



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***«ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ & ΟΡΙΑΚΗΣ
ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ»***

ΜΠΟΥΝΟΥ ΑΘ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ
Λέκτορας	Εμμ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΪΟΣ 2012

Αφιερώνεται,

*στους δικούς μου αγαπημένους ανθρώπους,
αυτούς που υπήρξαν, υπάρχουν και θα υπάρξουν στη ζωή μου.*

ΜΠΟΥΝΟΥ ΑΘ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***«ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ & ΟΡΙΑΚΗΣ
ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ»***

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΛΑΚΤΥΛΟΣ
Λέκτορας	Εμμ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΪΟΣ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον» και έχει θέμα την «Συγκριτική αξιολόγηση αριθμητικών επιλύσεων του προβλήματος της ευστάθειας πρανών με τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών & οριακής ισορροπίας».

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της δυναμικότητας των υπολογιστικών συστημάτων, στις αναλύσεις ευστάθειας γεωτεχνικών κατασκευών, προτιμούνται οι αριθμητικές μέθοδοι έναντι αυτών της οριακής ισορροπίας, κυρίως για την καλή προσομοίωση των προβλημάτων και των ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν τα εδαφικά υλικά στα πρανή.

Συνηθίζεται, σε προβλήματα ευστάθειας να χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον, η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, λόγω του ότι η επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών αρχικά χρειαζόταν πολύ περισσότερο χρόνο επίλυσης, όμως αυτό με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας έχει πια εξαλειφθεί. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι πιο άμεση στους υπολογισμούς σε σχέση με την έμμεση επίλυση που πραγματοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία, και αυτό την καθιστά ταχύτερη.

Σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας σε προβλήματα ευστάθειας πρανών με την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα Flac/Slope), και σύγκριση αυτών με τις μεθόδους Οριακής Ισορροπίας (μέθοδος Σφηνοειδούς Τεμάχους) και Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS v.7), για εδαφικά πρανή απλής γεωμετρίας.

Η μοντελοποίηση των προς διερεύνηση πρανών πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο FLAC/Slope v.6, της εταιρείας Itasca Consulting Group. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method - FDM) για επίλυση σε δύο διαστάσεις. Το φιλικό περιβάλλον εργασίας προς

το χρήστη, η ταχύτητά του και η ακρίβεια που προσφέρει, το καθιστά κατάλληλο για την ανάλυση ευστάθειας πρανών.

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσέγγιση του προβλήματος ευστάθειας εδαφικών πρανών με την κατασκευή ενός θεωρητικού μοντέλου απλής εξωτερικής γεωμετρίας, αλλά με διαδοχικές επιμέρους επιλύσεις, με διαφοροποίηση στις ιδιότητες των υλικών και στην εσωτερική τους γεωμετρία.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη υποστήριξη, συμπαράσταση, κατανόηση και υπομονή ορισμένων προσώπων, εντός κι εκτός του ιδρύματος, τα οποία και θα ήθελα να τους αποδώσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και μέντορά μου, κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία για την άψογη συνεργασία μας στην εργασία αυτή, αλλά και καθ' όλα τα χρόνια της εκπαιδευτικής μου πορείας στο Τμήμα. Οι συμβουλές του και η υποδειγματική του υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια, αποτελούν αξίες οι οποίες με συντροφεύουν και βοηθούν στην εξελικτική πορεία μου ως άνθρωπο, αλλά και ως επαγγελματία Μηχανικό.

Τον Λέκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Εμμανουήλ Στειακάκη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, για το χρόνο που διέθεσε για την αξιολόγηση της εργασίας μου, καθώς και για τη συμπαράστασή του τα βράδια μελέτης κι εκπόνησης εργασιών κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, στον δεύτερο όροφο του κτιρίου M1.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και τη διάθεσή του να αφιερώσει μέρος από τον πολύτιμο χρόνο του για την αξιολόγηση της εργασίας μου. Επίσης τον ευχαριστώ, διότι η διδασκαλία του αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στο ενδιαφέρον μου για τα γεωτεχνικά έργα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους και εργαστηριακούς βοηθούς του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων, κα Σταθογιάννη Φωτεινή και κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο, για τη σημαντική ψυχολογική τους υποστήριξη· την Γραμματέα του τμήματος μας, κα Παγώνα Μακρή και την κα Τούλα Γρυσπολάκη, για τη διευκόλυνση όλων των διαδικασιών, την εμπύχωσή τους και τα χαμόγελά τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τους καρδιακούς μου φίλους και συναδέλφους, κα Στέλλα Ράκα μετά του συζύγου της κ. Γεώργιο Κρητικάκη και των αγγέλων τους, Έκτορα και Αλκυόνη, για την υποστήριξή τους και τη φιλοξενία τους, κατά τα διαστήματα παραμονής μου στα Χανιά, προς ολοκλήρωση και παρουσίαση της διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, για την αφειδώς προσφερόμενη ηθική και ψυχολογική συμπαράσταση, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα τους είμαι για πάντα ευγνώμων για τα εφόδια που μου παρείχαν, έπειτα από προσωπικό τους κόπο, και κυρίως για τις αξίες τις οποίες μου μετέδωσαν. Σίγουρα ότι κι αν πω θα είναι λίγο, απλά τους ευχαριστώ και τους αγαπώ με όλη τη δύναμη της ψυχής μου...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	 4
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	4
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΑΝΟΥΣ – ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ.....	4
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	7
2.3.1. Αστοχία Πτώσης /Κατάπτωσης.....	12
2.3.2. Αστοχία Ανατροπής.....	12
2.3.3. Αστοχία Ολίσθησης.....	14
2.3.3.1 Επίπεδη αστοχία	14
2.3.3.2 Αστοχία σφήνας.....	15
2.3.3.3 Κυκλική ολίσθηση	15
2.3.3.4 Περιστροφική ολίσθηση	16
2.3.3.5 Μεταθετική ολίσθηση.....	17
2.3.4. Πλευρική έκταση	18
2.3.5. Ροές.....	19
2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	21
2.4.1 Επιρροές από τη φύση	22
2.4.2 Ανθρώπινες Επιρροές	23
2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	25
2.5.5.1 Ενίσχυση με τσιμεντενέσεις	33
2.5.5.2 Ενίσχυση με αγκυρώσεις	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	39
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ	39
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	39
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	42
3.2.1 Ανάλυση Σφηνοειδούς Τεμάχους	43
3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	45
3.3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	47
3.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	58
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC/SLOPE	58
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	58
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	58
4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC	58
4.3 ΒΑΣΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ FLAC/SLOPE	62
4.4 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLAC/SLOPE	64
4.5 ΣΥΝΟΨΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ	67
4.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	69
4.7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	70
4.7.1 Στάδιο Εισαγωγής Μοντέλων (Models Stage)	70
4.7.2 Στάδιο Κατασκευής (Build Stage)	71
4.7.3 Στάδιο Επίλυσης (Solve Stage)	71
4.7.4 Στάδιο Εκτύπωσης (Plot Stage)	71
4.8 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC/SLOPE	72
4.8.1 Επιλογή δυνατοτήτων μοντέλου	72
4.8.2 Ρύθμιση ενός έργου πρανούς	73
4.8.3 Δημιουργία μοντέλου	74

4.8.4	Προσθήκη στρωμάτων.....	78
4.8.5	Εισαγωγή υλικών και ιδιοτήτων τους.....	80
4.8.6	Πρόσθεση ασθενούς επιπέδου	82
4.8.7	Εισαγωγή Υδροφόρου Ορίζοντα	85
4.8.8	Εφαρμογή επιφανειακών φορτίων	88
4.8.9	Εφαρμογή δομικής ενίσχυσης.....	91
4.8.10	Εξαίρεση περιοχών από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας	96
4.8.11	Στάδιο επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας.....	98
4.8.12	Δημιουργία Εκτύπωσης Αποτελεσμάτων	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		109
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ		
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ		
ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ		109
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	109
5.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου προσομοίωσης.....	111
5.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΡΑΝΟΥΣ	112
5.2.1	Γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης.....	112
5.2.2	Κατασκευή μοντέλου	112
5.2.3	Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών μοντέλου	113
5.2.4	Προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα	116
5.2.5	Στάδιο επίλυσης μοντέλου προσομοίωσης.....	117
5.3	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ FLAC/SLOPE	120
5.3.1	1η Περίπτωση	120
5.3.2	2 ^η Περίπτωση	121
5.3.3	3 ^η Περίπτωση	122
5.3.4	4 ^η Περίπτωση	123

5.4	ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	125
5.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ FS.....	126
5.6	ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	128
5.6.1	Εδαφικά σύνθετα πρότυπα με πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου .	128
1 ^η	Περίπτωση	129
2 ^η	Περίπτωση	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		131
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		131
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	131
6.2	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΕΚΔΟΣΕΩΝ v.4 & v.6 ΤΟΥ FLAC/SLOPE	138
6.3	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	141
6.3.1	1 ^Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ.....	142
6.3.2	2 ^Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	143
6.3.3	3 ^Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ.....	144
6.3.4	4 ^Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	145
6.4	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ FLAC/SLOPE	148
6.5	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		154
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MOHR-COULOMB, ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLAC		154
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		162
Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Ανάλυσης Με Το Πρόγραμμα FLAC/Slope		162

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου ονομάζονται **πρανή**. Από τη κλίση και μόνο των σχηματισμών, τα πρανή παρουσιάζουν αστάθεια λόγω της παρουσίας των διατμητικών τάσεων. Οι εδαφικές μάζες ή βραχώδης μάζες, οι οποίες βρίσκονται όπισθεν κεκλιμένης φυσικής επιφάνειας, εμφανίζουν τη τάση να μετακινηθούν προς τα κάτω, λόγω της βαρύτητας (Terzaghi, 1943).

Τα πρανή διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

Τα φυσικά πρανή, τα οποία εμφανίζονται στη φύση με τη μορφή συσσωρευμένης εδαφικής μάζας υπό κλίση, (όπως π.χ. μια πλαγιά λόφου, όχθη ποταμού ή λίμνης), έχουν σχηματιστεί σε βάθος χρόνου και είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών (π.χ. διάβρωση εδαφικών στρώσεων) χωρίς καμιά ανθρώπινη παρέμβαση.

Τα τεχνητά πρανή, είναι ανθρώπινες κατασκευές και συναντώνται σε διάφορα γεωτεχνικά και μεταλλευτικά έργα, (όπως π.χ. εξορυκτικές δραστηριότητες, έργα οδοποιίας και χωμάτινα φράγματα). Προκύπτουν από την εκσκαφή του φυσικού εδάφους ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού (επιχωματώσεις). Επομένως, διακρίνονται δύο κατηγορίες τεχνητών πρανών, τα πρανή ορυγμάτων και τα πρανή επιχωμάτων.

Με το πέρασμα του χρόνου τα πρανή βιώνουν διάφορες καταστάσεις ισορροπίας που κυμαίνονται από ευσταθείς έως οριακά ευσταθείς και ασταθείς. Η αστοχία των πρανών (φυσικών ή τεχνητών) είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εξέλιξης της γεωλογικής και γεωτεχνικής ιστορίας κάθε περιοχής (Abramson, 2002).

Ο προβληματισμός σχετικά με τη σταθερότητα είτε των νέων πρανών που σχηματίζονται από χωματοургικές εργασίες, είτε των φυσικώς εμφανιζόμενων πρανών είτε των τεχνητών, είναι μεγάλος και έχει αντίστοιχο αντίκτυπο στα γενικότερα έργα μηχανικού. Κατά την κατασκευή για παράδειγμα των σιδηροδρομικών γραμμών, αυτοκινητοδρόμων, καναλιών και εκσκαφών, πρέπει να διενεργείται ανάλυση των σχετικών πρανών και ενδεχομένως, να γίνουν διορθωτικές εργασίες όπου απαιτείται.

Η ευστάθεια των πρανών αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των εδαφομηχανικών εδώ και πολλές δεκαετίες, καθώς εμπλέκονται πολλοί παράγοντες επιρροής του φαινομένου της αστοχίας. Για αυτό το λόγο, η ανάγκη για διερεύνηση και ανάπτυξη βέλτιστων τρόπων επίλυσης και κυρίως πρόβλεψης αστοχίας στα πρανή συνεχώς αυξάνεται.

Οι συνέπειες της αστοχίας μπορεί να είναι μηδαμινές έως καταστροφικές ανάλογα με τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των υλικών του πρανού. Τα αποτελέσματά της αστοχίας, πιθανώς να έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη βιωσιμότητα πολλών οικισμών, τις συνθήκες θεμελίωσης τεχνικών έργων, τη λειτουργία δικτύων υποδομής και τη καταλληλότητα των πληγέντων περιοχών για διάφορες χρήσεις.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η προσομοίωση προβλημάτων ευστάθειας πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας, και έπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εξήχθησαν με τις μεθόδους της οριακής ισορροπίας και των πεπερασμένων στοιχείων.

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ευστάθειας με την επίλυση διαφόρων εναλλακτικών περιπτώσεων εδαφικού προτύπου με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, βάσει κάποιων περιπτώσεων για τις οποίες υπήρχαν ήδη αποτελέσματα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.⁰¹

Η προσέγγιση του προβλήματος προς διερεύνηση της ευστάθειας εδαφικών πρανών, είναι απλή και αποτελεί στην ουσία την κατασκευή μιας σειράς θεωρητικών επιλύσεων ίδιας εξωτερικής γεωμετρίας, με διαφοροποίηση στις ιδιότητες των υλικών και της γεωμετρίας τους εσωτερικά. Για την προσομοίωση των εδαφικών πρανών γίνεται χρήση του αριθμητικού κώδικα FLAC/Slope (έκδοση 4 και 6) της εταιρείας

Itasca Consulting Group, το οποίο είναι τμήμα του προγράμματος FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). Το FLAC/Slope, αποτελεί ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών που αναπτύχθηκε για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής, προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά γεωτεχνικών κατασκευών, που είναι πιθανό να αστοχήσουν. Στη συνέχεια παρατίθεται η διάρθρωση της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της ευστάθειας των πρανών, περιγραφή των τρόπων αστοχίας των πρανών, των παραγόντων που επηρεάζουν τη σταθερότητα ενός πρανούς, καθώς γίνεται και περιγραφική αναφορά μερικών τρόπων αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου.

