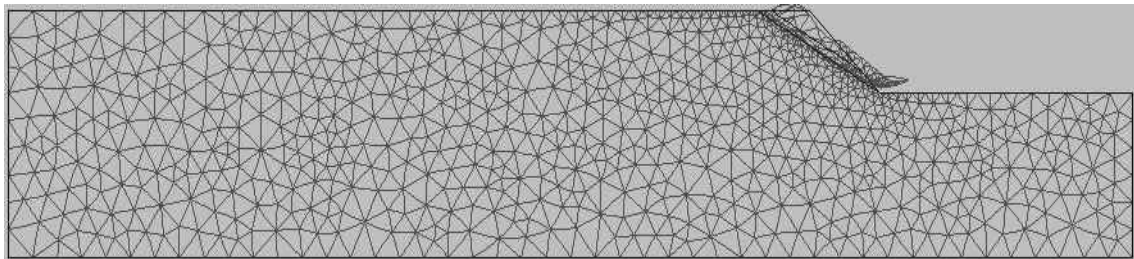
Σχήμα 33: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρον της μετατόπισης u της 11^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 12^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	30°	2,5 m

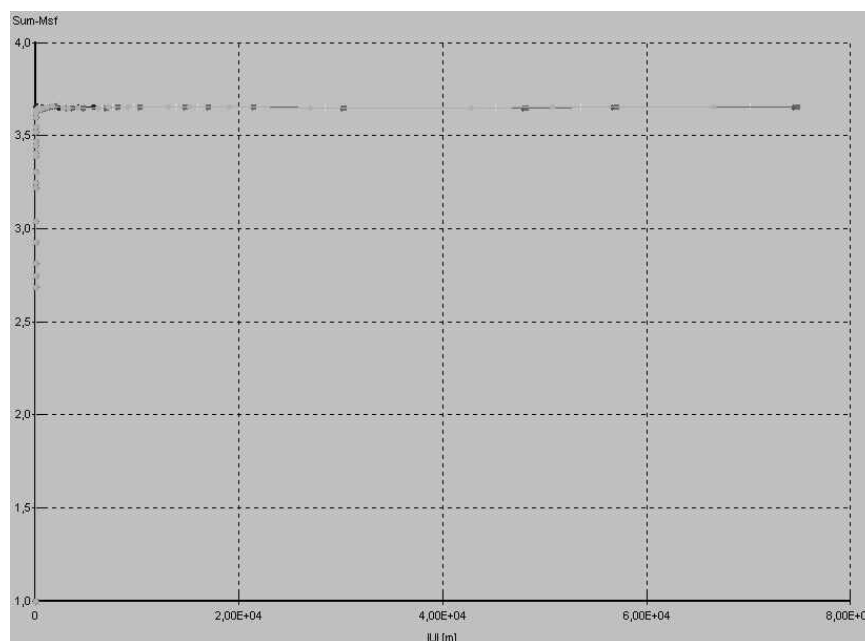
Ιδιότητες υλικών, ίδιες με αυτές της επίλυσης 1. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά της επίλυσης 1 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 50.



Σχήμα 34: Παραμορφωμένος κάναβος για την 12^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 35: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 12^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



Σχήμα 36: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 12^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

Οι επιλύσεις που ακολουθούν, αναφέρονται σε πρότυπα με τις ιδιότητες του παρακάτω πίνακα. Η διαφοροποίηση από τα προηγούμενα 12 πρότυπα αναφέρεται στην συνοχή της αργίλου, η οποία για τις ακόλουθες περιπτώσεις ορίστηκε σε 50 kN/m^2 έναντι 150 kN/m^2 για τα 12 πρώτα. Για καθεμία από τις επιλύσεις αυτές αναφέρονται όπως και παραπάνω τα γεωμετρικά στοιχεία του εδαφικού πρανούς, τα χαρακτηριστικά των φάσεων υπολογισμών, όπου αυτά διαφοροποιούνται από τον πίνακα που τα αναφέρει αναλυτικά, καθώς και οι καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας, το παραμορφωμένο δικτύωμα και η κατανομή των τάσεων στη μάζα του εδαφικού προτύπου.

Πίνακας 3: Ιδιότητες υλικών για την δεύτερη δωδεκάδα επιλύσεων

	<i>Ψαμμίτης 1</i>	<i>Άργιλος</i>	<i>Ψαμμίτης 2</i>
Μοντέλο συμπεριφοράς	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Συνθήκες στράγγισης	Drained	Drained	Undrained
$\gamma_{dry} (\text{kN/m}^3)$	21	16	21
$\gamma_{wet} (\text{kN/m}^3)$	22	18	22
$k_x, k_y (\text{m/day})$	$1.69 * 10^{-4}$	10^{-4}	$1.69 * 10^{-4}$
$E_{ref} (\text{kN/m}^2)$	$2.6 * 10^5$	1000	$2.6 * 10^5$
ν	0.25	0.33	0.25
$c_{ref} (\text{kN/m}^2)$	1000	50	1000
ϕ°	37	24	37
ψ°	0	0	0
Tension cut off	NAI	NAI	NAI

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών για την δεύτερη δωδεκάδα επιλύσεων

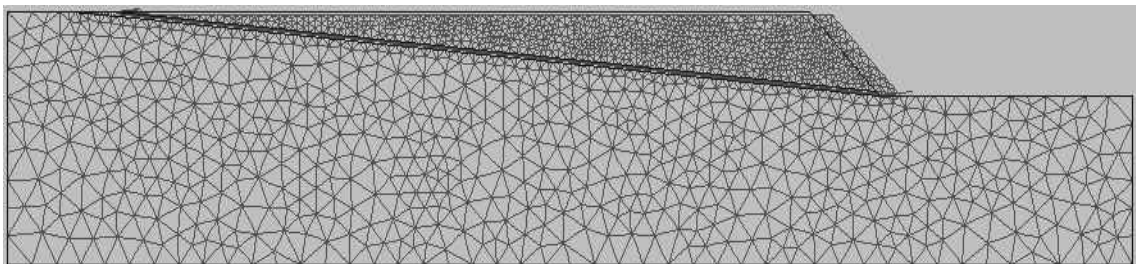
<i>Ρυθμίσεις υπολογισμών</i>	Φάση 1	Φάση 2	Φάση 3
Τύπος υπολογισμών	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου	Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου
	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης μέχρι τελικού σταδίου	Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης
Παράμετροι ελέγχου	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 100	Βήματα υπολογισμών: 25
	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων υπολογισμών	Μηδενισμός παραμορφώσεων προηγούμενης φάσης
Επαναληπτική διαδικασία	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις
Ρυθμίσεις φόρτισης	Ολικοί Πολλαπλασιαστές	Σταδιακή κατασκευή	Σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής
	ΣΜweight = 1		Πολλαπλασιαστής Msf = 0.1

ΕΠΙΛΥΣΗ 13^η

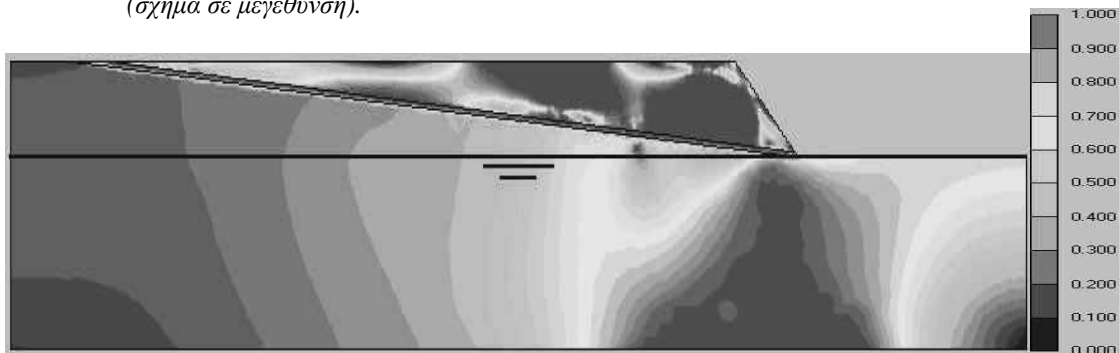
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	5°	1,25 m

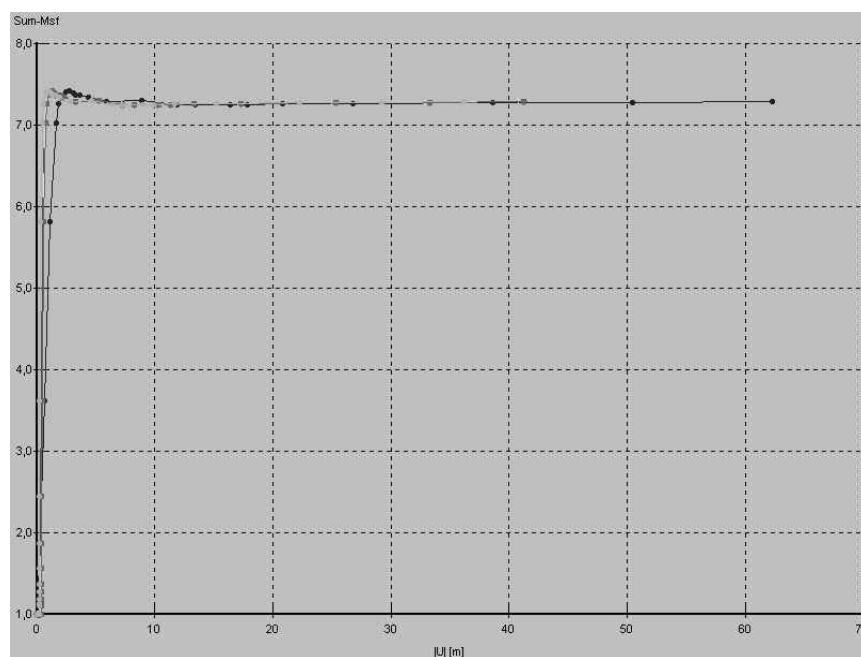
Ιδιότητες υλικών, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 3. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά του Πίνακα 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 30.



Σχήμα 37: Παραμορφωμένος κάναβος για την 13^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 38: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 13^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



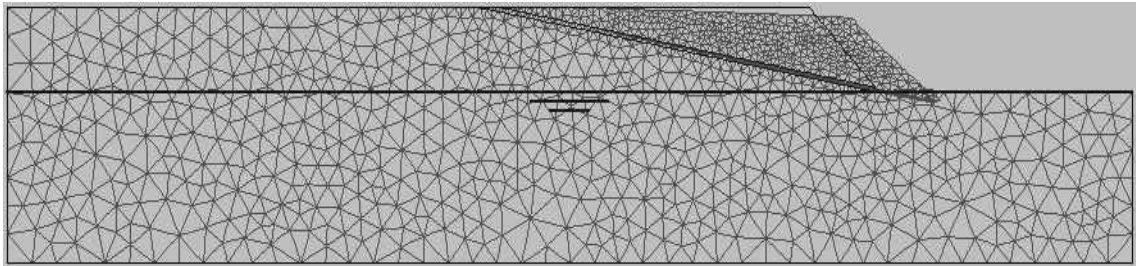
Σχήμα 39: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρον της μετατόπισης u της 13^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 14^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	10°	1,25 m

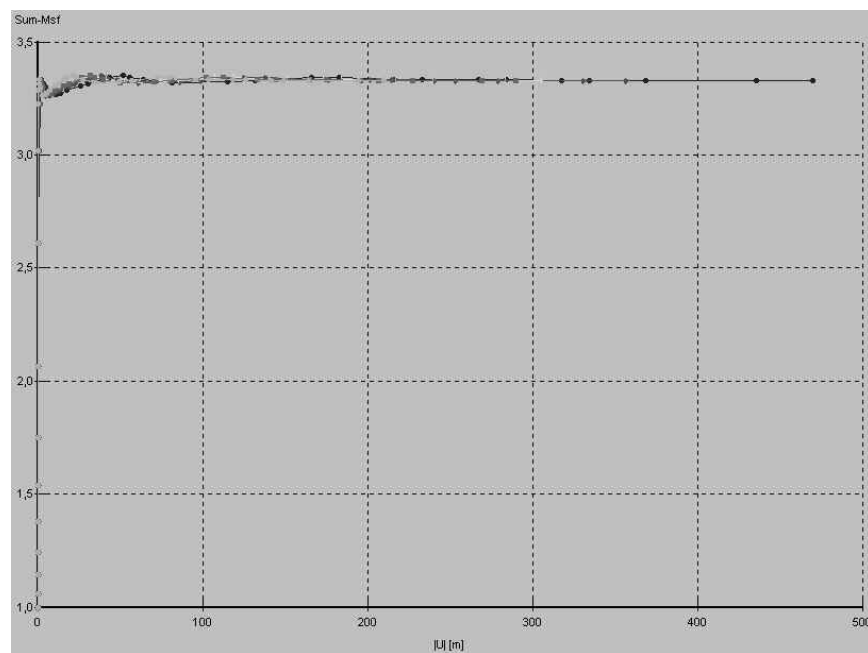
Ιδιότητες υλικών, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 3. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά του Πίνακα 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 40.