Έπειτα, στο Κεφάλαιο 3, γίνεται αναφορά στην ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς και τότε αυτό παραμένει σταθερό. Γίνεται αναφορά στις μεθόδους οριακής ισορροπίας και των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης που αφορούν την παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 4, περιγράφονται τα βασικά θεωρητικά χαρακτηριστικά του κώδικα FLAC, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο του υποπρογράμματος FLAC/Slope. Στη συνέχεια του κεφαλαίου πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των υπολογιστικών χαρακτηριστικών του λογισμικού εργαλείου FLAC/Slope, με το οποίο γίνεται η παραμετρική ανάλυση, όπως επίσης και οι δυνατότητές του, στη δισδιάστατη προσομοίωση εδαφικών πρανών.

Στο Κεφάλαιο 5, παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με τα αντίστοιχα των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και της οριακής ισορροπίας, τα οποία ανακτήθηκαν από τη μεταπτυχιακή διατριβή της Καλογήρου Ειρήνης (2003). Επίσης, πραγματοποιείται διερεύνηση ενός πιο σύνθετου εδαφικού προτύπου, και σύγκριση των αποτελεσμάτων της, με τα αντίστοιχα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 6^ο Κεφάλαιο, παρατίθενται τα συνολικά αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που έλαβε χώρα στο 5^ο Κεφάλαιο, τα γενικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τη χρήση του προγράμματος FLAC/Slope, οι διαφορές που εντοπίστηκαν μεταξύ των δύο εκδόσεων 4 και 6 του προγράμματος, καθώς και διερεύνηση της μεθόδου στο συγκεκριμένο πρότυπο, με αλλαγή της γεωμετρίας του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις περισσότερες εφαρμογές, ο πρωταρχικός σκοπός της ανάλυσης ευστάθειας πρανών είναι να συμβάλει στον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των γενικότερων εκσκαφών, (επιχωμάτων, χωμάτων φραγμάτων, χώροι υγειονομικής ταφής, κ.ά).

Η αυξανόμενη ζήτηση για διαμόρφωση πρανών σε κατασκευαστικά και μεταλλευτικά έργα, έχει αυξήσει την ανάγκη για την κατανόηση των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας πρανών, των μέσων έρευνας, παρατήρησης και καταγραφής των προβλημάτων σταθεροποίησης, και τις μεθόδους σταθεροποίησης για την επίλυση προβλημάτων ευστάθειας πρανών (Abramson et al, 2002).

2.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΑΝΟΥΣ – ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ

Βασικές Έννοιες

Η αστοχία υπαίθριων φυσικών ή τεχνητών πρανών εκδηλώνεται με τη μορφή «κατολίσθησης».

Ο όρος κατολίσθηση αναφέρεται στις «μετακινήσεις εδαφικών και βραχωδών μαζών ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρανή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, η οποία υπερβαίνει την αντίσταση τριβής για κίνηση προς τα κάτω (Εξαδάκτυλος, 2002).

Ο όρος κατολισθητικά φαινόμενα είναι ο πλέον αποδεκτός ο οποίος περιλαμβάνει όλο το εύρος αστοχιών των πρανών, όπως είναι οι ολισθήσεις, ανατροπές, καταπτώσεις κλπ, οι οποίες πραγματοποιούνται σε ξηρά και υποθαλάσσια, εφόσον ο όρος κατολίσθηση περιλαμβάνει μόνο τις ταχέως εκδηλούμενες κινήσεις εδαφικών μαζών.

Γενικά, έχουν αποδοθεί διάφοροι ορισμοί για το φαινόμενο της κατολίσθησης, όπως (Ρόζος, 2007):

- ✓ Ο **Terzaghi (1943)**, ορίζει την κατολίσθηση, ως «μία γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, εναπομείναντος εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους, μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω».
- ✓ Οι **Zaruba και Mencl (1969)**, ορίζουν την κατολίσθηση, σαν «μία γρήγορη κίνηση που οφείλται στην ολίσθηση πετρωμάτων ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο αδιατάρακτο τμήμα του, σε μία καλά διαχωρισμένη επιφάνεια».
- ✓ Ο **Varnes (1980)**, αντί για τον όρο κατολίσθηση, χρησιμοποιεί τον όρο κίνηση πρανών, και με αυτόν εμπερικλείει κάθε κίνηση πρανούς η οποία οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό.

Η μετακίνηση της εδαφοβραχώμαζας κατά την αστοχία ενός πρανούς, οφείλεται σε βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται στο πρανές οι οποίες όταν υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού, λαμβάνει χώρα η μετακίνηση της εδαφικής μάζας (Εξαδάκτυλος, 2002).

Η διατμητική αντοχή του εδάφους ισούται με το άθροισμα της αντοχής που οφείλεται στη συνοχή, και της αντοχής που οφείλεται στην εσωτερική τριβή. Η αύξηση της διατμητικής αντοχής ενός υλικού εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται σε διατμητικές δυνάμεις, όπως αποκαλείται Φέρουσα Ικανότητα του υλικού (Στειακάκης, 2004).

Η έννοια της συνοχής c (cohesion) αναφέρεται στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των εδαφικών κόκκων (ικανότητα συγκόλλησης κόκκων), με συνέπεια η αντοχή ενός εδαφικού υλικού να είναι ανάλογης των στερεών σωμάτων.

Η συνοχή στα εδαφικά υλικά εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό, την πυκνότητα και την πλαστικότητα του εδάφους. Η εσωτερική τριβή αναφέρεται στη τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των κόκκων του εδάφους, που

ουσιαστικά εκφράζεται με τη γωνία εμφάνισης/απόθεσης της μάζας του εδαφικού υλικού και το μέγεθός της εξαρτάται από το κάθετο φορτίο στην επιφάνεια ολίσθησης (πχ για ξηρή άμμο η γωνία είναι περίπου 30° , ενώ για μέτριας πλαστικότητας εδάφη είναι περίπου 15° (Αγιουτάντης, 2002).

Τα άμεσα αποτελέσματα των κατολισθήσεων είναι η καταστροφή περιουσιών ή ακόμη και απώλεια ανθρώπινων ζώων, και τα έμμεσα αποτελούν η απόφραξη ρεμάτων/ποταμών και η αλλοίωση αυτών με κορήματα και λάσπες, η καταστροφή αγροτικής γης κτλ. Από την άλλη πέραν του καταστρεπτικού τους χαρακτήρα, οι κατολισθήσεις συμβάλλουν στη δημιουργία νέας καλαίσθητης μορφολογίας στην περιοχή, λιμνών στις ορεινές περιοχές που αποτελούν χρήσιμους ταμιευτήρες νερού όπως για παράδειγμα η περίπτωση της περιοχής Μικρό Χωριό στην Ευρυτανία, με τη δημιουργία λίμνης (Εικόνα 2.1) και τοπογραφικών αξιοθέατων, έπειτα από δεινή κατολίσθηση το έτος 1963, με 13 θύματα.



Εικόνα 2.1: Αποτέλεσμα της κατολίσθησης το 1963, η δημιουργία λίμνης στην είσοδο του Μικρού Χωριού στην Ευρυτανία.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρονται οι τρόποι της αστοχίας ενός πρανούς, καθώς και οι παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν σε αυτή, και τέλος γίνεται αναφορά σε μεθόδους σταθεροποίησης πρανών που έχουν ήδη ή τείνουν να αστοχήσουν.

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Οι κατολισθήσεις ανήκουν σε έναν από τους δύο τύπους: βραδέως κινούμενες ή ταχέως κινούμενες. Ανάμεσα στους κυριότερους κινητήριους παράγοντες είναι η γεωλογία, η κλίση του πρανούς, η χρήση γης, η διαχείριση της γης και το βάθος διαπερατότητας στο νερό. Συνηθισμένοι παράγοντες ενεργοποίησης είναι οι έντονες

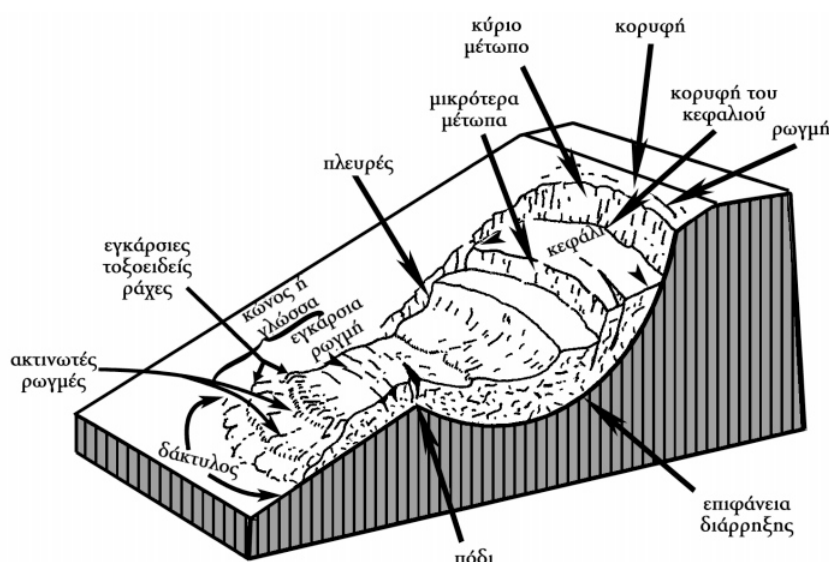
βροχοπτώσεις και το λιώσιμο του χιονιού, και οι λιγότερο συνηθισμένες είναι η αλλαγή χρήση της γης, σεισμικά γεγονότα, κλπ (Abramson et al, 2002).

Λόγω της γεωμετρίας των πρανών, υπάρχουν δύο ή και τρεις ελεύθερες επιφάνειες, λόγω των ετερογενών όγκων που μπορεί να εμπεριέχονται στην κύρια μάζα του πρανού. Σε αυτούς τους όγκους οφείλεται η πιθανότητα αστάθειας των πρανών. Ο τύπος της αστοχίας καθορίζεται από τον προσανατολισμό και τη θέση των ετερογενών όγκων, αλλά και από τον προσανατολισμό της εκσκαφής και της κλίσης του πρανού στην περίπτωση των τεχνητών πρανών (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Τα χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης διακρίνονται στα εξής μέρη (Abramson et al, 2002 & Στειακάκης, 2004):

1. Το κύριο μέτωπο κατακρήμνισης (main scarp): Είναι η απότομη επιφάνεια αδιατάρακτου εδάφους γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης, που προκαλείται από την απομάκρυνση του ολισθαίνοντα υλικού από το αδιατάρακτο υλικό. Η προέκταση της επιφάνειας της απόκρημνης αυτής πλευράς, κάτω από το υλικό που μετατοπίστηκε αποτελεί την επιφάνεια διάρρηξης.
2. Τα μικρότερα μέτωπα (minor scarp): Απότομες κρημνώδης επιφάνειες του υλικού που ολίσθησε (σαν ουλή).
3. Η κεφαλή (head): Τα ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος της επαφής ανάμεσα στο μετατοπισμένο υλικό και το κύριο μέτωπο.
4. Το πόδι ή ο πόδας (foot): Το μέρος του μετατοπισμένου υλικού που βρίσκεται κατάντη από το δάκτυλο. Η διατομή αυτή (συχνά θαμμένη) βρίσκεται, ανάμεσα στο κατώτερο μέρος της επιφάνειας διάρρηξης και στην αρχική επιφάνεια του εδάφους.
5. Ο δάκτυλος ποδός (toe): Το περιθώριο του υλικού που ολίσθησε, που είναι το πιο απομακρυσμένου από το κύριο μέτωπο.
6. Η κορυφή (Crown): Το υλικό που εξακολουθεί να παραμένει στη θέση του αδιάρρηκτο, και τοποθετείται στα υψηλότερα σημεία του κύριου μετώπου.
7. Οι πλευρές (sides): Οι πλευρές ελεύθερης επιφάνειας που δημιουργήθηκαν με την κατολίσθηση. Δεξιά πλευρά θεωρείται αυτή που βρίσκεται στο δεξί μας χέρι, έχοντας την πλάτη γυρισμένη στο κύριο μέτωπο.

8. Η επιφάνεια διάρρηξης ή ολίσθησης (surface of rupture): η επιφάνεια που διαμορφώνει το χαμηλότερο όριο του υλικού μετατόπισης και η οποία αποχωρίζει την ολισθαίνουσα μάζα από το σταθερό υπόβαθρο. Το ανώτερο τμήμα αυτής της επιφάνειας αντιστοιχεί στην επιφάνεια ολίσθησης του υλικού.
9. Κώνος ή Γλώσσα: Είναι η επιφάνεια η οποία δημιουργείται από τα υλικά που έχουν υπερβεί το πόδι της κατολίσθησης, και ολισθαίνουν πλέον στην αρχική επιφάνεια του εδάφους.
10. Ακτινωτές Ρωγμές: Ρωγματώσεις στον πόδα της κατολίσθησης.
11. Εγκάρσιες Ρωγμές: Αποτελούν τις διογκώσεις στον πόδα της κατολίσθησης
12. Εγκάρσιες τοξοειδείς ράχες: Είναι οι διογκώσεις στον πόδα της κατολίσθησης, οι οποίες αποτελούν τη κορυφή της ζώνης συσσώρευσης στην οποία η μετακινούμενη μάζα είναι πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.



Σχήμα 2.1: Τυπική κατολίσθηση στην οποία διακρίνονται τα επιμέρους τμήματα της όπως τοποθετήθηκε από Στειακάκη (2004).

Κατά τη κατολίσθηση των πρανών η αστοχία πραγματοποιείται κατά μια συγκεκριμένη επιφάνεια ή κατά συνδυασμό επιφανειών. Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των κατολισθήσεων, είναι σύμφωνα με το ποσοστό της κίνησης του πρανούς. Η κίνηση, σύμφωνα με Cruden και Varnes (1992) έχει εύρος τιμών από λιγότερο από 6 ίντσες ανά έτος, μέχρι περισσότερο από 5 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η κινηματική των κατολισθήσεων (δηλαδή, το πώς χαρακτηρίζεται η κίνηση καθ' όλη τη μετατοπισμένη μάζα), αποτελεί έναν άλλο τρόπο κατάταξης των κατολισθήσεων.

Γενικότερα, κατά τα έτη έχει υπάρξει πληθώρα ταξινομήσεων των κατολισθήσεων, αλλά η ταξινόμηση που χρησιμοποιείται πολύ και τείνει να επικρατήσει, είναι αυτή που έχει προτείνει το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας των Η.Π.Α., κι έχει τροποποιηθεί από τον Varnes (1978, 1980). Τελικώς, σύμφωνα με Cruden και Varnes (1992), υπάρχουν έξι διαφορετικοί κινηματικά τύποι, κίνησης κατολισθήσεων.

Οι επικρατέστεροι τρόποι μετακίνησης με τους οποίους κατολισθαίνουν τα πρανή είναι οι ακόλουθοι (Abramson et al, 2002):

- Κατάπτωση (fall),
- Λυγισμός/Ανατροπή (topple),
- Ολίσθηση (slide),
- Πλευρική Εξάπλωση/έκταση (lateral spread)
- Ροή (flow) και τέλος,
- η Σύνθετη ως μια έκτη επιλογή, η οποία δεν είναι επίσημη κατηγορία, αλλά χρησιμοποιείται συχνά σαν όρος και αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω.

Αυτές οι κατηγορίες επικρατούν στο μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των κατολισθήσεων και αφορούν το είδος της κίνησης και το τύπο του υλικού που μετακινείται.

Γίνεται συνοπτική παρουσίαση αυτών στον Πίνακα 2.1 και περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια της ενότητας.

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων όπως τοποθετήθηκαν οι Εξαδάκτυλος (2002) & Στειακάκης (2004).

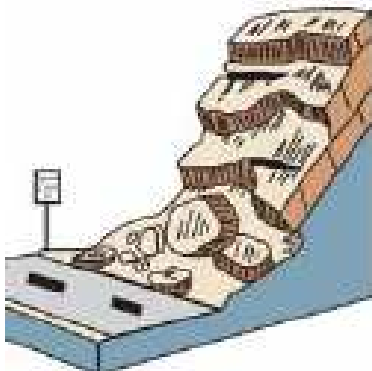
ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ			ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ	ΕΔΑΦΙΚΑ ΠΡΑΝΗ	
				ΚΟΡΗΜΑΤΑ (d>2mm)	ΓΕΩΨΛΙΚΑ (d<2mm)
Κατάπτωση (Fall)			Πτώσεις Βράχων	Πτώσεις κορημάτων (Debris Fall)	Πτώσεις γαιών (Earth Fall)
Λυγισμός & Ανατροπή (Toppling)			Ανατροπή Βράχων	Ανατροπή κορημάτων (Debris Topple)	Ανατροπή γαιών (Earth Topple)
Ολίσθηση (Slide)	Επίπεδη & Μεταθετική (Plannar & Translational)	Ένας όγκος (One Unit)	Επίπεδη & Κυκλική ολίσθηση βράχων	Επίπεδη & Κυκλική ολίσθηση κορημάτων	Επίπεδη & Κυκλική ολίσθηση γαιών
	Περιστροφική (Rotational)	Λίγοι όγκοι (Few Units)	Περιστροφική ολίσθηση βράχων (Rotational Slump)	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων (Debris Slump)	Περιστροφική ολίσθηση γαιών (Earth Slump)
	Μεταθετική (Traslational)	Πολλοί όγκοι (Many Units)	Κερματισμένη ολίσθηση βράχων	Κερματισμένη ολίσθηση κορημάτων	Κερματισμένη ολίσθηση γαιών
Ροή (Flow)			Ροή μικρών ογκοτεμαχίων πετρώματος	Ροή κορημάτων (Debris Flow)	Ροή γαιών (Earth Flow)
Πλευρική Έκταση (Lateral Spread)			Έκταση βραχωδών μαζών	Έκταση κορημάτων	Έκταση γαιών
Σύνθετη Μετακίνηση			Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων.		

Κάθε τύπος κατολίσθησης παρουσιάζει μια σειρά κοινών λειτουργιών. Η πτώση και η ανατροπή είναι φαινόμενα τα οποία σχετίζονται κυρίως με βραχώδη πρανή, ενώ οι τρεις υπόλοιπες περιπτώσεις συνδέονται με τα εδαφικά πρανή.

2.3.1. ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΤΩΣΗΣ/ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

Η γενικότερη αστοχία πτώσης λαμβάνει χώρα όταν τμήματα από βραχώδη υλικά ή σκληρά εδαφικά υλικά αποκολλώνται απότομα, από μεγάλης κλίσης πρανή και στη

συνέχεια πέφτουν ελεύθερα στο κενό για κάποια απόσταση ή αναπηδούν και κυλούν στο πρανές (Σχήμα 2.2).

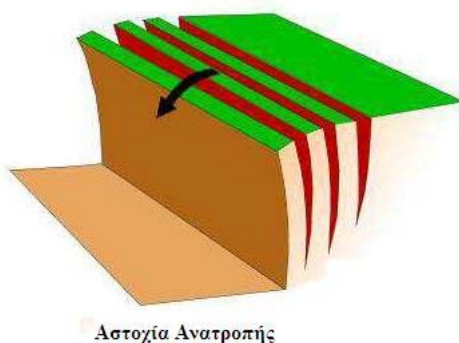


Σχήμα 2.2: Τυπική απεικόνιση κίνησης πτώσης. (www.legah.metal.ntua.gr)

Αυτές οι αποκολλήσεις εμφανίζονται στα απότομες κλίσεις πρανή ως αποτέλεσμα διεργασιών όπως: των κύκλοι ψύξης-θέρμανσης του εδάφους, της εδαφικής διαταραχής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, από τον κορεσμό του εδάφους σε νερό λόγω έντονων βροχοπτώσεων ή από την αποδυνάμωση του εδάφους λόγω της αύξησης του μεγέθους των ριζών της επί τόπου βλάστησης (Girty, 2009).

2.3.2. ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ

Η αστοχία ανατροπής (Σχήμα 2.3) συνεπάγεται και αυτή, την ανατροπή ή εναλλαγή εδαφικών στρωμάτων ή χαλαρών τμημάτων βράχου, από πρανή μεγάλης κλίσης.

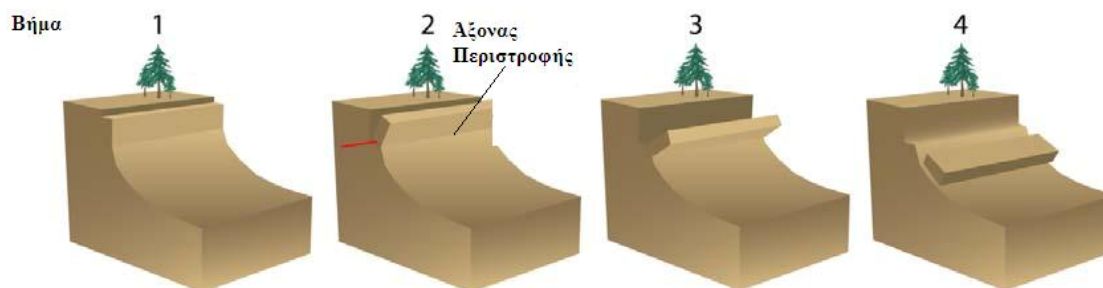


Αστοχία Ανατροπής

Σχήμα 2.3: Τυπική απεικόνιση αστοχίας ανατροπής (www.slideshare.net/sankarsulimella/slopestability)

Η κίνηση του υλικού θεωρείται περιστροφική προς τα εμπρός πάνω από ένα κεντρικό σημείο, το οποίο εντοπίζεται στο χαμηλότερο σημείο κάτω από το κέντρο βάρους του τμήματος (Σχήμα 2.4). Η αστοχία αυτή προϋποθέτει πυκνές και με απότομη κλίση

τεμνόμενες ασυνέχειες, οι οποίες κλίνουν μακριά από την επιφάνεια του πρανού (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).



Σχήμα 2.4: Κατολίσθηση τύπου ανατροπής στην οποία το εκτοπισμένο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα στο κατώτερο μέρος του (βήμα 2) καθώς φεύγει προς τα εμπρός (βήμα 2 και 3) πριν από τη πτώση (βήμα 4) (Girty, 2009).

Και οι δύο τύποι αστοχιών (πτώση και ανατροπή), διαφέρουν από το μηχανισμό θραύσης, αλλά αποτελούν προειδοποίηση για την εκδήλωση μεγαλύτερης αστοχίας.

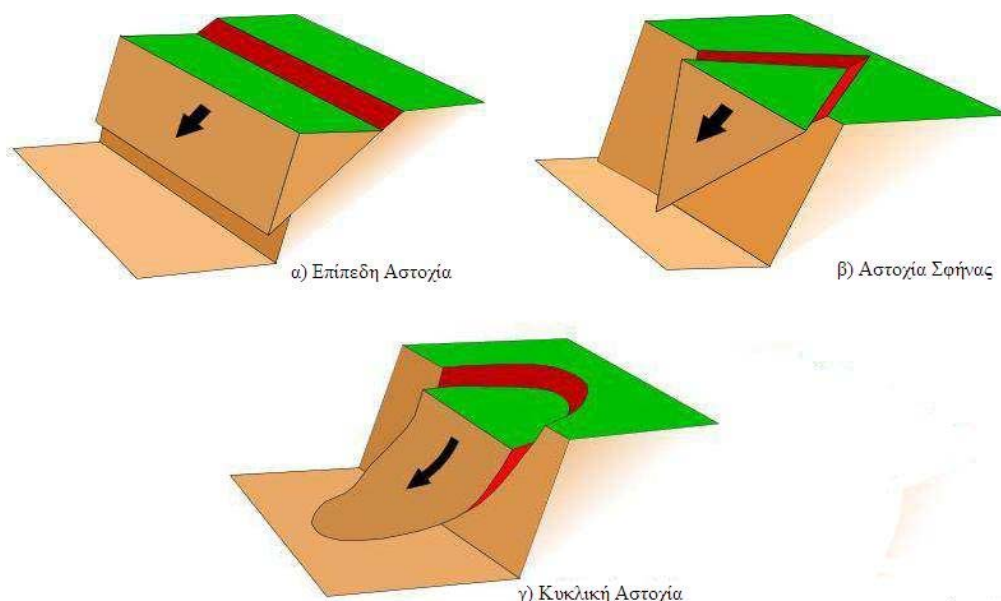
Ο συγκεκριμένος τύπος αστοχιών (πτώσης και ανατροπής), συνήθως ξεκινάει με διαχωρισμό των στρωμάτων με κατεύθυνση προς την ελεύθερη επιφάνεια του πρανού (ή επιφάνεια εκσκαφής) κυρίως λόγω του βάρους του κρεμάμενου όγκου όπου τότε είναι στιγμιαίος ο διαχωρισμός, ή και λόγω περιβαλλοντικών διεργασιών (βλέπε παράγραφο αστοχίας πτώσης) οι οποίες συνθέτουν το σταδιακό διαχωρισμό των στρωμάτων (Abramson et al, 2002).

2.3.3. ΑΣΤΟΧΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η ολίσθηση είναι μια κίνηση κατηφορική της μάζας του εδάφους η οποία εμφανίζεται σε διερρηγμένες επιφάνειες ή σχετικά λεπτές ζώνες έντονης διατμητικής καταπόνησης. Η κίνηση είναι συνήθως προοδευτική, η οποία ξεκινάει από μια περιοχή της τοπικής αστοχίας έως ότου επεκταθεί σε όλη την επιφάνεια της αστοχίας. Τα πρώτα εμφανή σημάδια της μετατόπισης του εδάφους είναι συνήθως ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος του οποίου το κύριο απότομο μέτωπο της ολίσθησης θα διαμορφωθεί. Στο σχήμα 2.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται επτά διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας ολίσθησης οι οποίοι συναντώνται κυρίως στα βραχώδη ή συνεκτικά εδαφικά πρανή. Στα εδαφικά χαλαρά πρανή, συναντώνται κυρίως μορφές όπως η ροή, η κυκλική ολίσθηση κ.α. (Abramson et al et.al, 2002).

2.3.3.1 Επίπεδη αστοχία

Αποτελεί τον απλούστερο μηχανισμό ολίσθησης και αναφέρεται σε έναν όγκο που ολισθαίνει κατά μήκος μιας μόνο ασυνέχειας (σχήμα 2.5α). Βασική προϋπόθεση για την εμφάνιση αυτής της αστοχίας είναι, η παράταξη της ασυνέχειας να είναι παράλληλη με το πρανές και η κλίση της επιφάνειας ολίσθησης να είναι μικρότερη από αυτή του πρανούς και μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής. Στην περίπτωση επίπεδης ολίσθησης, η συνοχή είναι ίση με μηδέν ($c=0$) (Στειακάκης, 2004).



Σχήμα 2.5: Μηχανισμοί αστοχίας για τον τύπο ολίσθησης: α) επίπεδη αστοχία β) αστοχία σφήνας και γ) κυκλική αστοχία (<http://www.slideshare.net/sankarsulimella/slopestability>).