Σχήμα 40: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 14^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 41: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 14^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



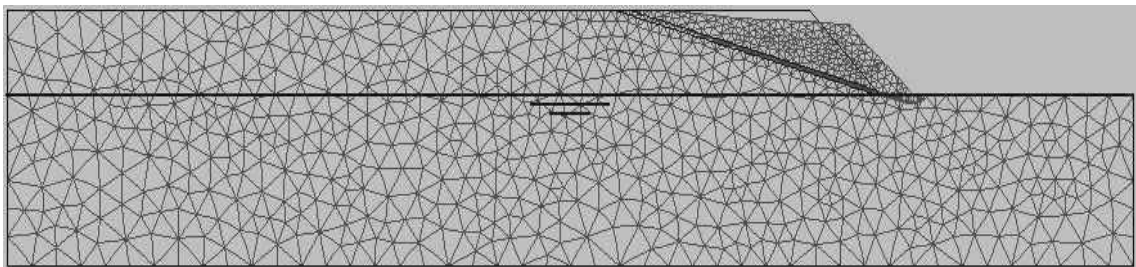
Σχήμα 42: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 14^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 15^η

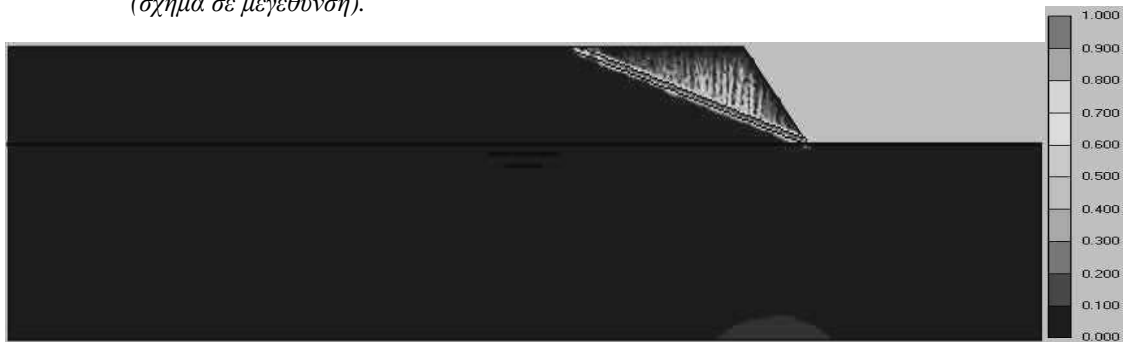
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	15°	1,25 m

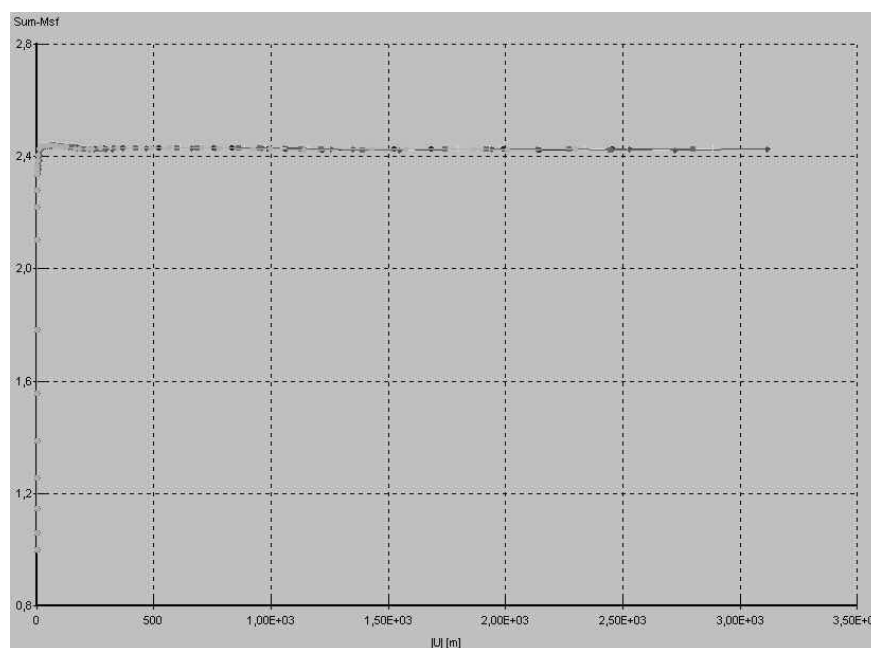
Ιδιότητες υλικών, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 3. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά του Πίνακα 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 50.



Σχήμα 43: Παραμορφωμένος κάναβος για την 15^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 44: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 15^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



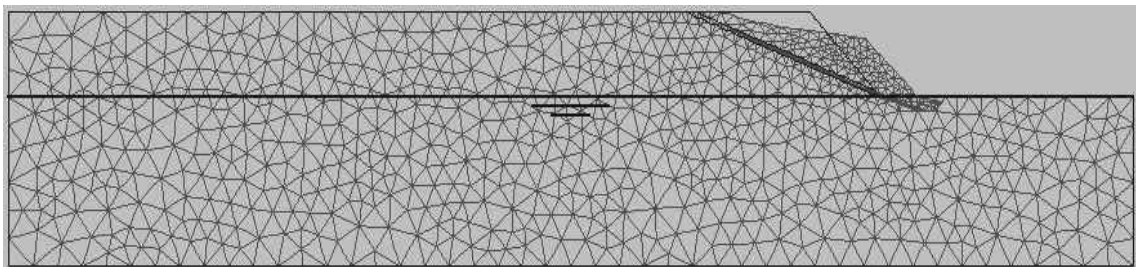
Σχήμα 45: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 15^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 16^η

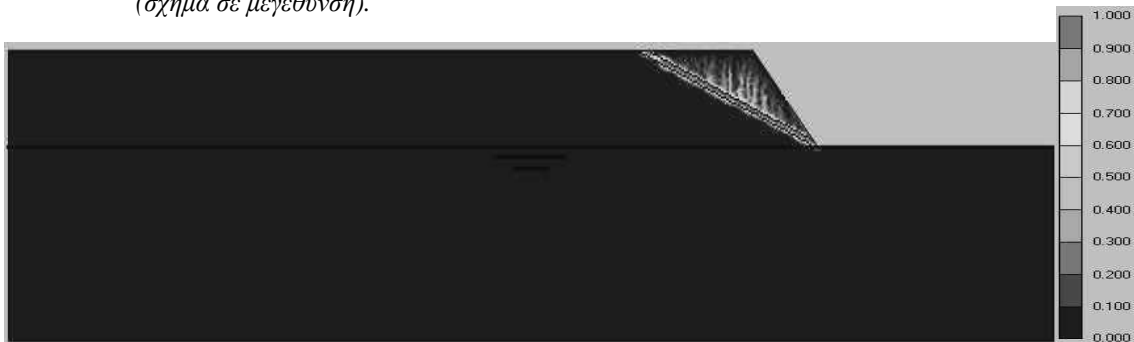
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	20°	1,25 m

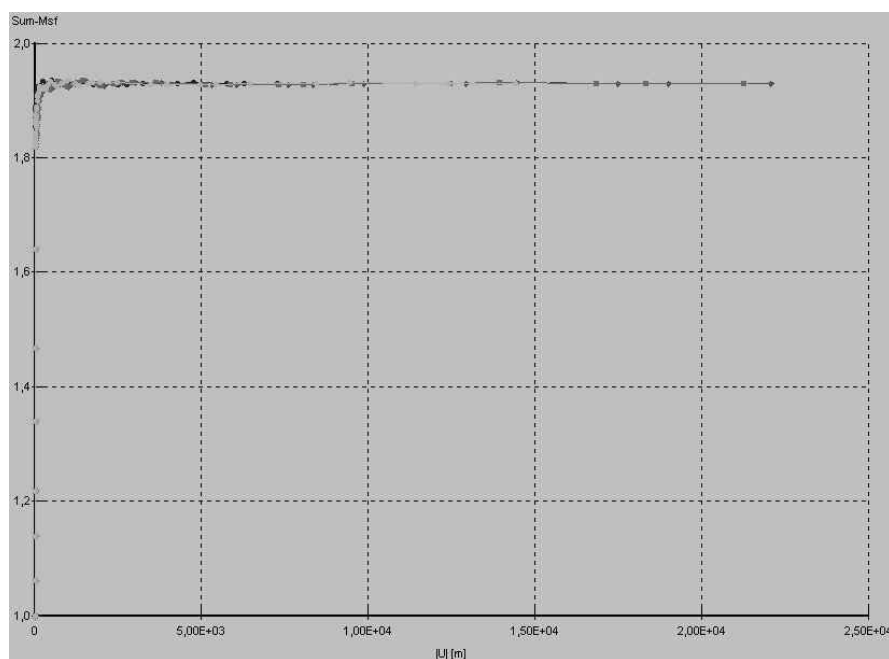
Ιδιότητες υλικών, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 3. Χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών, ίδια με αυτά του Πίνακα 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών αυξήθηκαν σε 60.



Σχήμα 46: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 16^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 47: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 16^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



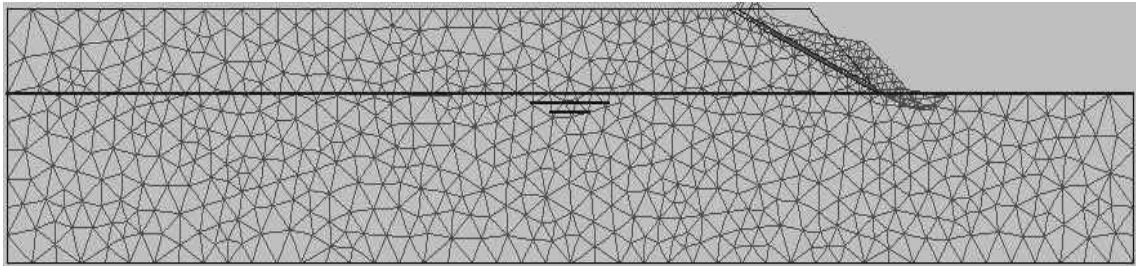
Σχήμα 48: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 16^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 17^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	25°	1,25 m

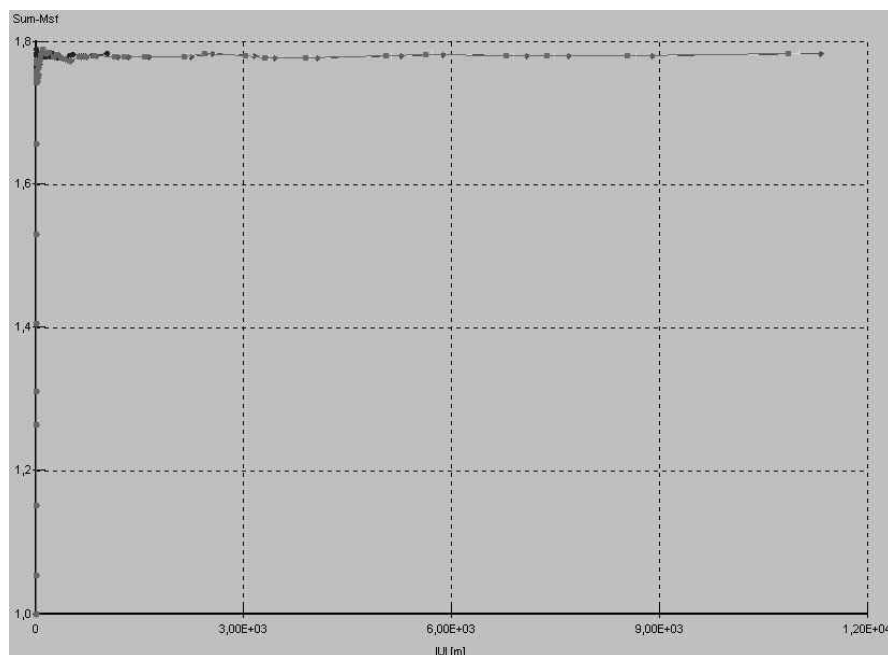
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 50, ενώ αυξήθηκε και ο αριθμός των επαναλήψεων σε 70 για κάθε υπολογιστικό βήμα.



Σχήμα 49: Παραμορφωμένος κάναβος για την 17^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 50: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 17^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



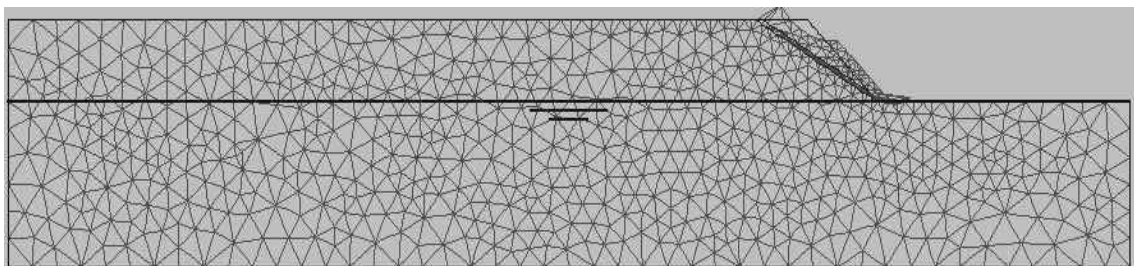
Σχήμα 51: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 17^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 18^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	30°	1,25 m

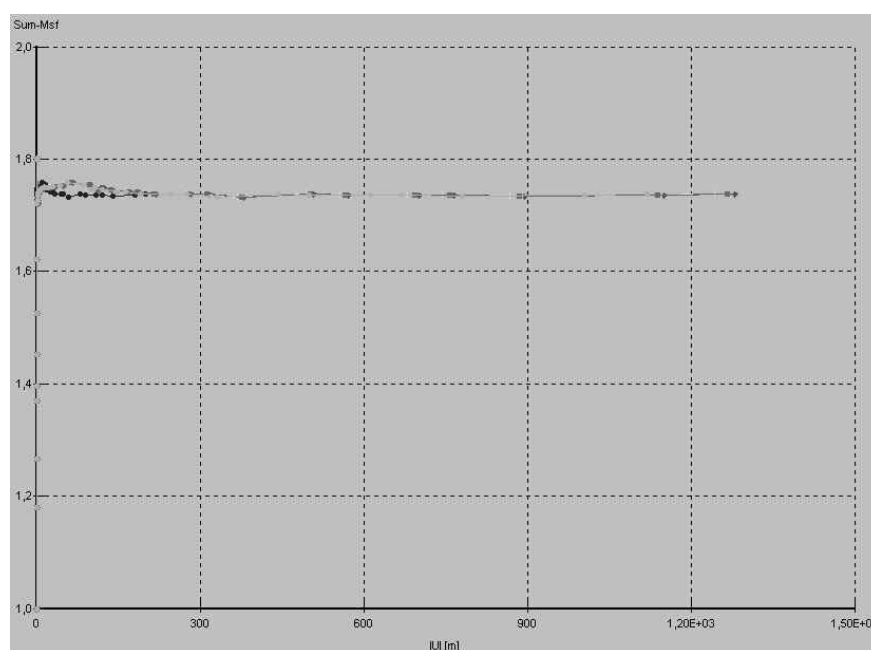
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40.



Σχήμα 52: Παραμορφωμένος κάναβος για την 18^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 53: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 18^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



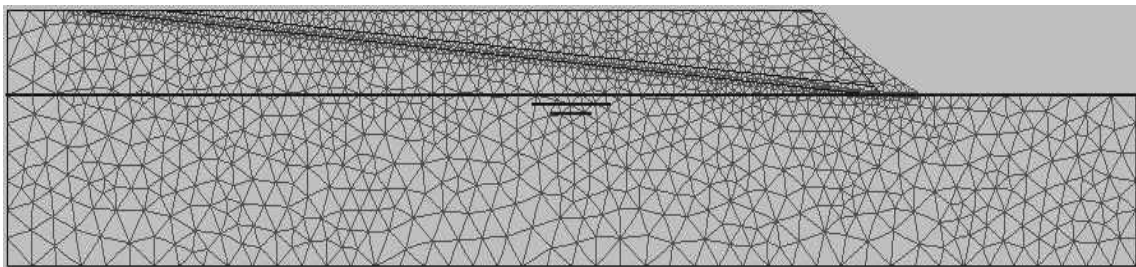
Σχήμα 54: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρον της μετατόπισης u της 18^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 19^η

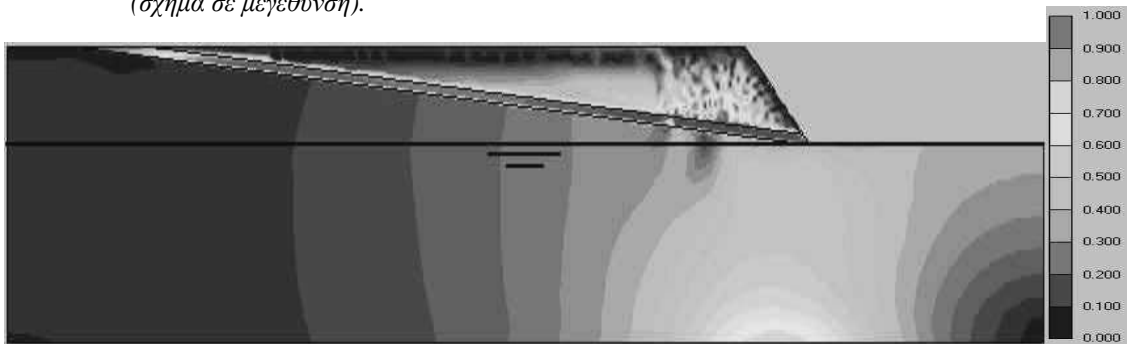
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	5°	2,5 m

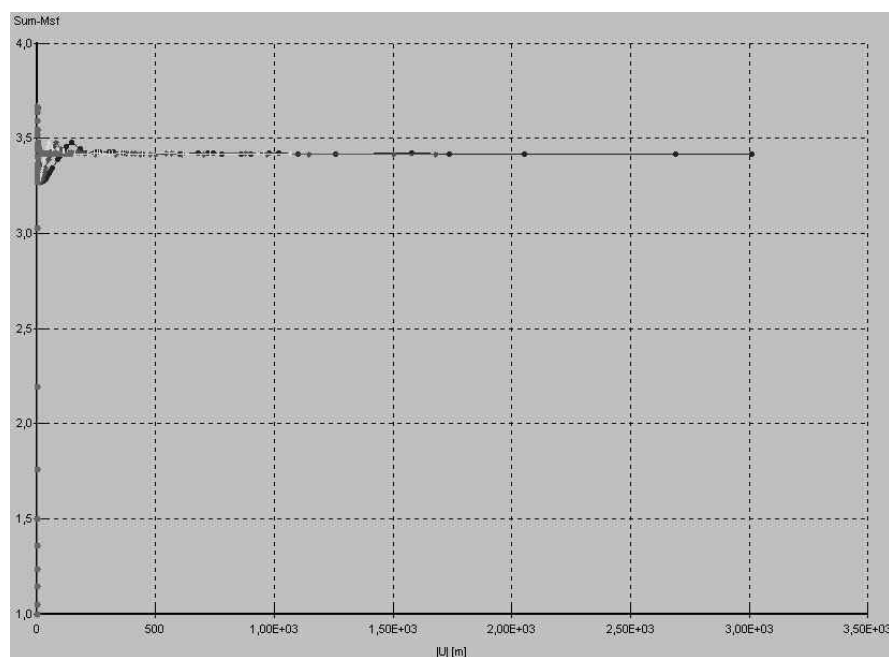
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 60.



Σχήμα 55: Παραμορφωμένος κάναβος για την 19^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 56: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 19^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



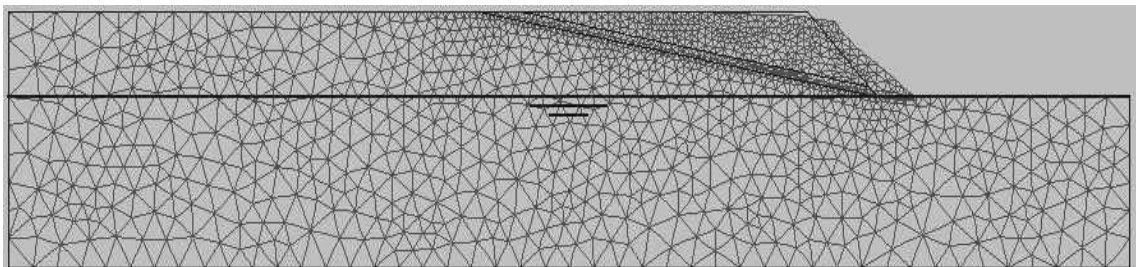
Σχήμα 57: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 19^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 20^η

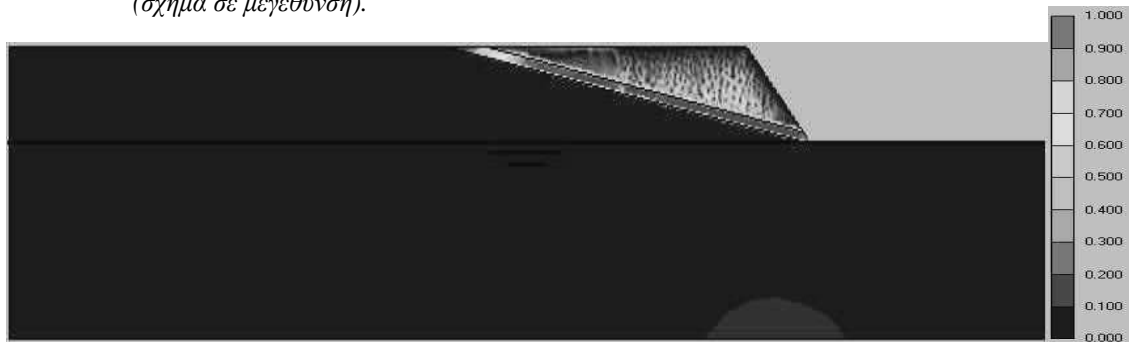
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	10°	2,5 m

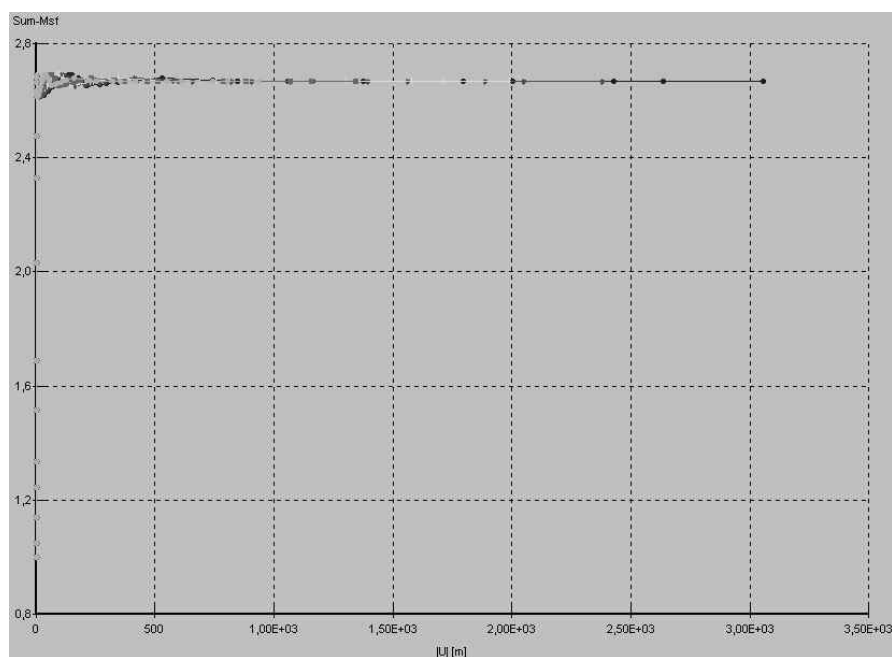
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 60.