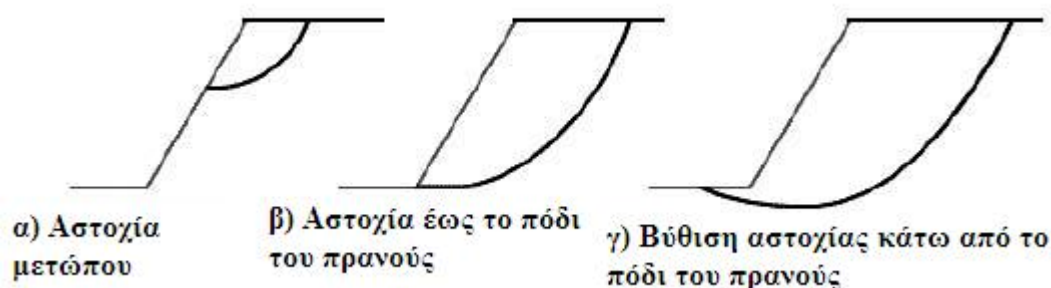
2.3.3.2 Αστοχία σφήνας

Αναφέρεται κυρίως σε βραχώδη πρανή. Εμφανίζεται στην περίπτωση που δύο επίπεδα ασυνεχειών, τα οποία σχηματίζουν τη σφήνα, τέμνονται σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση του πρανούς και κλίνουν προς το επίπεδο αυτού (σχήμα 2.5β). Βασική προϋπόθεση, η τομή των επιπέδων των ασυνεχειών να διέρχεται από το επίπεδο του κυρίου μετώπου του πρανούς, ώστε να είναι εφικτή η αποκόλληση του σφηνοειδούς τεμάχους (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.3.3.3 Κυκλική ολίσθηση

Η συγκεκριμένη αστοχία αναφέρεται κυρίως στα εδαφικά πρανή, σε έντονα αποσαθρωμένα πετρώματα και γενικότερα σε σχηματισμούς με χαμηλές ιδιότητες

συνοχής ή σχηματισμούς οι οποίοι διασχίζονται από ομάδες πυκνών ασυνεχειών. Η κίνηση του υλικού που αστοχεί, πραγματοποιείται πάνω σε κυκλική ή καμπύλη επιφάνεια αστοχίας (Σχήμα 2.5γ) (Στειακάκης, 2004).



Σχήμα 2.6: Τύποι κυκλικής αστοχίας (όπως τοποθετήθηκε από Abramson et al et. al, 2002).

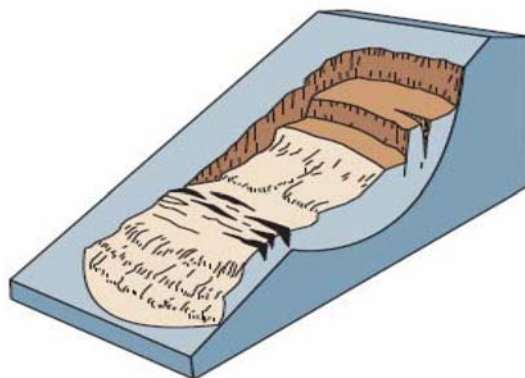
Η κυκλική αστοχία ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την περιοχή που επηρεάζεται από την επιφάνεια αστοχίας (Σχήμα 2.6). Αυτές είναι (Abramson et al et. al, 2002):

- 1) Αστοχία μετώπου: Σε αυτή την κατηγορία αστοχίας, το τόξο της διερρηγμένης επιφάνειας συναντά το πρανές πάνω από το πόδι του (σχήμα 2.6α). Αυτό συμβαίνει όταν η γωνία κλίσης του πρανούς είναι μεγάλη και το έδαφος κοντά στο πόδι του έχει υψηλή αντοχή.
- 2) Αστοχία στο πόδα: Σε αυτή την περίπτωση το τόξο της διερρηγμένης επιφάνειας συναντά το πρανές στο πόδι αυτού (σχήμα 2.6β).
- 3) Αστοχία βάσης: Σε αυτό το τύπο αστοχίας, το τόξο της διερρηγμένης επιφάνειας διέρχεται κάτω από το πόδι του πρανούς και στη βάση του (σχήμα 2.6γ). Αυτό συμβαίνει όταν η γωνία κλίσης του πρανούς είναι μικρή και το έδαφος κάτω από τη βάση του είναι πιο μαλακό και πιο πλαστικό από αυτό πάνω από τη βάση του πρανούς.

2.3.3.4 Περιστροφική ολίσθηση

Όταν μια εδαφική μάζα διαχωριστεί από ένα πρανές κατά μήκος μιας εσωτερικής καμπύλης επιφάνειας ολίσθησης και γύρω από τον άξονά της, το αποτέλεσμα ονομάζεται περιστροφική κάθηση. Σε γενικές γραμμές αυτός ο τύπος ολίσθησης ακολουθεί προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνέχειας ή αδυναμίας, με μικρή παραμόρφωση του τεμάχους που ολισθαίνει. Καθώς η συνεκτική μάζα κινείται προς

τα κάτω, κατά μήκος της καμπύλης επιφάνειας ολίσθησης, περιστρέφεται παράλληλα, αφήνοντας στην κορυφή της μια κατωφερή απότομη επιφάνεια σε σχήμα μισοφέγγαρου (σχήμα 2.7). Στο άλλο άκρο της κάθησης, στην περιοχή του ποδιού, το υλικό μπορεί να χάσει τη συνοχή του και να κυλήσει αργά ως εδαφική ροή, δηλαδή έχουμε σύνθετη ολίσθηση σε αυτή την περίπτωση (Girty, 2009).

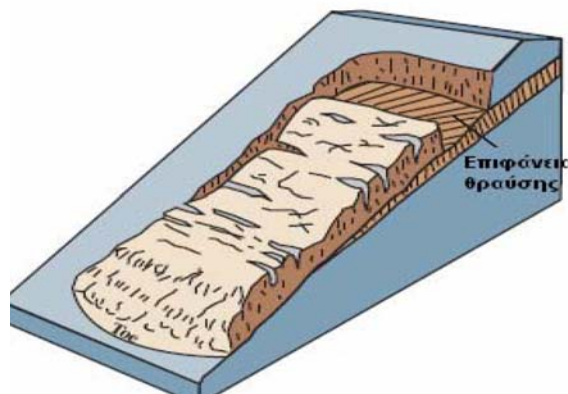


Σχήμα 2.7: Απεικόνιση περιστροφικής ολίσθησης. (www.legah.metal.ntua.gr)

Η κλασσική, περιστροφική επιφάνεια αστοχίας (βύθιση), συνήθως εμφανίζεται σε σχετικά ομοιογενή υλικά, όπως αυτά τα οποία συναντώνται σε τεχνητές επιχωματώσεις. Επιπλέον, οι βυθίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ροές, όπως και οι μεταθετικές ολισθήσεις, εάν τα κορήματα της ολίσθησης γίνουν κορεσμένα (Abramson et al et. al, 2002).

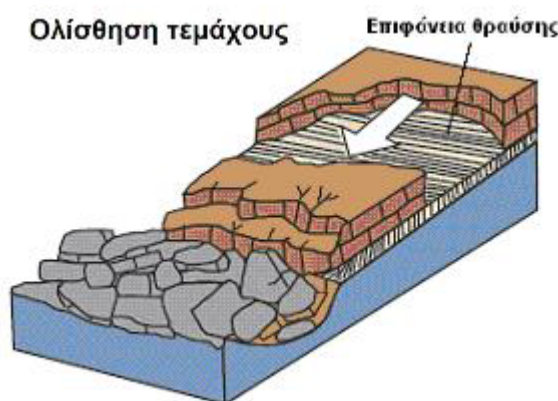
2.3.3.5 Μεταθετική ολίσθηση

Εάν το αποσπώμενο τμήμα χερσαίας μάζας που ολισθαίνει κατά μήκος και προς τα έξω, μιας σχετικά επίπεδης επιφάνειας, τότε το αποτέλεσμα ονομάζεται μεταθετική κάθηση (σχήμα 2.8α). Σχετικά, κοινές επίπεδες επιφάνειες αστοχίας είναι οι διακλάσεις ή τα επίπεδα στρώσεων. Εάν το υλικό στην περιοχή του ποδιού ρευστοποιείται, τότε το κάτω άκρο της μεταθετικής ολίσθησης του πρανού μπορεί να μετατραπεί σε εδαφική ροή. Η κίνηση αυτή δεν περιλαμβάνει σημαντική στροφή κι έτσι ξεχωρίζει από την περιστροφική ολίσθηση.



Σχήμα 2.8α: Απεικόνιση μεταθετικής κερατισμένης ολίσθησης. (www.legah.metal.ntua.gr)

Η μεταθετική ολίσθηση διακρίνεται και σε ολίσθηση τεμάχους (σχήμα 2.8β) όταν η κινούμενη μάζα αποτελείται από έναν μόνο όγκο ή σε μερικές στενά συνδεδεμένες μονάδες όγκου που κινούνται κατηφορικά στο πρηνές, ως μια σχετικά συμπαγή μάζα (Girty, 2009).



Σχήμα 2.8β: Μεταθετική ολίσθηση τεμάχους (block slide) (www.legah.metal.ntua.gr)

2.3.4. ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΚΤΑΣΗ

Σε αυτόν τον τύπο αστοχίας, η κίνηση συνοδεύεται από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές. Γενικά, η κίνηση μπορεί να είναι επέκταση μάζας που ολισθαίνει πάνω σε μαλακά εδάφη (σχήμα 2.9). Ο υπερκείμενος όγκος ολίσθησης, διαμελίζεται σε μεγάλα τεμάχια που κινούνται, περιστρέφονται, βυθίζονται, θρυμματίζονται ή ρέουν, επομένως η εν λόγω αστοχία μπορεί να θεωρηθεί και ως σύνθετη μετακίνηση (Στειακάκης, 2004).



Σχήμα 2.9: Πλευρική εξάπλωση. (www.legah.metal.ntua.gr)

2.3.5. ΡΟΕΣ

Η ροή αποτελεί μια συνεχή χωρική μετακίνηση κατά την οποία οι επιφάνειες διάτμησης είναι βραχύβιες, πολύ κοντά τοποθετημένες και συνήθως δεν έχουν διάρκεια. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στις κατολισθήσεις κατά τις οποίες παρατηρείται σχετική κίνηση ρευστοποιηθέντων εδαφικών υλικών, τα οποία αποτελούν την μετακινούμενη μάζα, πάνω σε μία άλλη σταθερή (Σχήμα 2.10α). Η κατανομή των ταχυτήτων στην μετατοπισμένη μάζα, μοιάζουν με παχύρρευστου υγρού (βισκώδης) και η κίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη εσωτερική παραμόρφωση και διαφοροποίηση της εσωτερικής δομής της μάζας (Στειακάκης, 2004).



Σχήμα 2.10α: Απεικόνιση ροής εδαφικών υλικών (earth flow) (www.legah.metal.ntua.gr)

Οι ολισθήσεις μπορούν σταδιακά να μετατραπούν σε ροές με αλλαγές στην περιεκτικότητα του νερού, στην κινητικότητα και στην εξέλιξη της κίνησης.

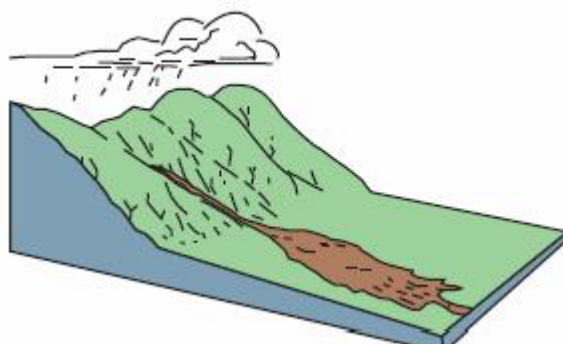
Καθώς τα μετατοπισμένα υλικά χάνουν από την αντοχή τους και αυξάνεται το νερό ή συναντούν απότομα πρανή, οι ολισθήσεις κορημάτων μπορεί να μετατραπούν σε αστραπιαίες ροές κορημάτων. Γενικότερα συναντώνται πέντε είδη ροών:

- επιφανειακές ροές
- λαχάρ (ροή κορημάτων από ηφαίστεια)

- διαμορφωμένες ροές
- ροές κορημάτων ανοιχτών πρανών
- κατολισθήσεις κορημάτων.

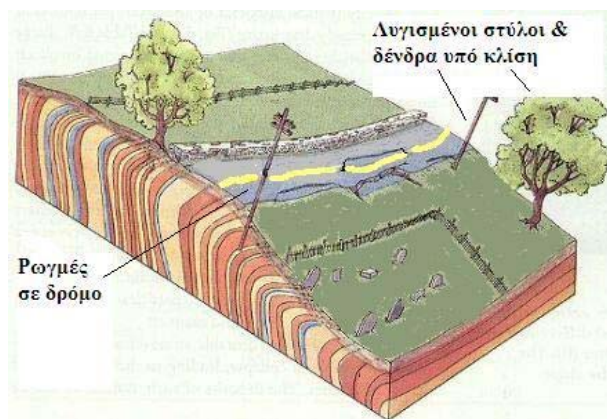
Η ροή στους εδαφικούς σχηματισμούς ή και στα πλευρικά κορήματα των ορεινών περιοχών, πραγματοποιείται κάτω από διάφορες συνθήκες περιεχόμενης υγρασίας και με ταχύτητα από μικρή έως εξαιρετικά μεγάλης.

Στην περίπτωση που η υγρασία που υπάρχει στους εδαφικούς σχηματισμούς είναι μεγάλη, όπως μετά από έντονες καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις ή κατά τη τήξη μεγάλων ποσοτήτων χιονιού ή πάγου, το φαινόμενο της ροής συγκεκριμενοποιείται σε ροή λάσπης ή κορημάτων, ανάλογα την κοκκομετρία του υλικού ολίσθησης (Σχήμα 2.10β).



Σχήμα 2.10β: Απεικόνιση ροής αποσαθρωμάτων (debris flow) και υδαρών γαιών (mud flow) (www.legah.metal.ntua.gr)

Μερικά από τα είδη των ροών, όπως η επιφανειακή ροή, αναφέρονται από πολλούς σαν ερπυσμός (Σχήμα 2.11). Υπάρχουν περιπτώσεις πρανών τα οποία δύναται να υποβληθούν σε κίνηση ερπυσμού, η οποία είναι πολύ αργή για να εντοπιστεί, δηλαδή για μετακίνηση της τάξεως των 2,5 εκατοστών κάθε χρόνο.



Σχήμα 2.11: Απεικόνιση ροής ερπυσμού (www.legah.metal.ntua.gr)

Ο ερπυσμός μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνεχής ή εποχιακού χαρακτήρα (Abramson et al, 2002).

2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

Οι κύριοι λόγοι για την παρατηρούμενη αύξηση των καταστροφών από κατολισθήσεις είναι η αύξηση της ευαισθησίας της επιφάνειας του εδάφους ως προς την ευστάθεια, ως αποτέλεσμα της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, της αποψίλωσης των δασών στα πλαίσια της εκμετάλλευσης του ιδίου υλικού προς υλοτόμηση, αλλά και της ανάπτυξης της αστικοποίησης και της ανεξέλεγκτης χρήσης γης. Επιπλέον, οι παραδοσιακά ακατοίκητες περιοχές όπως τα βουνά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για λόγους ψυχαγωγικούς και μεταφορών, επιτείνοντας το πρόβλημα. Ακόμη, η αλλαγή κλίματος και η δυνατότητα για ακραίες καιρικές συνθήκες αποτελούν επίσης ένα σημαντικό συμβάλλον παράγοντα.

Ένα πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση φυσικών ή ανθρωπογενών παραγόντων, έχοντας συχνά δυσμενείς επιπτώσεις στην οικονομία μιας περιοχής εξαιτίας της πρόκλησης καταστροφών σε οικισμούς καθώς και σε τεχνικά έργα.

Επομένως, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρανούς διακρίνονται αρχικά σε δύο κατηγορίες: τους φυσικούς, οι οποίοι οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες και τους τεχνητούς, οι οποίοι οφείλονται στην ανθρώπινη παρέμβαση.

2.4.1 Επιρροές από τη φύση

Στη φύση, το τοπογραφικό ανάγλυφο ποτέ δεν υπήρξε σε στασιμότητα. Με τη βοήθεια του ανέμου και της βροχής, η δύναμη της βαρύτητας μετακινεί τους λόφους

στις κοιλάδες και τις κοιλάδες στους ωκεανούς. Η συνεχής τεκτονική και σεισμική δράση διαμορφώνει νέους λόφους και ο κύκλος της αλλαγής στη φύση συνεχίζεται.

Αναλυτικότερα, στους φυσικούς παράγοντες επιρροής περιλαμβάνονται (Ρόζος, 2007):

- ✓ Το είδος των γεωλογικών σχηματισμών: Οι σχηματισμοί χαμηλής συνοχής δύναται να κινηθούν προς τα κάτω πιο εύκολα απ' ό,τι οι βραχώδεις σχηματισμοί του υποβάθρου.
- ✓ Ο προσανατολισμός και η τεκτονική των σχηματισμών: Η διάταξη της εδαφικής στρώσης ή ασυνέχειας ως προς προσανατολισμό του πρανούς, και ο βαθμός κερματισμού του υλικού, επηρεάζουν το δυναμικό της αστοχίας.
- ✓ Η κλίση του πρανούς: Όσο πιο απότομη κλίση έχει ένα πρανές, τόσο περισσότερο επιρρεπές είναι στο φαινόμενο της κατολίσθησης.
- ✓ Το νερό: Σε περιοχές που το νερό διεισδύει κυρίως στις εδαφικές στρώσεις ενός πρανούς, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της εσωτερικής τριβής σε αυτές, καθώς και την μείωση της συνοχής τους, και τελικά να μειώνεται η διατμητική αντοχή των υλικών, οπότε και η αντίσταση τους στην ολίσθηση. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση ενός υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ο οποίος εισέρχεται στις στρώσεις ενός πρανούς μέσω ρωγμών αυξάνει την πίεση του νερού των πόρων μέσα στην ασυνέχεια με συνέπεια την ελάττωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια την υποβάθμιση της διατμητικής αντοχής των γεωϋλικών.
- ✓ Οι εδαφικές δονήσεις: Ισχυρές δυναμικές φορτίσεις, όπως για παράδειγμα οι μεγάλης κλίμακας σεισμοί, ταρασσουν και χαλαρώνουν τα εδαφικά υλικά, με αποτέλεσμα την αστάθεια του πρανούς.
- ✓ Περιοχές με έντονη διαβρωτική δράση: Σε πρανή τα οποία βρίσκονται σε κοίτες ενεργών ρεμάτων ή παραθαλάσσιες ακτές με έντονο κυματισμό, παρατηρείται διάβρωση μεγάλης κλίμακας, με αποτέλεσμα την αλλαγή γεωμετρίας των πρανών και την εκδήλωση του φαινομένου της αστάθειας, λόγω αφαίρεσης υλικού από το πόδι τους (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 1.2: Υποσκαφή πρανούς και αστοχία αυτού. Διακρίνονται τα επίπεδα αποχωρισμού των πλακών του εδάφους (Ξειδάκης, 2006).

- ✓ Η Θερμοκρασία: Οι μεγάλης κλίμακας μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες δύναται να προκαλέσουν το θρυμματισμό του πετρώματος, λόγω ανάπτυξης των φαινομένων διαστολής – συστολής. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι θέρμανσης – ψύξης, έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της αντοχής των σχηματισμών.

2.4.2 Ανθρώπινες Επιρροές

Η κατασκευή έργων ανά τόπους, διακόπτει το φυσικό κύκλο της αλλαγής στη φύση, μέσω εκσκαφών στο φυσικό έδαφος υπό κλίση, με την πλήρωση πάνω από την επιφάνεια φυσικού ανάγλυφου υπό κλίση (σκιαγραφώντας έτσι το επίχωμα), με ενίσχυση των επιφανειών και κρατώντας τα ανώτερα επίπεδα με τοίχους αντιστήριξης, τροποποιώντας το περιεχόμενο (μόλυνση → διάβρωση) ή μεταβάλλοντας τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, την αποψίλωση των δασών κλπ.

Οι τυπικές ανθρωπογενείς αλλαγές (βραχυπρόθεσμες ή μόνιμες) που ενδέχεται να επηρεάσουν τη σταθερότητα ενός πρανούς, είναι (McCarthy, 1998):

- Κατασκευαστικές Δραστηριότητες: Η αλλαγή της κλίσης επιφάνειας του εδάφους και γεωμετρίας του πρανούς, η οποία πραγματοποιείται με χωματουργικές εργασίες στα πλαίσια διάνοιξης ορυγμάτων [π.χ. αφαίρεση γαιών κάτω από το πόδι του πρανούς], μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις αστάθειας και συνεπώς αστοχίας του.
- Η επιπλέον φόρτιση (επιχώματα, λοιπές υποδομές) κοντά στην κορυφογραμμή του πρανούς, με συνέπεια να αυξάνουν τις δυνάμεις προς εκδήλωση κατολίσθησης.

- Απότομη Μείωση Στάθμης Υδροφόρου/Δεξαμενής: Η απότομη μείωση του νερού δεν αφήνει περιθώρια σταδιακής εκτόνωσης της πίεσης των πόρων, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής, άρα και την εμφάνιση αστοχίας.
- Η φυτοκάλυψη: Γενικότερα, τα υδρόφιλα δένδρα με βαθιές ρίζες, συγκροτούν τα εδαφικά υλικά και περιορίζουν τη δράση του νερού. Επομένως, η ακαταλόγιστη αποψίλωση των δασικών ορεινών εκτάσεων, αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας. Παράλληλα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, η αρνητική διαβρωτική επίδραση των ριζών καθώς τείνουν να διευρύνουν τις όποιες ρωγμές στους βραχώδεις σχηματισμούς, αλλά και το επιπρόσθετο φορτίο μιας δενδροκάλυψης σε μη ανάλογη κλίση πρανούς.

Λόγω των παραπάνω, τα φυσικά πρανή πρέπει να ενισχύονται, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο, να πραγματοποιείται μελέτη και σχεδιασμός υπό συγκεκριμένες προδιαγραφές λαμβάνοντας υπόψη αρχικά την ασφάλεια, σε συνδυασμό με την ποιότητα και την οικονομία. Αυτό γίνεται εφικτό με τη συλλογή πληροφοριών για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής (γεωλογία εδάφους, στρώσεις, ασυνέχειες), τον εντοπισμό υπογείων υδάτων, τη σεισμική δραστηριότητα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν πληρέστερη μελέτη και να είναι δυνατή η πρόληψη και η αντιμετώπιση αστοχιών που μπορεί να προκύψουν.

2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Οι μέθοδοι σταθεροποίησης των πρανών γενικά έχουν ως στόχο την μείωσης των φορτίσεων, την αύξηση των δυνάμεων αντίστασης στην κατολίσθηση ή και τα δύο. Οι κινητήριες δυνάμεις μιας κατολίσθησης μπορούν να μειωθούν με την εκσκαφή του υλικού από το κατάλληλο τμήμα του ασταθούς εδάφους και με την αποστράγγιση του νερού, ώστε να μειωθούν οι υδροστατικές πιέσεις οι οποίες ενεργούν στην ασταθή μάζα. Οι δυνάμεις αντίστασης μπορούν να αυξηθούν εάν γίνει παρέμβαση με:

- Αποστράγγιση, η οποία θα αυξήσει τη διατμητική αντοχή του εδάφους.
- Εξάλειψη των ασθενών στρωμάτων ή άλλων πιθανών ζωνών αστοχίας.
- Κατασκευή δομών αντιστήριξης ή άλλων στηριγμάτων.
- Ενίσχυση του εδάφους.

Ως μία εναλλακτική στη σταθεροποίηση των πρανών, είναι να αποφευχθεί το ασταθές πρανές με αναπροσαρμογή της τοποθεσίας της κατασκευής ή επιλογή εξ' ολοκλήρου νέας τοποθεσίας του έργου κατασκευής.

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή οποιασδήποτε μεθόδου σταθεροποίησης, είναι ο επακριβής προσδιορισμός των πραγματικών ή πιθανών αιτιών αστοχίας, διότι υπάρχει πιθανότητα αναποτελεσματικότητας της μεθόδου και επανεμφάνιση της αστοχίας (Abramson et al, 2002).

Τα κυριότερα μέτρα που περιλαμβάνουν οι μέθοδοι σταθεροποίησης για την επίλυση προβλημάτων κατολίσθησης σε πρανή, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.5.1 Συλλογή και αποστράγγιση επιφανειακών υδάτων

Η σύλληψη των υδάτων τα οποία οδηγούνται στην κατολισθαίνουσα περιοχή, επιτυγχάνεται: α) με την εξομάλυνση της επιφάνειας του εδάφους, ώστε να ελευθερωθεί από οποιοδήποτε εμπόδιο προς την κίνηση και κατακράτηση των υδάτων, β) με τη κατασκευή μόνιμης περιφερειακής στεγανής τάφρου με κατάλληλη κλίση και τέτοια διαμόρφωση, ώστε να μην γεμίζει με υλικά της περιβάλλουσας εδαφομάζας (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Κατασκευή μόνιμης περιφερειακής τάφρου συλλογής επιφανειακών υδάτων στο μέτωπο εισόδου της σήραγγας Αγ. Βαρβάρας, Ηράκλειο Κρήτης, Φεβρ. 2010 (προσωπικό αρχείο).

2.5.2 Υπόγεια Αποστράγγιση

Δεδομένου ότι το υπόγειο νερό αποτελεί κύριο παράγοντα αστάθειας των πρανών, η υπόγεια αποστράγγιση αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές μεθόδους

σταθεροποίησης. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όμως πρέπει να σημειωθεί πως η αποστράγγιση είναι επιτυχής, μόνο όταν σχεδιάζεται σε συνδυασμό με την ολοκληρωμένη της γεωλογικής και υδρογεωλογικής έρευνας της περιοχής.

Ο πιο απλός τρόπος στράγγισης του εδάφους είναι η κατασκευή στραγγιστήριων ορυγμάτων (ανοιχτά κανάλια) τα οποία κατασκευάζονται υπό κλίση και βάθος μέχρι το σταθερό υπόβαθρο της κατολίσθησης. Τα κανάλια αυτά πληρώνονται με αδρόκοκκα λιθορίμματα, τα οποία επιτρέπουν την απομάκρυνση του υπόγειου νερού, οπότε συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι περιορισμένη, διότι υπάρχει ο κίνδυνος, ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα, τα κενά της αδρόκοκκης στρώσης να γεμίσουν με λεπτόκοκκα υλικά από την περιβάλλουσα εδαφική μάζα.

Ένας εναλλακτικός τρόπος στράγγισης των υπογείων υδάτων είναι η εκτέλεση σχεδόν οριζόντιων γεωτρήσεων από τη βάση του πρανού, οι οποίες λειτουργούν σαν φίλτρα. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής εξαρτάται από τον επιτυχή εντοπισμό του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάτρηση των γεωτρήσεων. Εάν στην περιοχή της αστοχίας, υπάρχουν παλιές γεωτρήσεις και φρέατα (πηγάδια) ή και η κατασκευή εκ νέου αυτών, αποτελεί τρόπο στράγγισης με τη συνεχή άντληση των υδάτων από αυτά.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος στράγγισης υπογείων υδάτων, είναι η διάνοιξη αποστραγγιστικής σήραγγας σε συνδυασμό με οριζόντιες γεωτρήσεις από την επιφάνεια ή από το εσωτερικό της οροφής της σήραγγας, για την επιπλέον «ανακούφιση» του πρανού (εικόνα 2.4). Η μέθοδος είναι οικονομικά ασύμφορη, οπότε επιλέγεται μόνο σε αστοχίες πολύ μεγάλου βάθους και μεγάλου μήκους (άνω των 200m) (Ρόζος, 2007).



Εικόνα 3.4: Τελική μορφή σήραγγας αποστράγγισης με οπές αποστράγγισης στην οροφή, Φράγμα Ποταμών, Ρέθυμνο Κρήτης, 2008 (προσωπικό αρχείο).