Σχήμα 58: Παραμορφωμένος κάναβος για την 20^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 59: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 20^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



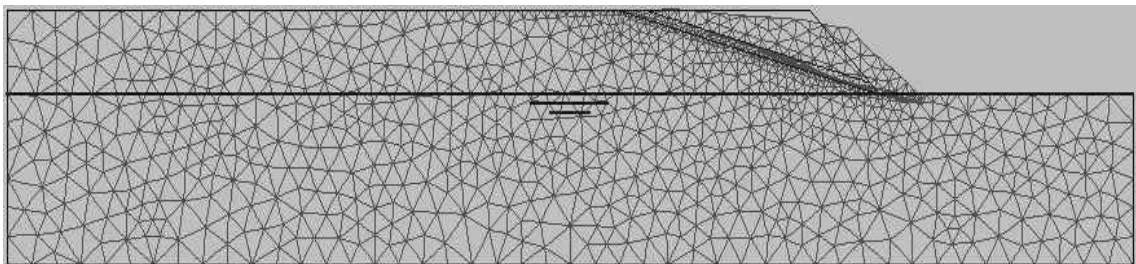
Σχήμα 60: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 20^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 21^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	15°	2,5 m

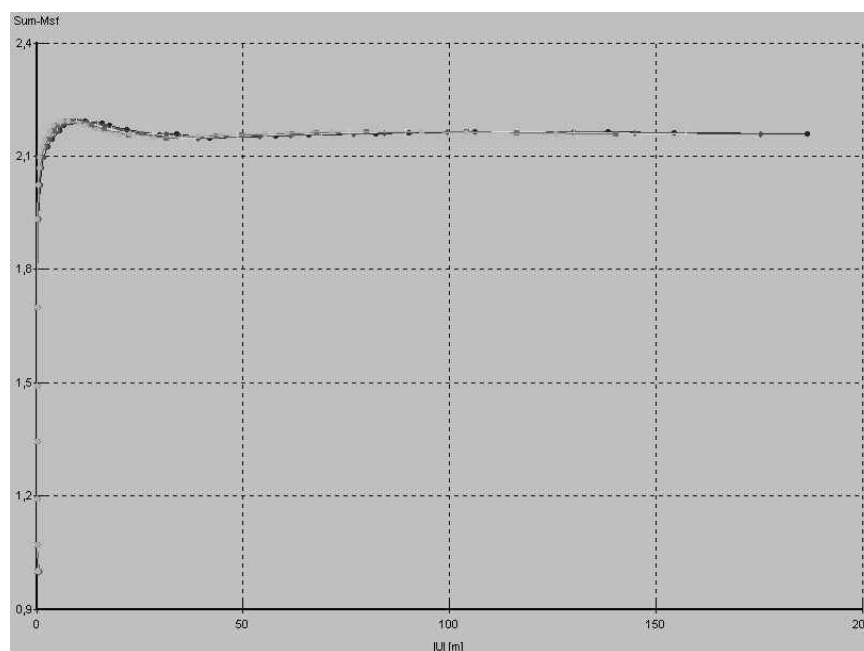
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 61: Παραμορφωμένος κάναβος για την 21^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 62: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 21^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



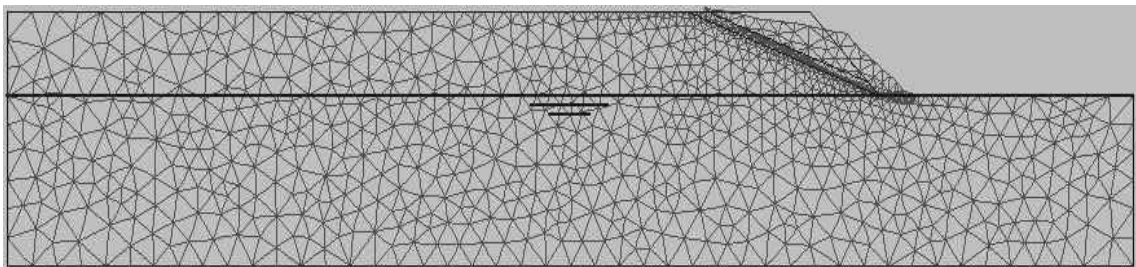
Σχήμα 63: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρον της μετατόπισης u της 21^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 22^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	20°	2,5 m

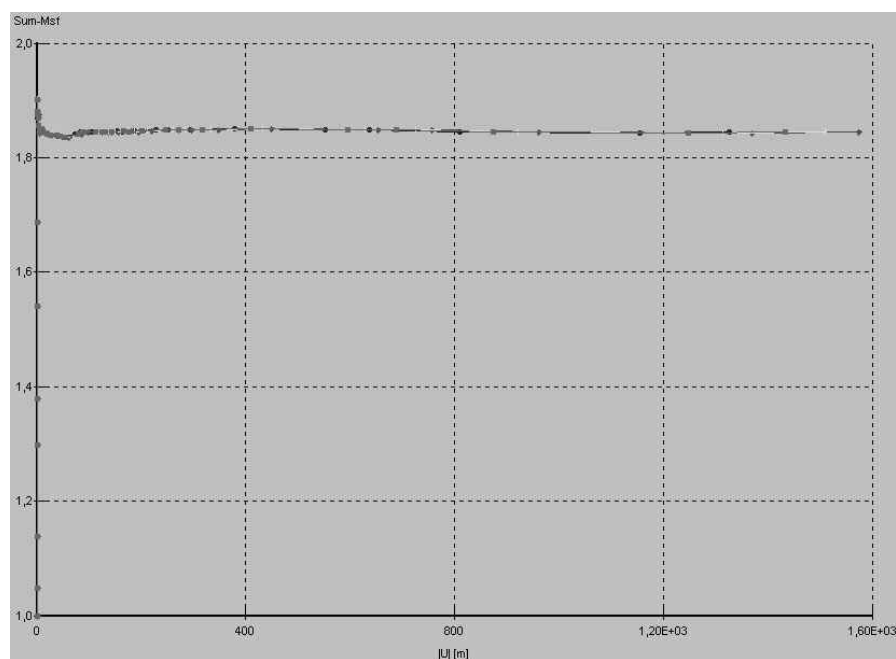
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40.



Σχήμα 64: Παραμορφωμένος κάναβος για την 22^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 65: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 22^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



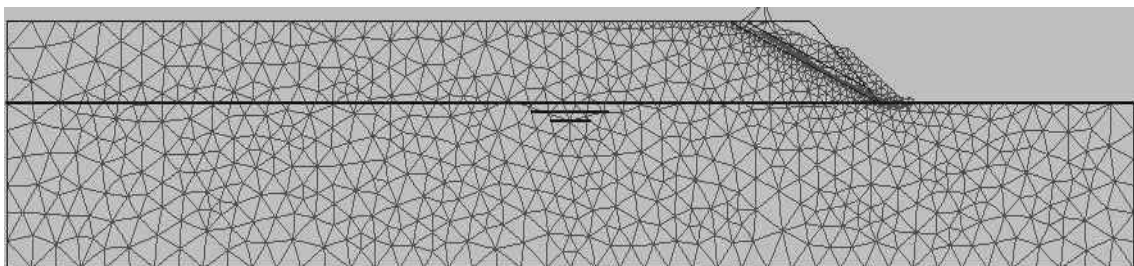
Σχήμα 66: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 22^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 23^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	25°	2,5 m

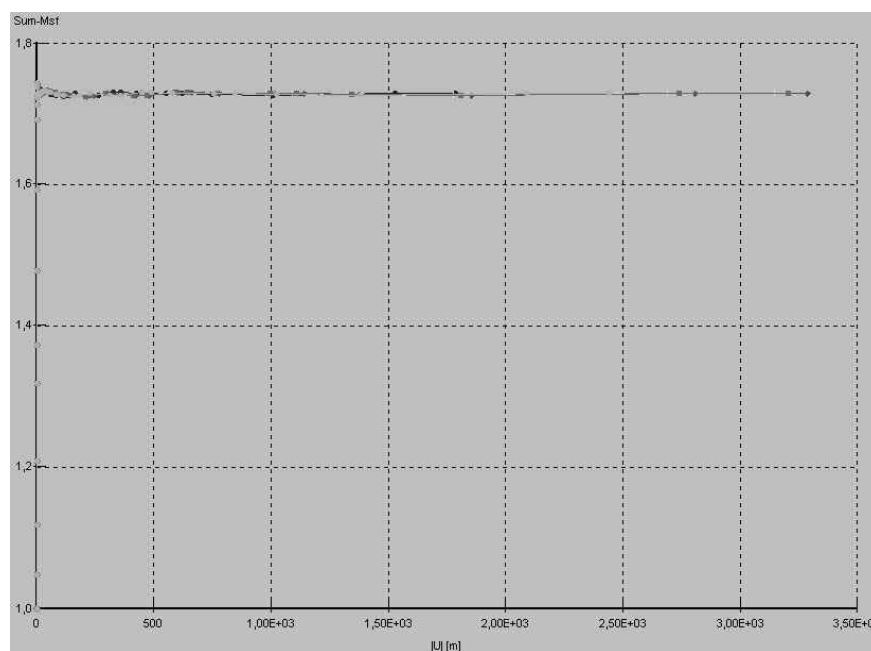
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40.



Σχήμα 67: Παραμορφωμένος κάναβος για την 23^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 68: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 23^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



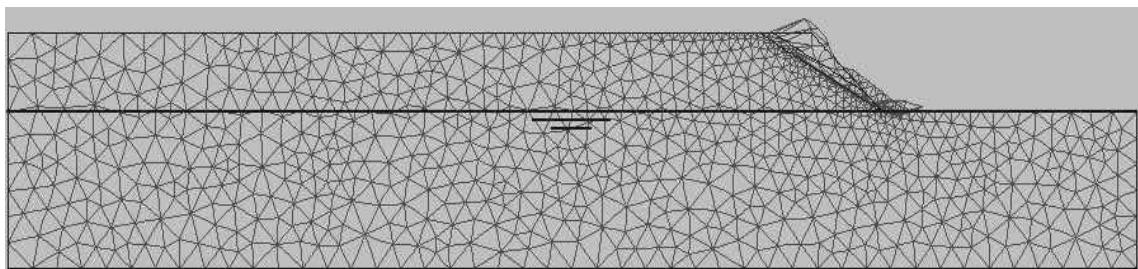
Σχήμα 69: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρον της μετατόπισης u της 23^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ 24^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικού στρώματος	Πάχος αργιλικού στρώματος
25 m	45°	30°	2,5 m

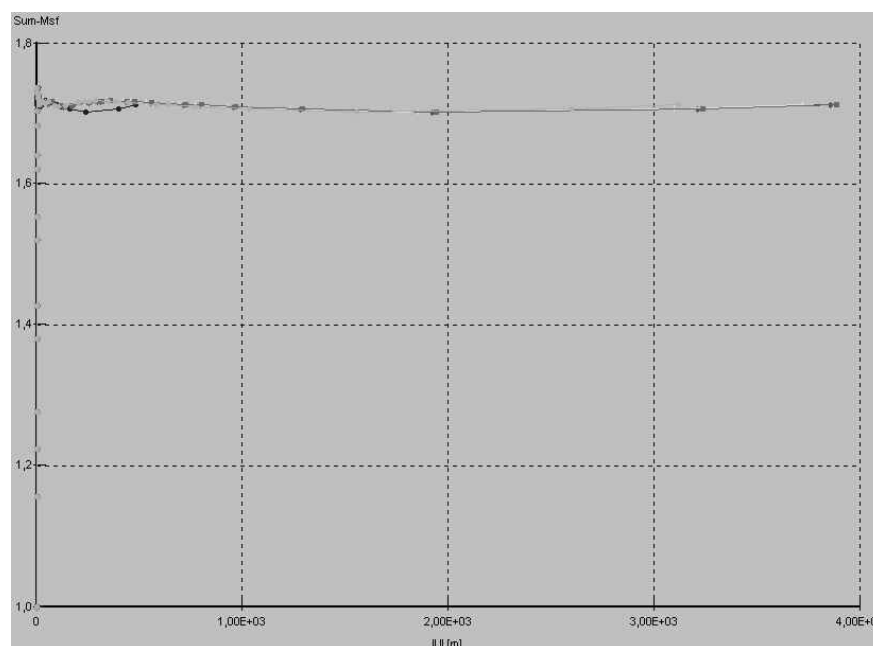
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3 και 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40.



Σχήμα 70: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 24^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 71: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 24^η περίπτωση επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.



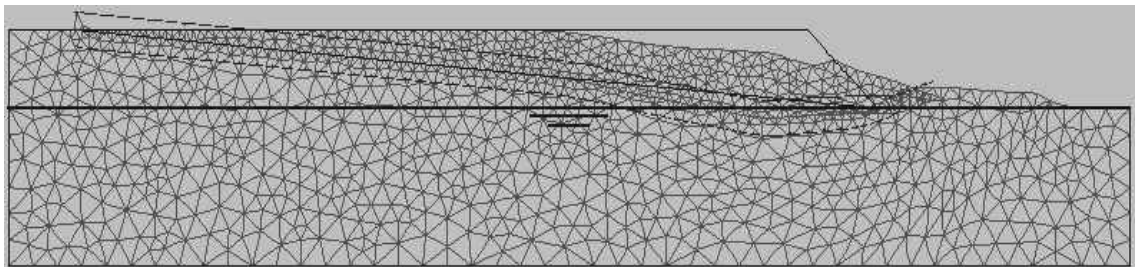
Σχήμα 72: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 24^{ης} περίπτωσης επίλυσης της παραμετρικής ανάλυσης.

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ**ΕΠΙΛΥΣΗ 1^η**

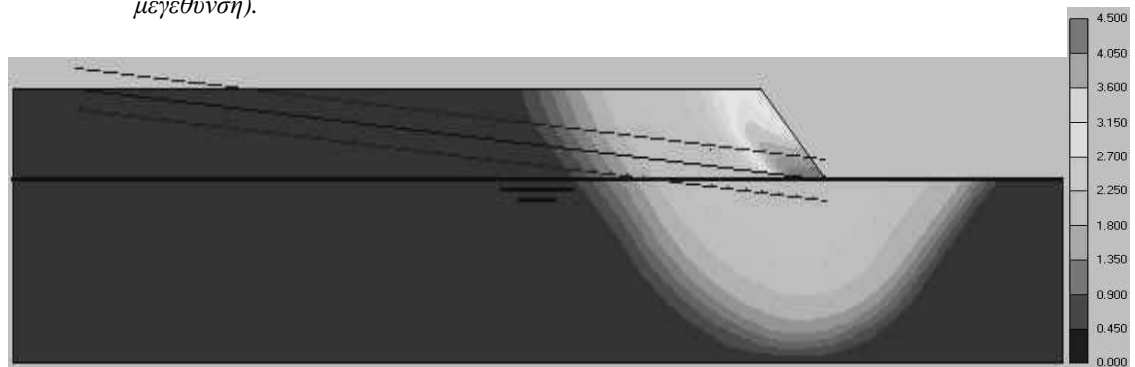
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{\text{interface}}$
25 m	45°	5°	0,7

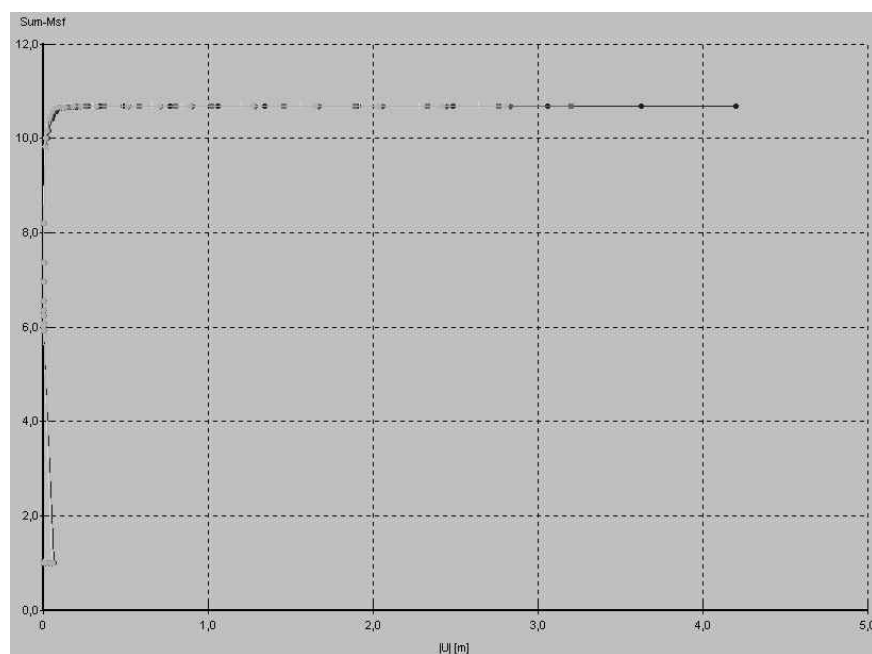
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 73: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 1^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 74: Κατανομή των ολικών παραμορφώσεων στη μάζα του προτύπου για την 1^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης (υπόμνημα σε m).



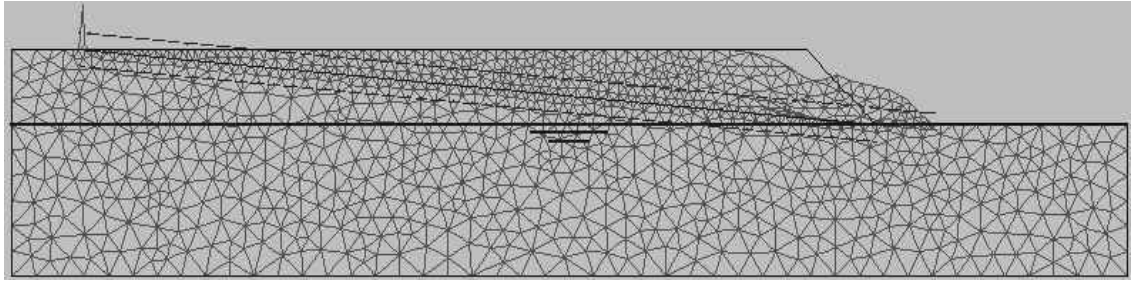
Σχήμα 75: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 1^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 2^η

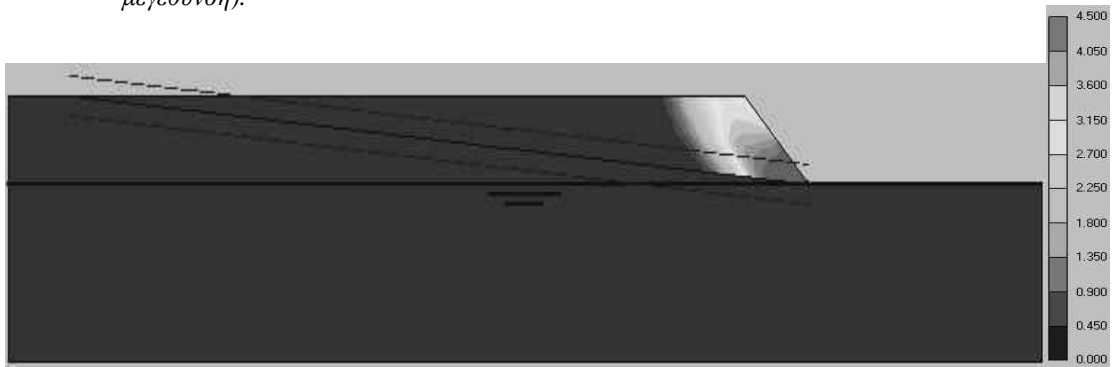
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{interface}$
25 m	45°	5°	0,5

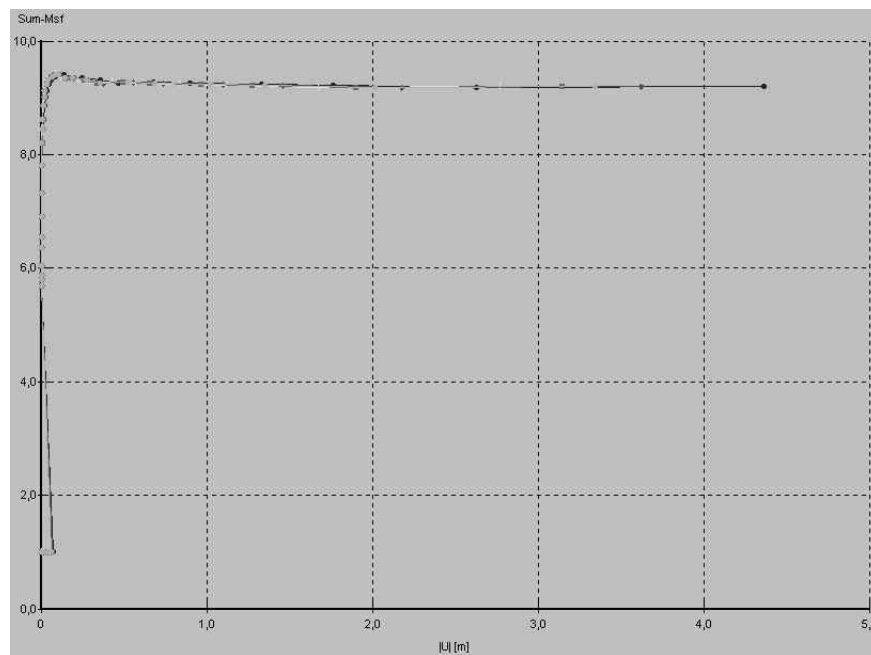
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 76: Παραμορφωμένος κάναβος για την 2^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 77: Κατανομή των ολικών παραμορφώσεων στη μάζα του προτύπου για την 2^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης (υπόμνημα σε m).