2.5.3 Εξάλειψη ασθενών στρωμάτων και πιθανών ζωνών αστοχίας

Η ευστάθεια του πρανούς αυξάνεται σημαντικά με την ελάττωση του βάρους από την κεφαλή του και με την επέκταση του ποδιού του, και κατά συνέπεια την μείωση της κλίσης του (Εικόνα 2.5 & 2.6). Για παράδειγμα, εάν από τον κατολισθαίνοντα όγκο απομακρυνθεί το 4% από την κεφαλή προς το πόδι του πρανούς, τότε η ευστάθειά του αυξάνεται κατά 10%. Η αφαίρεση υλικού από την κεφαλή απαιτεί προσοχή ώστε να μη διαταραχθεί η ισορροπία στο τμήμα αυτό και υπάρξει εξάπλωση του φαινομένου της αστοχίας. Οι εξομαλύνσεις των περιοχών αστοχίας πρέπει να σχεδιάζονται συγχρόνως με την αποστράγγιση του πρανούς, ώστε να είναι εκμεταλλεύσιμα τα υλικά εκσκαφής προς τοποθέτηση στο πόδι του πρανούς για την ευστάθεια. Γενικά, στους εδαφικούς σχηματισμούς η μέγιστη κλίση πρανούς, ορίζεται 2:1 (ύψος προς βάση) (Ρόζος, 2007).



Εικόνα 4.5: Εξομάλυνση εδαφικής αστοχίας πρανούς στο αριστερό μέτωπο της εξόδου της σήραγγας Απομαρμά, Μοίρες Ηρακλείου Κρήτης, 2009 (προσωπικό αρχείο).

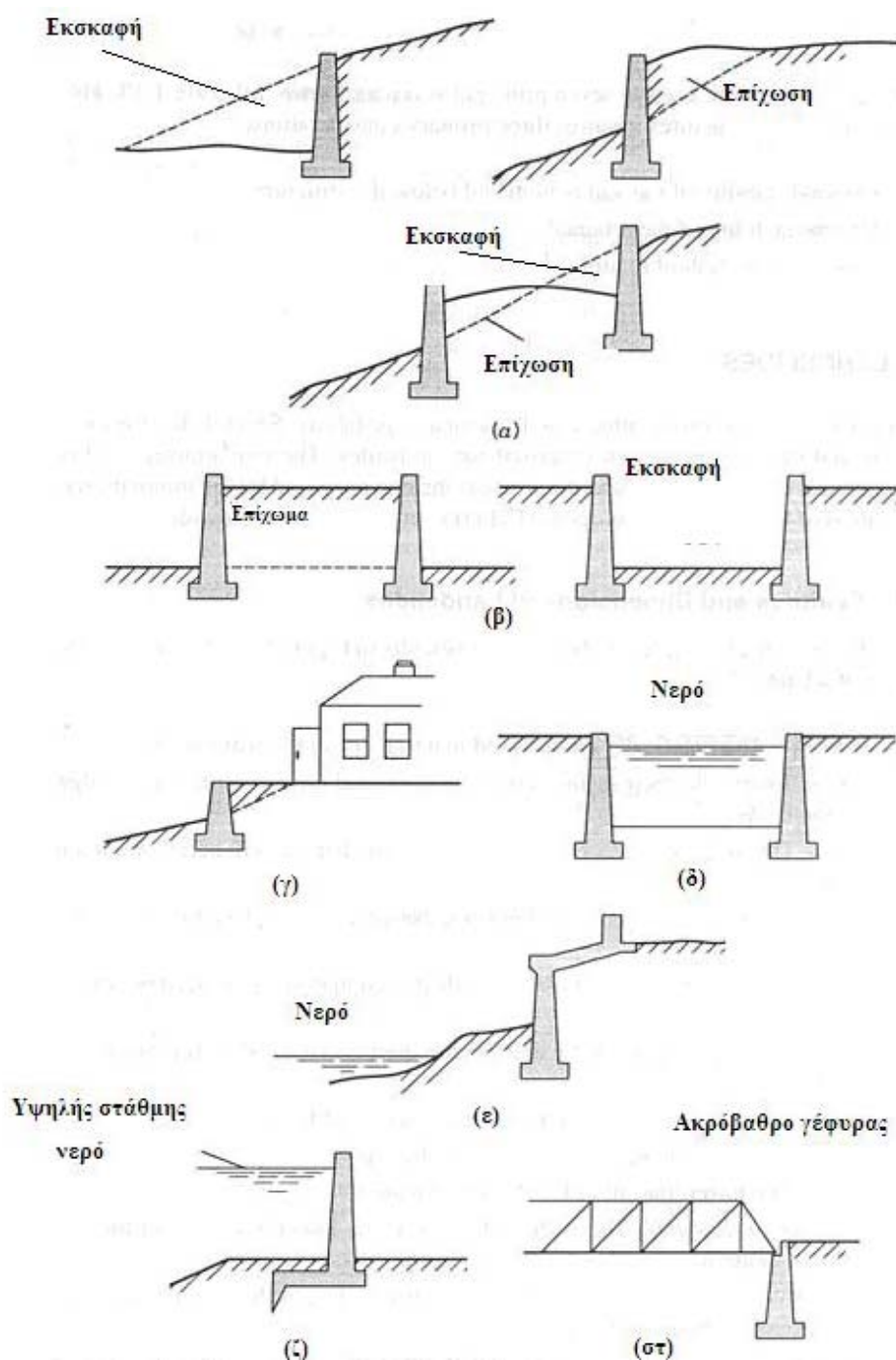


Εικόνα 5.6: Αστοχία πρανούς στο αριστερό μέτωπο της εξόδου της σήραγγας Απομαρμά, Μοίρες Ηρακλείου Κρήτης, 2009 . Η αστοχία εμφανίστηκε το 2008, αλλά προηγήθηκαν τα μέτρα αντιστήριξης με Cut & Cover μήκους 115m και έπειτα έγινε η εξομάλυνση του εδαφικού πρανούς (προσωπικό αρχείο).

2.5.4 Κατασκευή δομών αντιστήριξης ή άλλων στηριγμάτων

Τα έργα αντιστηρίξεων κατασκευάζονται για την αύξηση της σταθερότητας πρανών ή για τη σταθεροποίηση κατολισθήσεων. Πρόκειται για κατασκευές οι οποίες δέχονται μεγάλα φορτία, για αυτό το λόγο είναι υψηλό το κόστος κατασκευής τους. Κάποιες από αυτές τις δομές υποστήριξης, είναι οι **τοίχοι αντιστήριξης**. Πρόκειται για κατασκευές οι οποίες γίνονται στη βάση του πρανούς και η θεμελίωσή τους σε βάθος ανάλογα με την επιφάνεια ολίσθησης .

Οι τοίχοι αντιστήριξης γενικότερα, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους άκαμπτους (σχήμα 2.12) και τους εύκαμπτους. Οι άκαμπτοι τοίχοι αφορούν κατασκευές από οπλισμένο ή μη σκυρόδεμα και ποικίλλουν σε σχήμα και ιδιότητες αναλόγως των φορτίων στα οποία πρόκειται να υποβληθούν (Στειακάκης, 2004).



Σχήμα 2.12: Συνηθισμένες χρήσεις των τοίχων αντιστήριξης: (α),(β) εκσκαφή και επανεπίχωση (γ) ισοστάθμιση τοποθεσίας (δ) κανάλια (ε) κατακράτηση νερού (ς) ακρόβαθρα γεφυρών (Abramson et al, 2002).

Οι εύκαμπτοι τοίχοι αντιστήριξης είναι ανεκτικοί στις υποχωρήσεις διότι μπορούν να ανεχθούν μεγάλες πλευρικές φορτίσεις πριν παραμορφωθούν και τελικά αστοχήσουν (εικόνα 2.7). Το κόστος τους είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό των άκαμπτων. Στους εύκαμπτους τοίχους ανήκουν τα συρματοκιβώτια, οι τοίχοι από οπλισμένο έδαφος και οι τοίχοι από πασσάλους. Στην περίπτωση των συρματοκιβωτίων, η εφαρμογή τους

έχει και το πλεονέκτημα ότι συμβάλλουν στην αποστράγγιση του εδάφους, λόγω της δομής τους, εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλές πιέσεις πόρων, άρα χαμηλές ωθήσεις γαιών.

Σε πολλές περιπτώσεις βαθιών αστοχιών, η μέθοδος σταθεροποίησης που επιλέγεται είναι αυτή της διάτρησης έγχυτων πασσάλων διαμέτρου έως 1,5m σε σειρά, προς δημιουργία τοίχου, ο οποίος εδράζεται σε μεγάλο βάθος και κάτω από την επιφάνεια ολίσθησης του πρανούς, αλλά και για την καλύτερη στήριξη του ίδιου του πασσάλου (εικόνα 2.8). Η μέθοδος αυτή επιλέγεται στις δύσκολες συνθήκες στήριξης, λόγω του μεγάλου κόστους κατασκευής της (Abramson et al et al, 2002).



Εικόνα 2.8: Συστοιχία πασσάλων για αντιστήριξη πρανούς στην περιοχή Πανασσός, Μοίρες Ηρακλείου, 2010 (προσωπικό αρχείο).

Η κατασκευή των τοίχων οπλισμένης γης, γίνεται με τη συμπίκνωση επιχωμάτωσης με ενδιάμεσες στρώσεις οπλισμού (συνήθως μεταλλικές ράβδοι ή γεωσυνθετικά) για την επαρκή αντοχή των στρώσεων σε εφελκυσμό, ο οποίος αναπτύσσεται εσωτερικά του επιχώματος. Στην εξωτερική πλευρά του επιχώματος τοποθετείται τοίχος από προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος, τα οποία ενώνονται με την ενίσχυση των ενδιάμεσων στρώσεων (εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.7: Συρματοκιβώτια για τη στήριξη πρανών κοίτης ρέματος στην περιοχή Πλουτή, Μοίρες Ηρακλείου (προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 2.9: Οπλισμένο επίχωμα στη γέφυρα της Πλουτής, Μοίρες Ηρακλείου (προσωπικό αρχείο).

2.5.5 Ενίσχυση του εδάφους

Στην περίπτωση μη συνεκτικών εδαφών για την επίτευξη της σταθεροποίησής τους και παράλληλα αύξηση της συνοχής τους, εφαρμόζονται οι κάτωθι τεχνικές (Στειακάκης, 2004 & Abramson et al, 2002):

2.5.5.1 Ενίσχυση με τσιμεντενέσεις

Πρόκειται για την εισπίεση ενέματος, το οποίο είναι από τσιμέντο και νερό ή και άλλα χημικά πρόσμικτα (όπως για παράδειγμα ο υπερευστοποιητής Glenium 21 ή SKY 646 της BASF C.C., για την επίτευξη υψηλών αντοχών και ανθεκτικότητας του ενέματος), για την πλήρωση ζωνών αδυναμίας στα εδαφικά πρανή (εικόνα 2.10). Η τεχνική αυτή αποτελεί καθαρά μηχανική σταθεροποίηση του πρανούς, όμως πρέπει η διάτρηση των οπών τσιμεντενέσεων να γίνονται βαθύτερα από το σημείο που έχει

εντοπιστεί η αδυναμία του εδάφους, ώστε η σταθεροποίηση να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα.

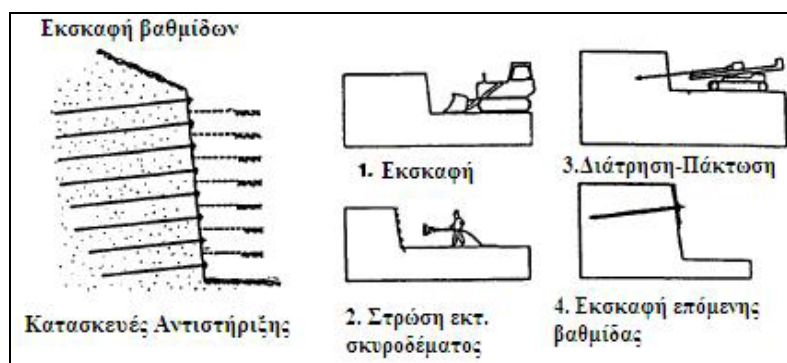


Εικόνα 2.10: Διενέργεια τσιμεντενέσεων μετά από εμφάνιση ρωγμών στο μέτωπο εισόδου της σήραγγας Πλουτής, Μοίρες Ηρακλείου, 2009 (προσωπικό αρχείο).

2.5.5.2 Ενίσχυση με αγκυρώσεις

Πρόκειται για επί τόπου ενίσχυση του εδάφους με ηλώσεις προς σταθεροποίηση του. Ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες, η ενίσχυση γίνεται με τους εξής τρόπους:

Εφαρμογή παθητικών ηλώσεων: Εφαρμόζεται κυρίως σε βραχώδη και συνεκτικά εδάφη και αφορά διεργασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται παθητικές προσθήκες οι οποίες ενεργοποιούνται όταν παρουσιαστεί κίνηση. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα στάδια της διάτρησης – τοποθέτησης και πάκτωσης με έγχυση τσιμεντενέματος (σχήμα 2.13) χαλύβδινων ή μεταλλικών βεργών διατρήματος συνήθως Φ25-32mm ή μεταλλικών σωλήνων, οι οποίες αντιστέκονται σε τάσεις εφελκυσμού, διάτμησης και ροπές κάμψης, που προκύπτουν από τις κινήσεις των πρανών.



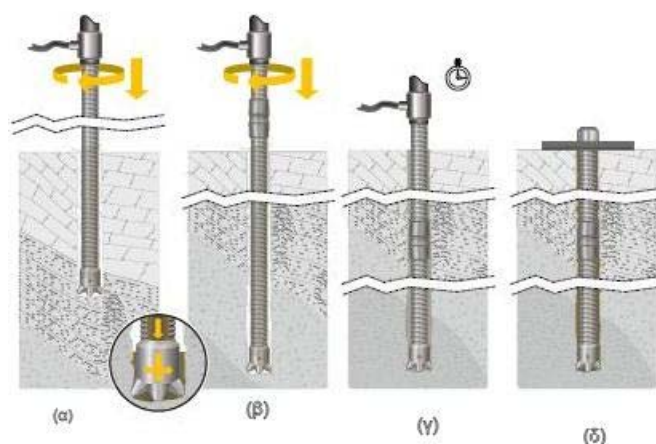
Σχήμα 2.13: Διαδικασία εφαρμογής παθητικών αγκυρών (Abramson et al, 2002).