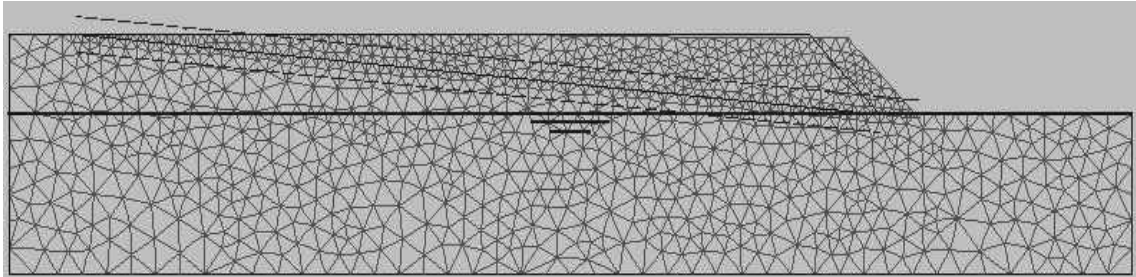
Σχήμα 78: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 2^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 3^η

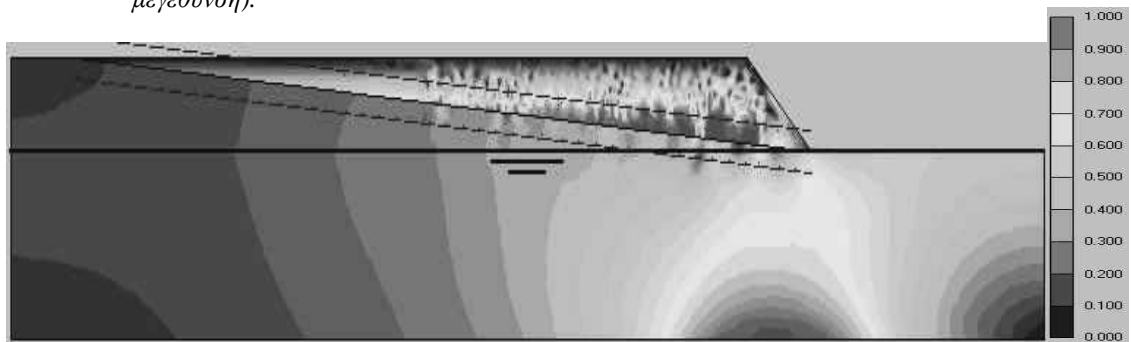
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{interface}$
25 m	45°	5°	0,15

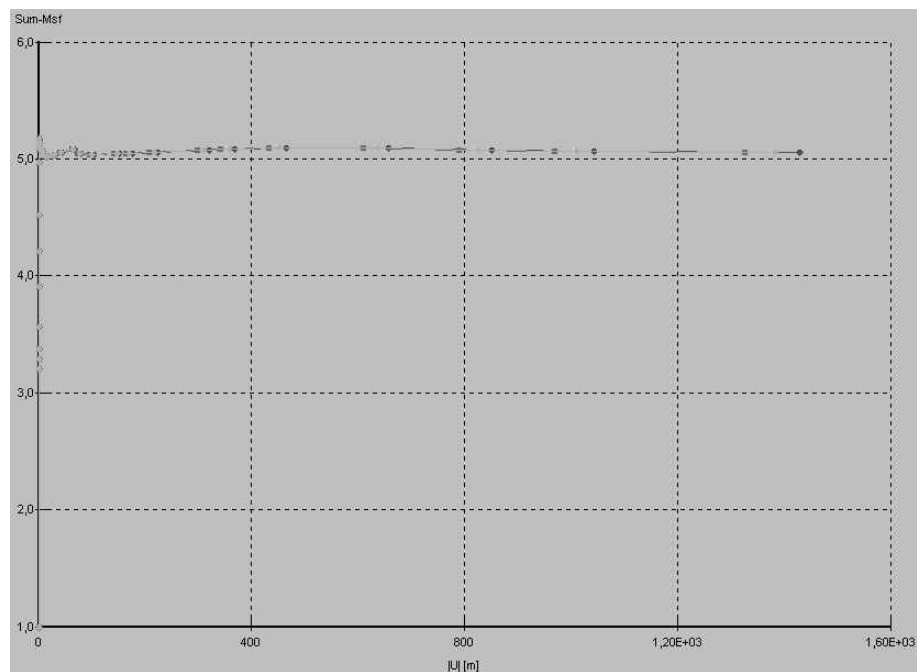
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40.



Σχήμα 79: Παραμορφωμένος κάναβος για την 3^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 80: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 3^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



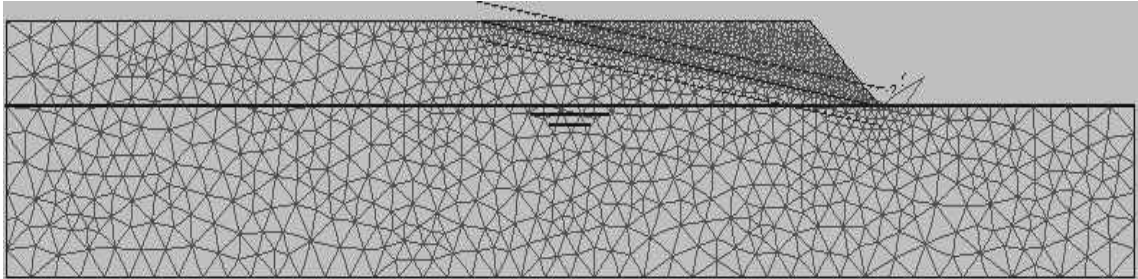
Σχήμα 81: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 3^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 4^η

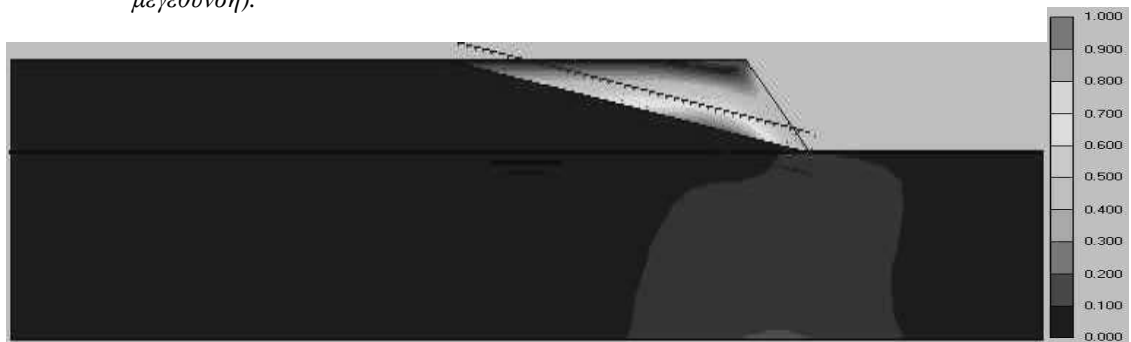
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{\text{interface}}$
25 m	45°	10°	0,5

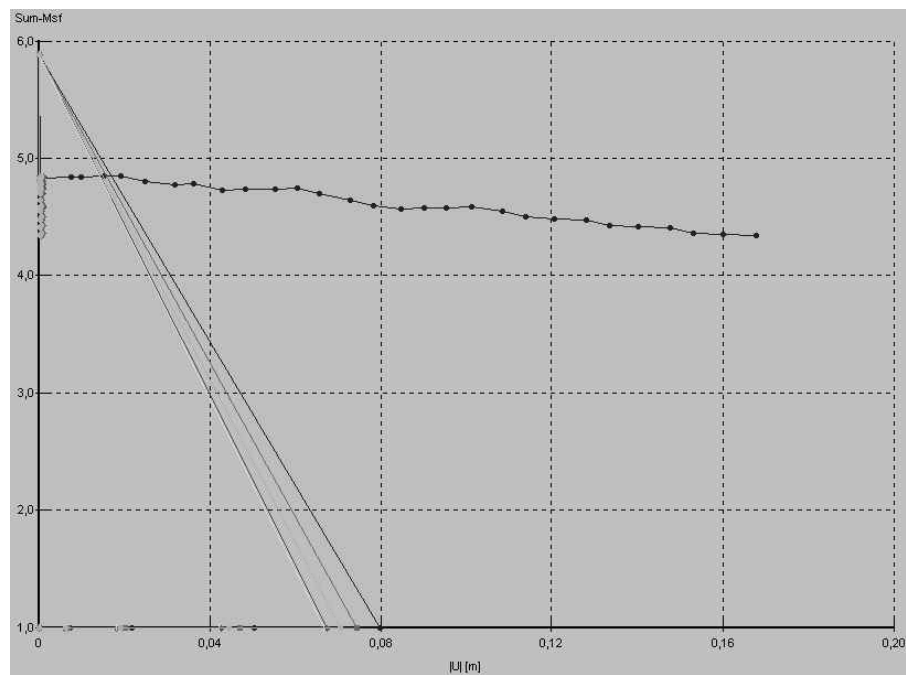
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 82: Παραμορφωμένος κάναβος για την 4^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 83: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 4^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



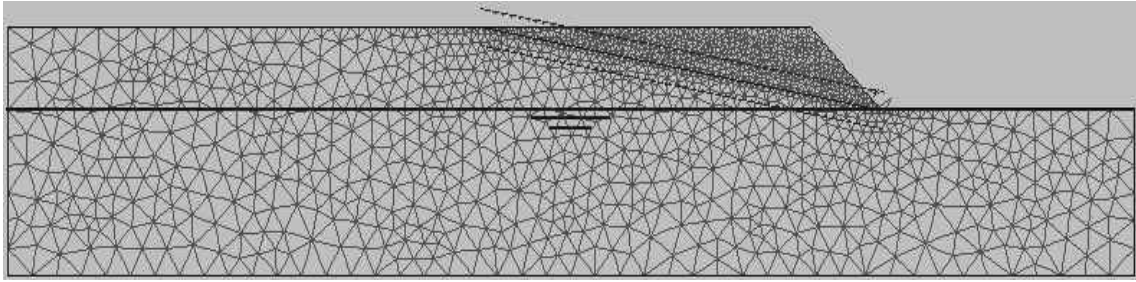
Σχήμα 84: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 4^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 5^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{\text{interface}}$
25 m	45°	10°	0,15

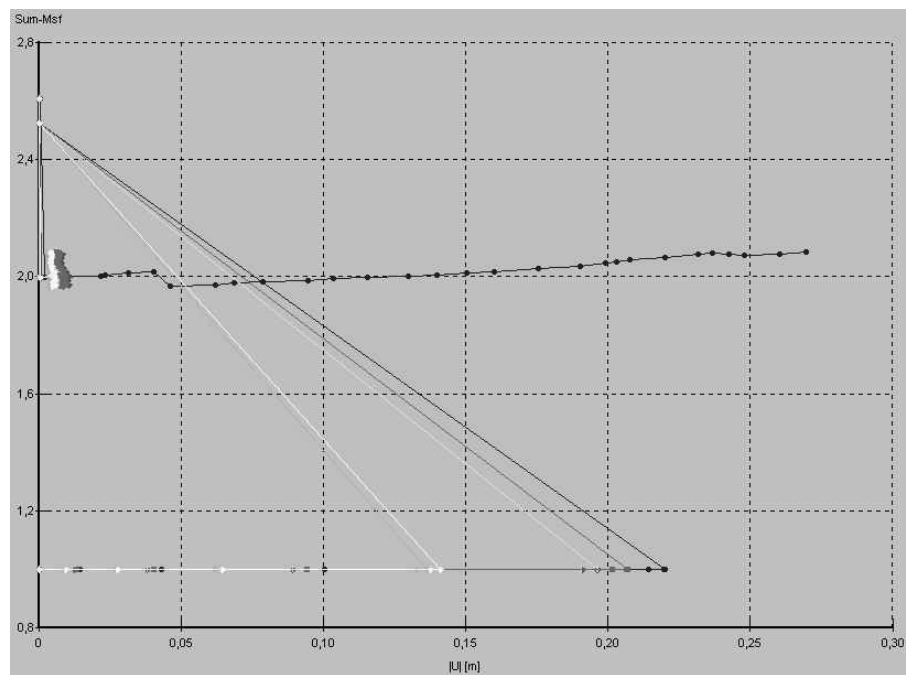
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 85: Παραμορφωμένος κάναβος για την 5^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 86: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 5^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



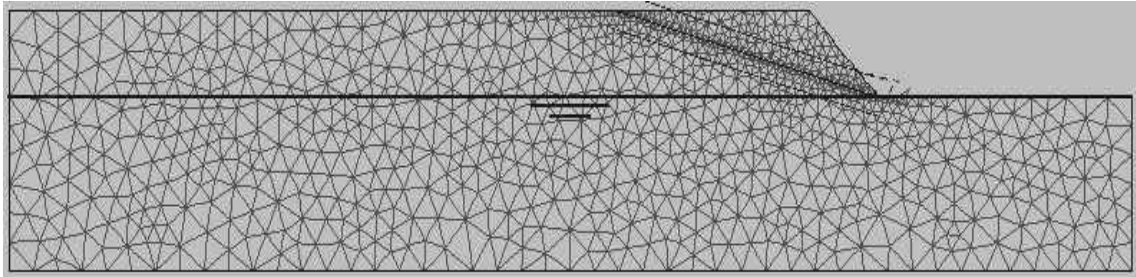
Σχήμα 87: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 5^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 6^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση διεπιφάνειας	$R_{\text{interface}}$
25 m	45°	15°	0,8

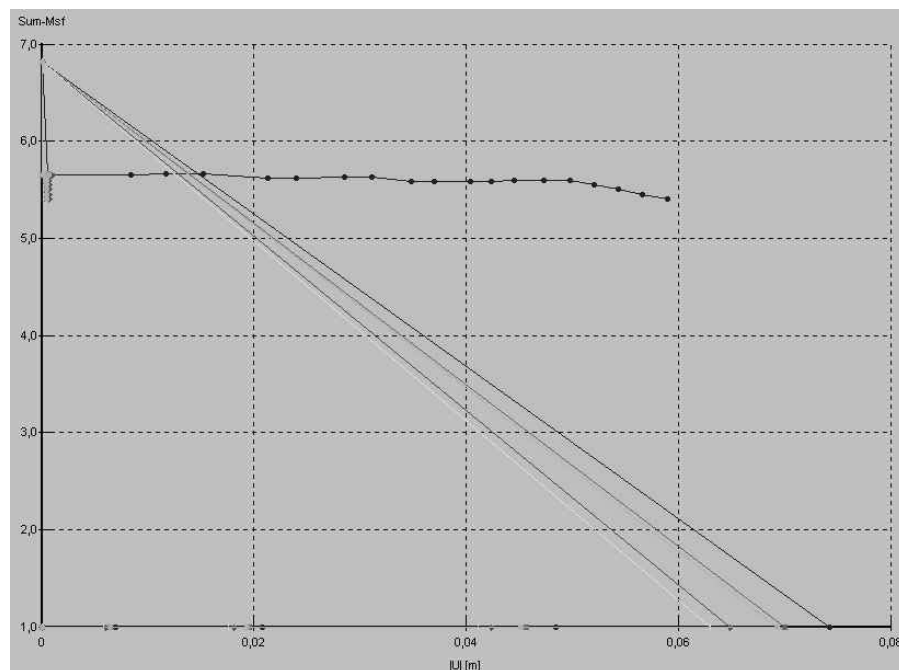
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 88: Παραμορφωμένος κάναβος για την 6^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 89: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 6^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



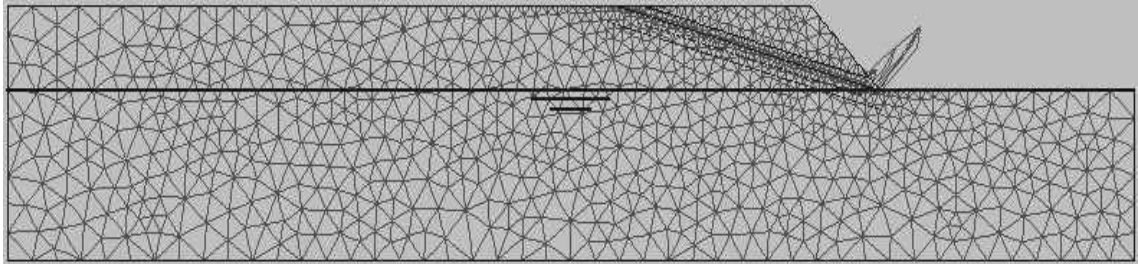
Σχήμα 90: Διάγραμμα ΣM_{sf} – μέτρου της μετατόπισης u της 6^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 7^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Συνοχή αργίλου	Πάχος αργίλου	$R_{\text{interface}}$
25 m	45°	15°	150 kN/m ²	1,25 m	0,8

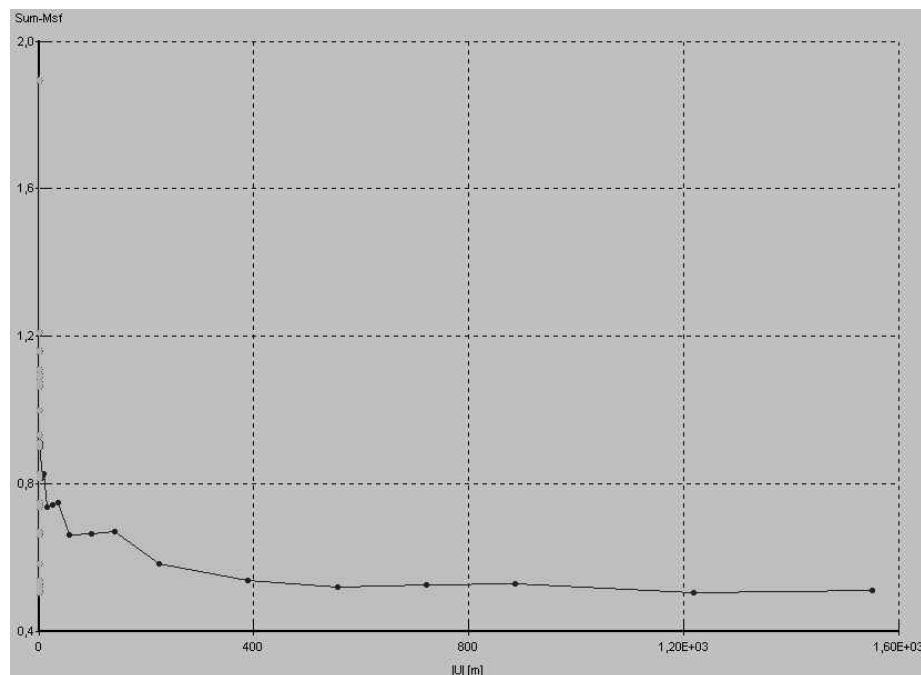
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 91: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 7^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 92: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 7^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



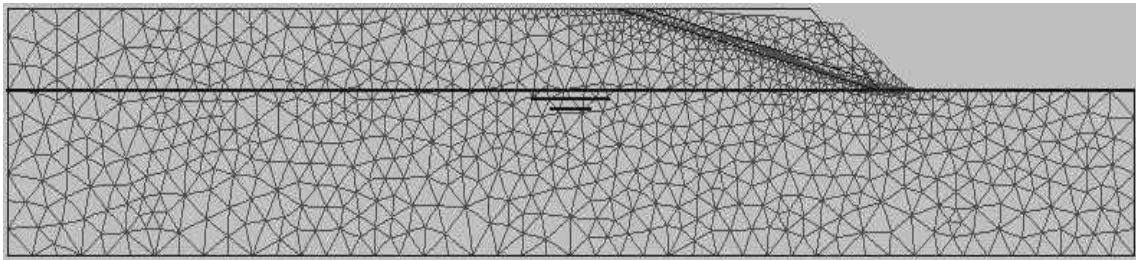
Σχήμα 93: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 7^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 8^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Συνοχή αργίλου	Πάχος αργίλου	$c_{\text{increment}}$ ψαμμίτη	$E_{\text{increment}}$ ψαμμίτη
25 m	45°	10°	150 kN/m ²	2,5 m	0,5kN/m ² /m	2,0kN/m ² /m

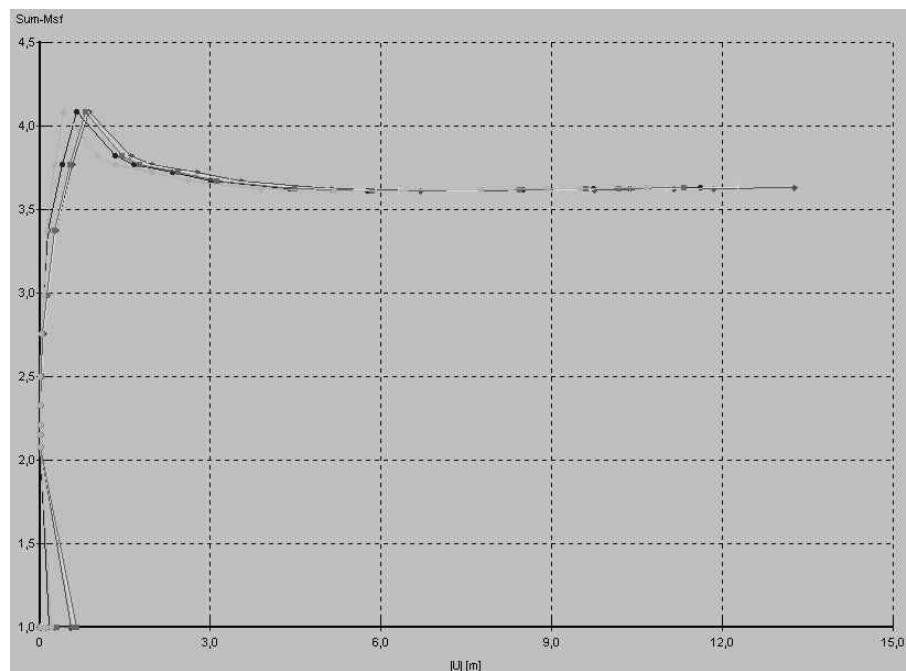
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 20. Επίσης στη 2^η φάση: ανεκτό σφάλμα = 0,04 και μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60.



Σχήμα 94: Παραμορφωμένος κάναβος για την 8^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 95: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 8^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



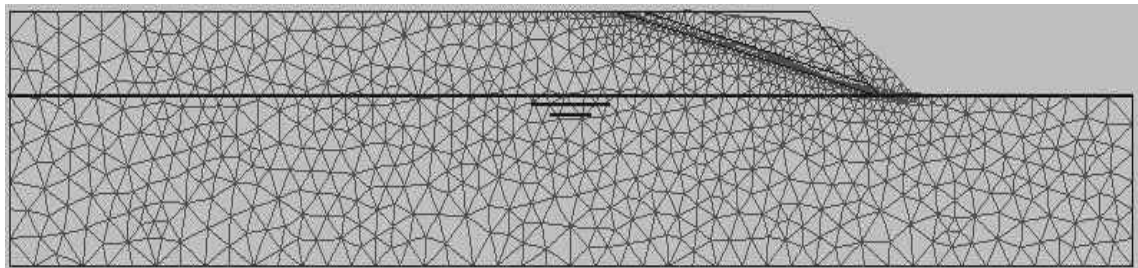
Σχήμα 96: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 8^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 9^η

Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς:

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Συνοχή αργίλου	Πάχος αργίλου	$c_{\text{increment}}$ υλικών	$E_{\text{increment}}$ υλικών
25 m	45°	10°	150 kN/m ²	2,5 m	0,5kN/m ² /m	2,0kN/m ² /m

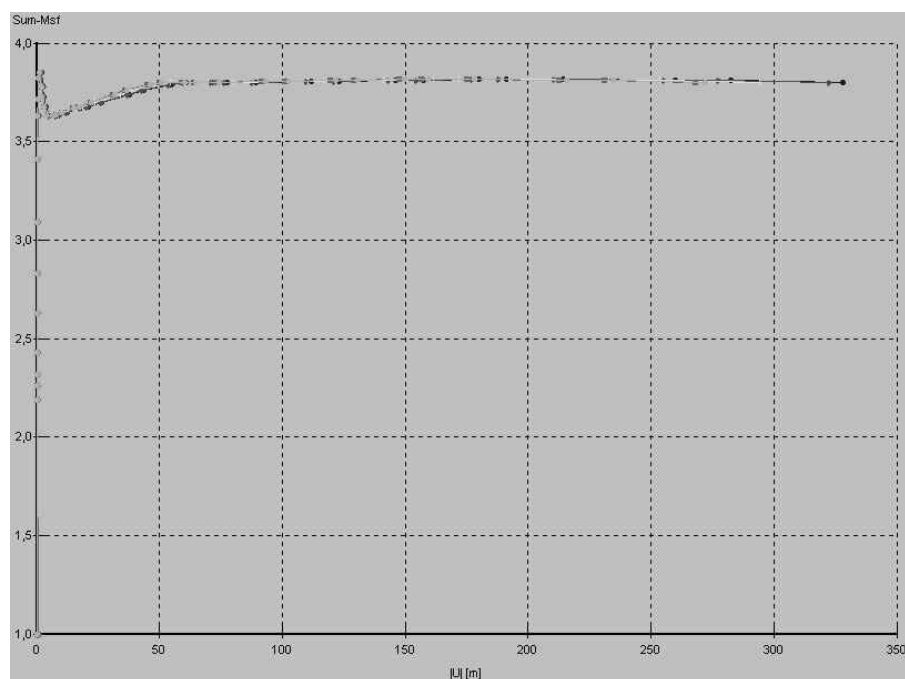
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 40. Επίσης στη 2^η φάση: ανεκτό σφάλμα = 0,04 και μέγιστος αριθμός επαναλήψεων = 60.