Οι ήλοι αυτού του τύπου δεν είναι προεντεταμένοι και πραγματοποιούνται σε κάναβο με πυκνή διάταξη. Η σταθερότητα της επιφάνειας προς διάτρηση μπορεί να επιτευχθεί με επιφανειακή ενίσχυση (εικόνα 2.11) και κατά συνέπεια εξομάλυνση, τοποθετώντας ενισχυμένο δομικό πλέγμα (T92-T131) και μία στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (gunite) πάχους έως 15 cm.



Εικόνα 2.11: Εφαρμογή δομικού πλέγματος T131 και εκτόξευση gunite προς διάτρηση απ/κών οπών και αγκυρίων, στο μέτωπο εισόδου της σήραγγας Πλουτής, Μοίρες Ηρακλείου, 2009 (προσωπικό αρχείο).

Σε μη συνεκτικά εδάφη γίνεται ενίσχυση του εδάφους με αυτοδιατρύμενα αγκύρια (σχήμα 2.14), τα οποία αποτελούν το διατρητικό στέλεχος και παραμένουν μέσα στην εδαφική μάζα.



Σχήμα 2.14: Εφαρμογή μικροπασσάλων με ταυτόχρονη πάκτωση: (α). διάτρηση με έκπλυση ενέματος, χρησιμοποιώντας περιστροφικό προσαρμογέα εισπίεσης (β) με προσθήκη συνδέσμου γίνεται επέκταση στελέχους (γ) αναμονή ώστε το ένεμα να πάρει αντοχές (δ) μόλις το ένεμα σκληρύνει, έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία (www.atlascorpe.com)

Στην περίπτωση επισφαλούς εδαφικής μάζας, η πιο δραστική ενίσχυση γίνεται με την διάτρηση προεντεταμένων αγκυρίων, οι οποίες αποτελούνται από 2-κλώνα ή

περισσότερα συρματόσχοινα μεγάλου μήκους (ανάλογα την εφαρμογή) (εικόνα 2.12), όπου για την προέντασή τους μετά την πάκτωσή τους, κατασκευάζεται δοκός διανομής τάσεων από ενισχυμένο χάλυβα (εικόνα 2.13) ή οπλισμένο σκυρόδεμα (εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.12: Απεικόνιση προεντεταμένων αγκυρίων που αποτελούνται από 3-κλώνα συρματόσχοινα μήκους 28m, Στόμιο Εισόδου Σήραγγας Πλουτής, 2008 (προσωπικό αρχείο).

Πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση των προεντεταμένων αγκυρίων, η πάκτωση δεν γίνεται καθ' όλο το μήκος τους, όπως στις άλλες περιπτώσεις, αλλά περίπου το 1/3 μένει ελεύθερο με χαμηλό βαθμό χαλάρωσης.



Εικόνα 2.13: Δοκός διανομής τάσεων προέντασης 3-κλώνων αγκυρίων, κατασκευασμένος με χαλύβδινους δοκούς UNP240, στο μέτωπο εισόδου της σήραγγας Πλουτής, Ηράκλειο Κρήτης (προσωπικό αρχείο).



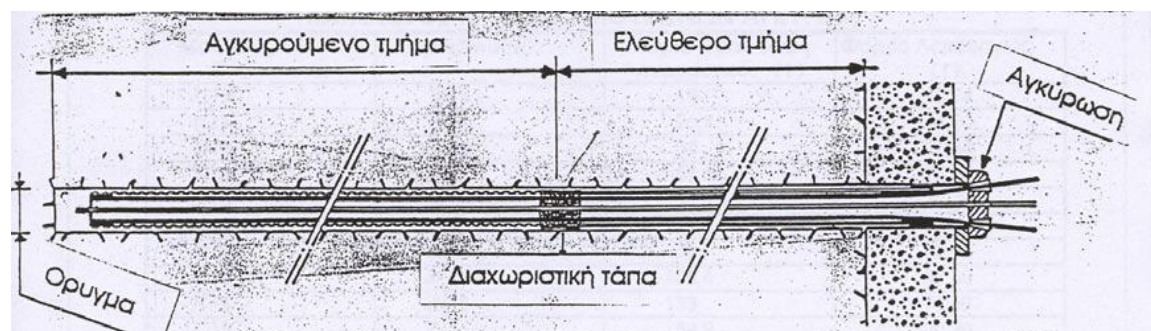
Εικόνα 2.14: Δοκός διανομής τάσεων προέντασης 3-κλωνων αγκυρίων, από οπλισμένο σκυρόδεμα, στο μέτωπο εισόδου της σήραγγας Αγ. Βαρβαρα, Ηράκλειο Κρήτης (προσωπικό αρχείο).

Τα προεντεταμένα αγκύρια διαχωρίζονται σε:

- ♦ Προσωρινά : Αγκύρια που προορίζονται να λειτουργούν για μια περίοδο μικρότερη των 2 ετών.
- ♦ Μόνιμα : Αγκύρια που προορίζονται να λειτουργούν σε όλη τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής.

Ανεξαρτήτως του τύπου, τα αγκύρια εδάφους αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη (σχήμα 2.15):

- ♦ Το αγκυρούμενο τμήμα, το οποίο είναι εκείνο το τμήμα του αγκυρίου που εξασφαλίζει την αγκύρωση στο έδαφος με συνάφεια, δια μέσου της τσιμεντένωσης.
- ♦ Το ελεύθερο τμήμα, το οποίο είναι εκείνο το τμήμα στο οποίο ο οπλισμός δύναται να επιμηκύνεται ελεύθερα κατά τη διάρκεια της προέντασης.
- ♦ Η αγκύρωση, η οποία αποτελεί το μηχανικό τμήμα που εξασφαλίζει την εφαρμογή της δύναμης προέντασης.



Σχήμα 2.15: Μέρη που απαρτίζουν ένα προεντεταμένο αγκύριο (www.ekkaf.gr)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή της ανάλυσης ευστάθειας των πρανών, με αναφορά στον συντελεστή ασφαλείας και στις μεθόδους επίλυσης που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Η ανάλυση ευστάθειας πρανών καθορίζει κάτω υπό ποιές συνθήκες ένα διερευνώμενο πρανές θα μείνει σταθερό, και κρίνεται αναγκαία συνήθως σε δύο περιπτώσεις:

- Στην περίπτωση σχεδιασμού τεχνητών πρανών και επιχωμάτων σε περιοχές επιρρεπείς προς κατολίσθηση, αλλά ακόμη σταθερές, και
- στην περίπτωση αντιμετώπισης κατολισθήσεων που έχουν εκδηλωθεί και απαιτούν άμεση αντιμετώπιση.

Η γενική συνθήκη ισορροπίας που ισχύει σε όλες τις επιλύσεις ευστάθειας, τόσο των βραχωδών όσο και των εδαφικών πρανών, είναι ότι οι δυνάμεις ή οι ροπές συγκράτησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές της ολίσθησης.

Ο συντελεστής ασφαλείας, F.S. ή FoS (Factor of Safety), καθορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση και οφείλονται στη διατμητική αντοχή του εδάφους, προς τις αντίστοιχες δυνάμεις που συμβάλλουν στην αστάθεια του πρανούς, προκαλώντας την ολίσθησή του. Επομένως, ο συντελεστής FS, ισούται με

τον λόγο της διατμητικής αντοχής του εδάφους, προς τη διατμητική τάση που επιδρά σε αυτό.

$$FS = \frac{\Delta \nu \acute{\alpha} \mu \epsilon \iota \varsigma \text{ } \Delta \nu \acute{\alpha} \sigma \tau \alpha \sigma \eta \varsigma}{\Delta \nu \acute{\alpha} \mu \epsilon \iota \varsigma \text{ } \text{Ο} \lambda \acute{\iota} \sigma \theta \eta \sigma \eta \varsigma} \quad (3.1)$$

Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής ασφάλειας ισούται με τη μονάδα το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας και παρουσιάζει αστοχία, όταν γίνει μικρότερος της μονάδας. Όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας πάνω από την μονάδα, τόσο αυξάνεται και η διατμητική αντοχή του εδάφους επομένως και η ευστάθειά του πρανούς. Θεωρητικά ένα πρανές θεωρείται ιδανικά ευσταθές, για τιμή του FS από 1.4 έως 1.5 και μεγαλύτερες τιμές αυτού σε κατασκευές με μεγάλο ρίσκο επικινδυνότητας (Ρόζος, 2007).

Γενικότερα, ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας, μπορεί να γίνει με τρεις προσεγγίσεις:

1. Με την εμπειρική μέθοδο, κατά την οποία οι γεωτεχνικοί μηχανικοί έχουν στηριχθεί στην κρίση τους, στο προηγούμενο ιστορικό παρόμοιων καταστάσεων, την εμπειρία, και τους κανονισμούς για την επιλογή των κατάλληλων συντελεστών οι οποίοι έχουν μεγάλη τιμή για την ευρεία αντιμετώπιση ευστάθειας των πρανών.
2. Τη συμβατική ανάλυση, όπως είναι η μέθοδος οριακής ισορροπίας (limit equilibrium method – LEM), η οποία θεωρεί ότι το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας υιοθετώντας μία και μόνο (αυθαίρετη) συνεχή επιφάνεια ολίσθησης (κυκλική ή επίπεδη ή συνδυασμός αυτών), υποθέτοντας ότι το κριτήριο αστοχίας επικρατεί καθ' όλο το μήκος της. Σε επόμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά σε αυτές τις μεθόδους.
3. Τις αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες με το πέρασμα των χρόνων και την παράλληλη εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, σε επιλύσεις γεωτεχνικών προβλημάτων. Κύριος παράγοντας αποτελεί η ανάλυση και προσομοίωση πολύπλοκων προβλημάτων γεωμετρίας και συνθηκών πεδίου, όπως παρουσία ρηγμάτων, προσομοίωση φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης, επίδραση πίεσης των πόρων, κλπ. Σε αυτές τις μεθόδους ανήκουν:

- ✓ Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων – ΜΠΣ (Finite Element Method - FEM)
- ✓ Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών - ΜΠΔ (Finite Difference Method – FDM)
- ✓ Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων – ΜΣΣ (Boundary Element Method – BEM)
- ✓ Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων – ΜΔΣ (Distinct Element Method – DEM) και τέλος,
- ✓ οι υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods) οι οποίες αποτελούν συνδυασμό των προαναφερθέντων μεθόδων.

Δεδομένου ότι ο συντελεστής FS ορίζεται ως ένας παράγοντας μείωσης της διατμητικής δύναμης, ένας προφανής τρόπος να υπολογιστεί το FS με ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών, είναι απλά να μειωθεί η εδαφική διατμητική δύναμη έως ότου να εμφανιστεί η κατάρρευση. Ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει, είναι ο λόγος της πραγματικής εδαφικής διατμητικής δύναμης, προς την μειωμένη διατμητική δύναμη κατά την αστοχία. Η τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής, χρησιμοποιείται από το 1975 από τον Zienkiewicz και άλλους, και έχει εφαρμοστεί από τους Naylor (1982), Donald & Giam (1988), Matsui & San (1992), Ugai (1989), Ugai & Leshchinsky (1995) και άλλους.

Αυτή η τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής έχει έναν αριθμό πλεονεκτημάτων σε σχέση με την μέθοδο των λωρίδων (method of slices) για την ανάλυση ευστάθειας πρανών. Το πιο σημαντικό από αυτά, είναι ότι η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας εντοπίζεται αυτόματα. Η εφαρμογή της τεχνικής στο παρελθόν περιορίστηκε λόγω της μεγάλης διάρκειας που απαιτούνταν από τον υπολογιστή για την εκτέλεση. Όμως, με την αυξανόμενη ταχύτητα των υπολογιστών, η τεχνική αποτελεί πλέον μία λογική εναλλακτική στην μέθοδο των λωρίδων, και χρησιμοποιείται με αυξανόμενο ρυθμό στην μηχανική πρακτική (Dawson & Roth, 1999).

Στόχος όλων των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας που έχουν αναπτυχθεί, είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των περιπτώσεων που διερευνώνται και συγκρίνονται στην παρούσα εργασία, των οποίων

τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν αυτούσια από την Καλογήρου (2003).

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας, διερευνούν την ισορροπία της εδαφικής μάζας η οποία τείνει να αστοχήσει υπό την επίδραση του βάρους της. Οι μέθοδοι αυτές, θεωρούν ότι το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας, υποθέτοντας μια επιφάνεια αστοχίας και εφαρμόζοντας συνθήκες ισορροπίας δυνάμεων για την ολισθαίνουσα μάζα, με την παραδοχή ότι το κριτήριο αστοχίας επικρατεί παντού στην επιφάνεια αστοχίας. Η επιφάνεια μπορεί να είναι καμπύλη ή επίπεδη ή και συνδυασμός των δύο. Μόνο η συνολική ισορροπία των τμημάτων του εδάφους μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και των ορίων του προβλήματος λαμβάνονται υπόψη, χωρίς να δίνεται σημασία στις παραμορφώσεις που επιδέχονται τα υλικά λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται.