Σχήμα 97: Παραμορφωμένος κάνναβος για την 9^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 98: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 9^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



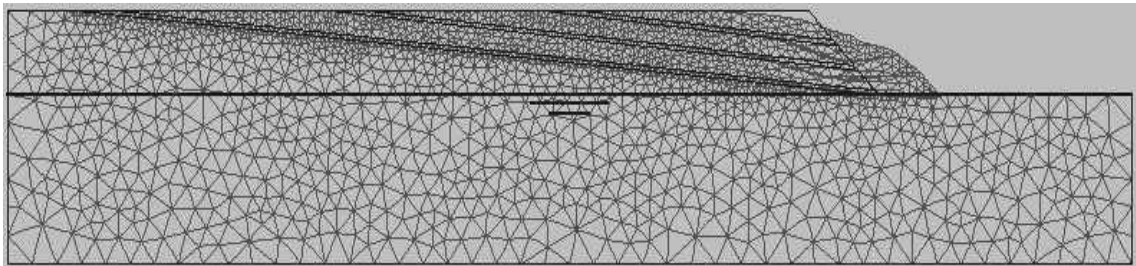
Σχήμα 99: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 9^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 10^Η

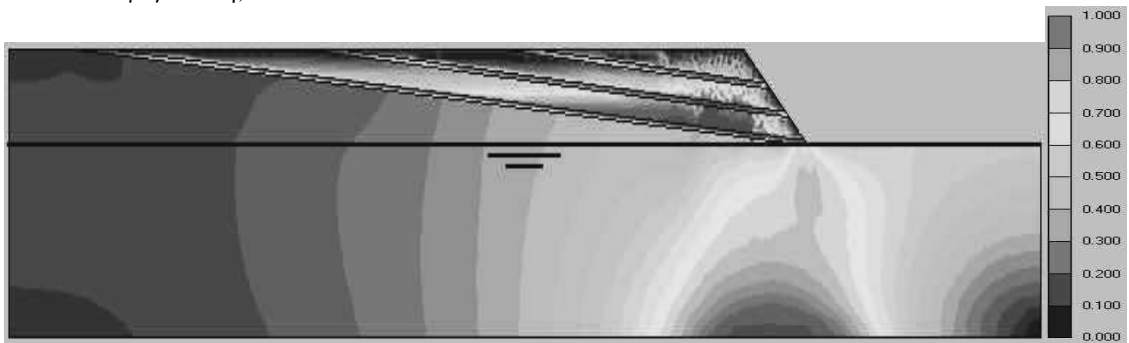
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς με πολλαπλά στρώματα αργίλου:

Υψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Συνοχή αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	5°	150 kN/m ²	1,25 m

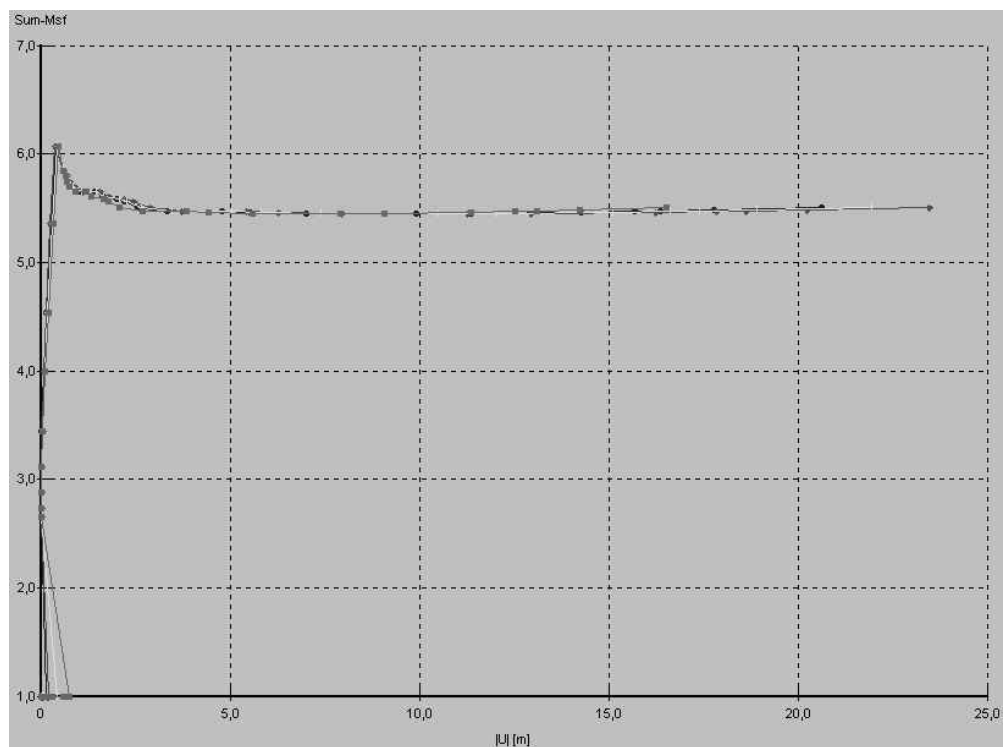
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 100: Παραμορφωμένος κάναβος για την 10^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 101: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 10^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



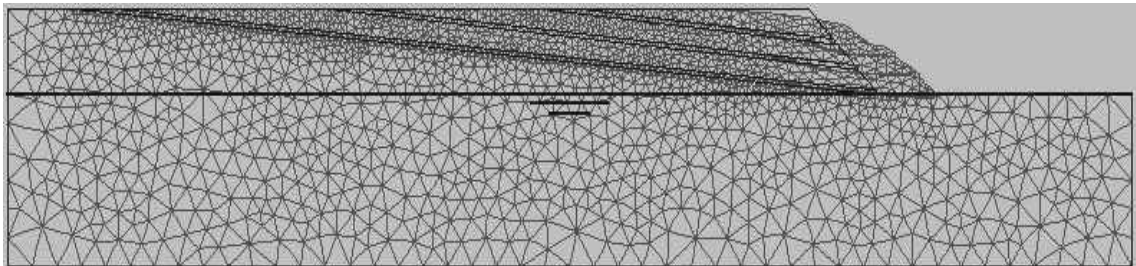
Σχήμα 102: Διάγραμμα ΣMsf – μέτρου της μετατόπισης u της 10^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.

ΕΠΙΛΥΣΗ 11^η

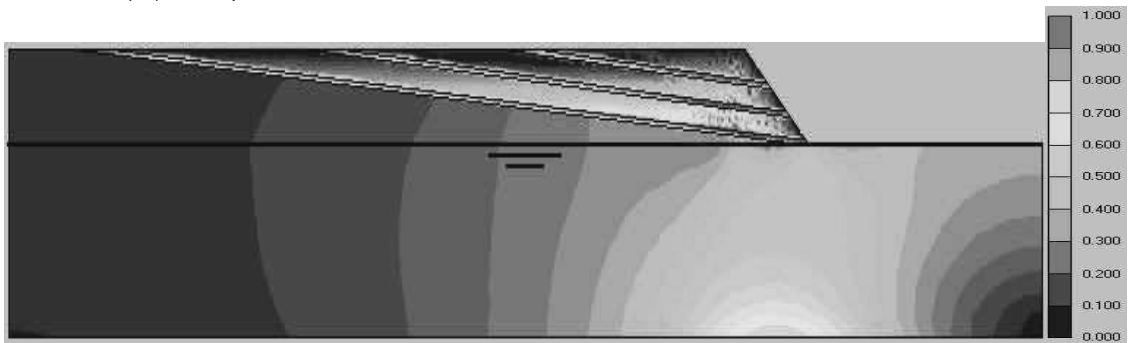
Γεωμετρικά στοιχεία πρανούς με πολλαπλά στρώματα αργίλου:

Υψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλου	Συνοχή αργίλου	Πάχος αργίλου
25 m	45°	5°	50 kN/m ²	1,25 m

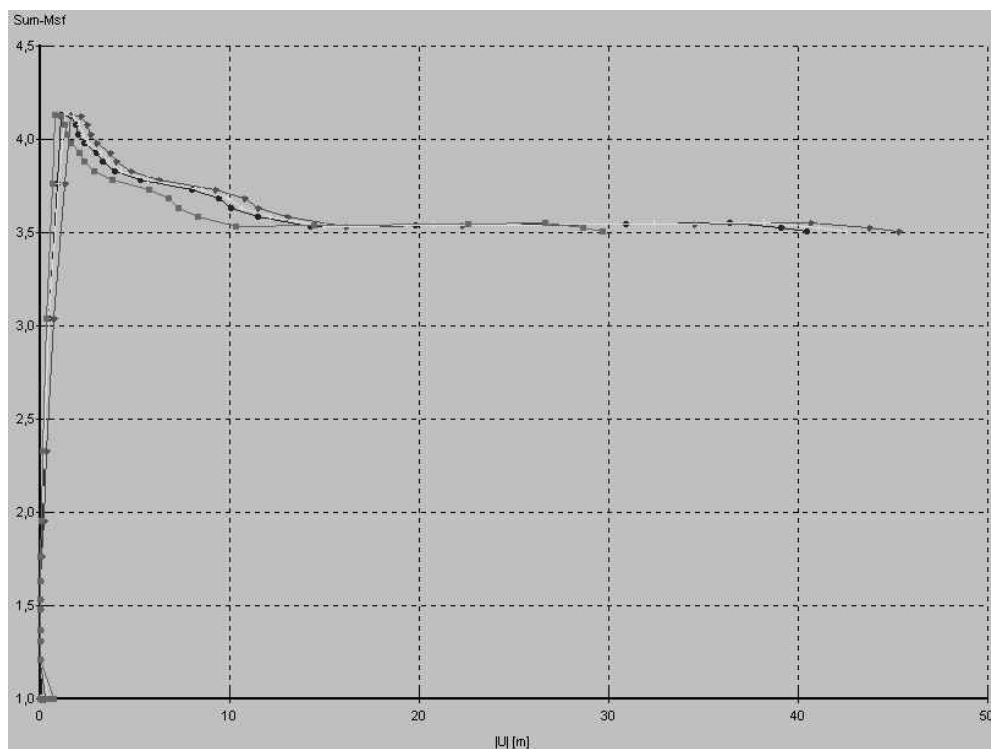
Ιδιότητες υλικών και χαρακτηριστικά φάσεων υπολογισμών όπως αναφέρονται στους Πίνακες 3, 4 εκτός από το ότι στην 3^η φάση τα βήματα υπολογισμών ορίστηκαν σε 30.



Σχήμα 103: Παραμορφωμένος κάναβος για την 11^η περίπτωση επίλυσης προηγμένου μοντέλου (σχήμα σε μεγέθυνση).



Σχήμα 104: Κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων στη μάζα του προτύπου για την 11^η περίπτωση σύνθετης επίλυσης.



Σχήμα 105: Διάγραμμα ΣΜsf – μέτρου της μετατόπισης u της 11^{ης} περίπτωσης επίλυσης προηγμένου προτύπου.