Οι μέθοδοι Οριακής Ισορροπίας, αποτελούν μεθόδους των οποίων η επίλυση γίνεται με απλές εξισώσεις πρώτου βαθμού, οι οποίες βασίζονται στην ισορροπία δυνάμεων και μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα σε περιπτώσεις απλοποιημένων προβλημάτων, και σε λίγο χρόνο. Σε περιπτώσεις όμως που το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια, ανισοτροπία ή περίπλοκη γεωμετρία, οι εν λόγω μέθοδοι μπορεί να είναι δυσεπίλυτες και χρονοβόρες, αν όχι και μη επιλύσιμες. Στις μεθόδους αυτές ανήκουν (Abramson et al, 2002):

- ✓ Η απειροστική ανάλυση (μέθοδος για πρηνή μεγάλου μήκους)
- ✓ Η ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους
- ✓ Η μέθοδος $\Phi_u = 0$
- ✓ Η Σουηδική μέθοδος (απλοποιημένη μέθοδος λωρίδων)

Τα τρία βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου οριακής ισορροπίας, είναι (Moraes, 2011):

1. Οι παραμορφώσεις στο εσωτερικό του ολισθαίνοντος σώματος, παραβλέπονται.
2. Θεωρείται αυθαίρετα, επιφάνεια ολίσθησης.

3. Αστοχίες ροής ή σύνθλιψης, δεν δύναται να αναλυθούν με μεθόδους οριακής ισορροπίας.

Παρά την απλότητα της μεθόδου, οι παραδοχές που υιοθετούνται, σε πολλές περιπτώσεις περιορίζουν την εφαρμογή τους.

Ωστόσο, αν το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης είναι γνωστό και οι ιδιότητες αντοχής του υλικού μπορούν να υπολογιστούν, τότε η μέθοδοι οριακής ισορροπίας είναι ικανοποιητικές για τον πρακτικό σχεδιασμό πρανών.

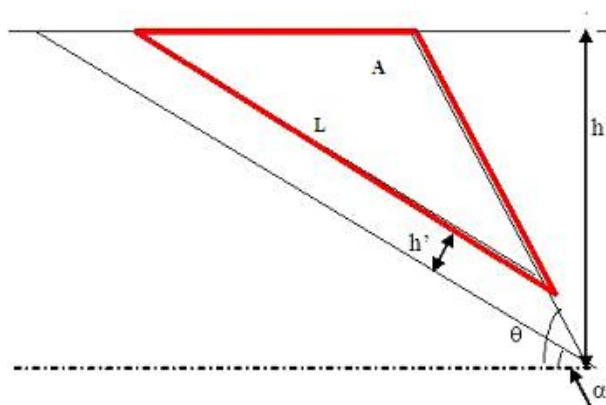
Στην επόμενη ενότητα, γίνεται αναφορά για την ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους, με την οποία πραγματοποιήθηκε η επίλυση των αποτελεσμάτων οριακής ισορροπίας τα οποία ανακτήθηκαν, προς σύγκριση.

3.2.1 Ανάλυση Σφηνοειδούς Τεμάχους

Οι επίπεδες επιφάνειες ολίσθησης, συνήθως εμφανίζονται σε πρανή τα οποία εδράζονται πάνω σε στρώμα το οποίο αποτελείται από πέτρωμα υψηλής αντοχής ή όταν στη μάζα του πρανούς παρεμβάλλεται μια λεπτή στρώση εδάφους που έχει σχετικά χαμηλότερη αντοχή με το υπερκείμενο στρώμα αυτού. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ειδική περίπτωση της διαδικασίας της οριακής ισορροπίας, η οποία ικανοποιεί απόλυτα την ισορροπία δυνάμεων στην κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση και αγνοεί την ισορροπία ροπών (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).

Η ανάλυση της επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης μπορεί εύκολα να αναλυθεί, με μια κλειστής μορφής επίλυση, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του πρανούς και τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας. Το πρόβλημα επιλύεται με ορισμένες παραδοχές που αφορούν τη κατεύθυνση των δυνάμεων στα προς ανάλυση τεμάχια και θεωρώντας πως η διατμητική αντοχή του υλικού είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (Abramson et al, 2002).

Στο παράδειγμα πρανούς που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1, για να γίνει ο υπολογισμός της θα πρέπει να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δεδομένου πρανούς, τα οποία είναι το εμβαδόν επιφάνειας (A) της σφήνας και το μήκος έδρας της L .



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση επίπεδης επιφάνειας αστοχίας σφηνοειδούς τεμάχους (Abramson et al., 2002).

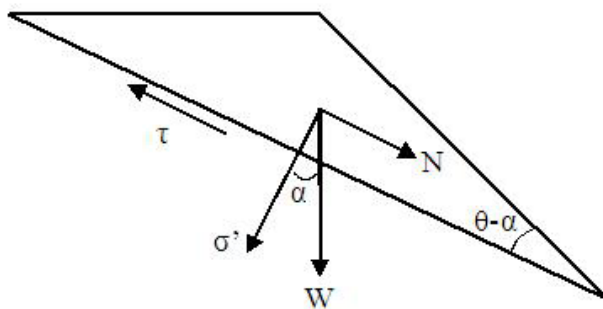
Οι δυνάμεις οι οποίες εφαρμόζονται στη σφήνα απεικονίζονται στο σχήμα 3.2. Για τον υπολογισμό του όγκου της σφήνας, θεωρείται πως το πάχος της είναι μοναδιαίο, επομένως ο όγκος της δίνεται από τη σχέση :

$$V = A \times 1m \quad (3.1)$$

Το βάρος της σφήνας W , ισούται με το άθροισμα των βαρών των επιμέρους εδαφικών βαρών που απαρτίζουν την εδαφική σφήνα και δίδεται από τη σχέση:

$$W = \sum W_i = \sum (V_i \times \gamma_i) \quad (3.2)$$

όπου: V_i ο όγκος των επιμέρους εδαφικών όγκων της σφήνας και γ_i το αντίστοιχο φαινόμενο βάρος τους (ξηρό ή υγρό, ανάλογα με το που τοποθετούνται σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα).



Σχήμα 3.2: Ανάλυση δυνάμεων που επενεργούν στη σφήνα, με κλίση ασθενούς στρώματος α και κλίση πρανούς θ (Abramson et al., 2002).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, το βάρος της σφήνας W , αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την κάθετη στο επίπεδο ολίσθησης/έδρασης της σφήνας (σ') και στην παράλληλη με αυτό (N).

Η δύναμη σ' , είναι:

$$\sigma' = \cos \alpha \times W \quad (3.3)$$

Η δύναμη σ' , όπως προκύπτει από τη σχέση (3.3), μετατρέπεται σε τάση εάν διαιρεθεί με το εμβαδόν στο οποίο εφαρμόζεται, το οποίο ισούται με το μήκος L επί το μοναδιαίο πάχος της σφήνας. Με βάση τη γωνία εσωτερικής τριβής της ϕ' και της συνοχής c' , της ασθενούς στρώσης, προκύπτει η διατμητική αντοχή αυτής:

$$\tau' = c' + \sigma \times \tan \phi' \quad (3.4)$$

Όπου: σ , η ορθή τάση που εφαρμόζεται στο επίπεδο έδρασης της σφήνας.

Η διατμητική δύναμη η οποία αντιστέκεται στην ολίσθηση, προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της τάσης με το εμβαδόν στο οποίο αυτή εφαρμόζεται, δηλαδή:

$$\tau = \tau' \times L \times lm \quad (3.5)$$

Η συνιστώσα N του βάρους W , η οποία προκαλεί τη σφήνα σε ολίσθηση, δίνεται από τη σχέση:

$$N = \sin \alpha \times W \quad (3.6)$$

Επομένως, εξ ορισμού ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει από το λόγο των δυνάμεων που τείνουν να συγκρατήσουν τη μάζα της σφήνας, προς τις δυνάμεις που την προκαλούν σε μετακίνηση:

$$FoS = \frac{\tau}{N} \quad (3.7)$$

3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods) στα προβλήματα μηχανικού, οι οποίες βρίσκουν συνεχώς εφαρμογές σε προβλήματα ευστάθειας και ελέγχου συμπεριφοράς των γεωϋλικών. Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων ελαστικότητας – πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (πχ εδαφικά ή βραχώδη) (Αγιουτάντης, 2002).

Στην κατηγορία των μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης, περιλαμβάνονται μέθοδοι οι οποίες προσπαθούν να ικανοποιήσουν όλες τις θεωρητικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβάνοντας ρεαλιστικά προσομοιώματα συμπεριφοράς εδαφών και

συννοριακές συνθήκες, οι οποίες προσομοιώνουν τις συνθήκες πεδίου. Λόγω της πολύπλοκότητας και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, οι μέθοδοι αυτές είναι αριθμητικές από τη φύση τους.

Στη γεωτεχνική μηχανική οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται επί το πλείστον, είναι οι προσεγγίσεις βασισμένες στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων-ΜΠΣ (Finite Element Method – FEM) σε συνδυασμό ή όχι με τα συννοριακά στοιχεία (Boundary Element Method – BEM) και στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών - ΜΠΔ (Finite Difference Method – FDM). Οι δύο πρώτες μέθοδοι εντάσσονται στην κατηγορία όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι και διαδικασίες έμμεσου τύπου (*implicit*), ενώ η ΜΠΔ εντάσσεται στην κατηγορία άμεσου τύπου (*explicit*) (Κωμοδρόμος, 1999).

Οι αριθμητικές μέθοδοι αποτελούν την επίλυση των καταστατικών εξισώσεων (διαφορικές ή απλές) οι οποίες διέπουν τις συννοριακές συνθήκες του προβλήματος προς επίλυση. Όποια διαδικασία και αν επιλεγεί, οδηγεί στην επίλυση ενός γραμμικού ή μη συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από το τρόπο διαίρεσης του πεδίου και από το βαθμό ακριβείας για την επίλυση του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).

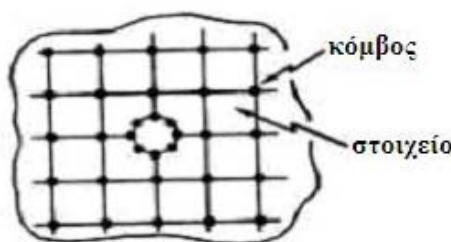
Οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό μετατοπίσεων και πιέσεων που προκαλούνται από επιβαλλόμενα φορτία. Υπερσχύουν των μεθόδων οριακής ισορροπίας, λόγω του ότι η ισχύς του προσδιοριζόμενου συντελεστή ασφαλείας από αυτές τις μεθόδους, εξαρτάται από τον εντοπισμό της εν δυνάμει κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας. Ενώ οι αριθμητικές μέθοδοι παρέχουν μοτίβο μετατόπισης το οποίο μπορεί να υποδείξει το εν δυνάμει και ενδεχομένως πολύπλοκο μηχανισμό αστοχίας. Μόλις αναγνωριστεί από το πρόγραμμα ο πιθανός μηχανισμός αστοχίας, τότε υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας κατά της διατμητικής αστοχίας η οποία αναπτύσσεται, με τη χρήση συμβατικών διαδικασιών οριακής ισορροπίας. Οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους, αλλά είναι οι πλέον κατάλληλες για απόδοση πολύπλοκης γεωμετρίας και συμπεριφοράς υλικών με μεγάλη ακρίβεια (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).

Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι αριθμητικές μέθοδοι παρέχουν κατά προσέγγιση μόνο, τη σωστή ή ακριβή μαθηματική λύση. Στις μεθόδους αυτές υπάρχουν τρεις πηγές σφαλμάτων (Moraes, 2011):

1. Αρχικά και μόνο του ότι γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού ενός φυσικού φαινομένου, με χρήση μιας διαφορικής εξίσωσης (ή ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων).
2. Οι αλγεβρικές μορφές των διαφορικών εξισώσεων, παράγονται επιβάλλοντας τις εξισώσεις σε διακριτό χρόνο και χώρο.
3. Για την επίλυση αυτών των αλγεβρικών μορφών, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι, επομένως υπεισέρχεται στο αποτέλεσμα το υπολογιστικό σφάλμα¹.

3.3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

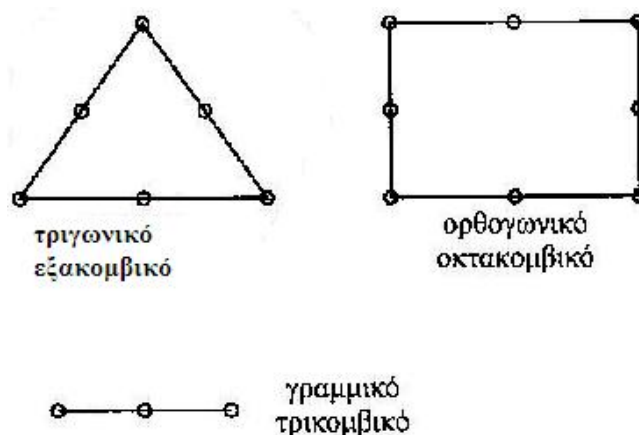
Στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία ή τμήματα (elements) με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών (σχήμα 3.1). Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους και μπορεί να έχει περισσότερους από αυτούς που ορίζει η γεωμετρία του, δηλαδή οι πλευρές του.



Σχήμα 3.1: Τυπική σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, (www.slideshare.net/numerical-modelling-6170176).

Για παράδειγμα, ένα τριγωνικό στοιχείο ορίζεται από τρεις κόμβους, που αντιστοιχούν στην κορυφή των πλευρών του, όμως μπορεί να περιγράφεται και από έξι κόμβους, το λεγόμενο τριγωνικό εξακομβικό στοιχείο (σχήμα 3.2) (Αγιουτάντης, 2002).

(¹): Υπολογιστικό σφάλμα (δηλαδή, το σφάλμα που γίνεται κατά τη διάρκεια του υπολογισμού) ισούται με το άθροισμα του σφάλματος αποκοπής (ή διακριτοποίησης) και του σφάλματος στρογγύλευσης. Το σφάλμα αποκοπής οφείλεται στις προσεγγίσεις όπως: η αποκοπή μιας σειράς, η αντικατάσταση μιας παραγωγού από μία διαιρεμένη διαφορά, η αντικατάσταση μιας οποιασδήποτε συνάρτησης από ένα πολώνυμο ή ο τερματισμός μιας επαναληπτικής διαδικασίας πριν από τη σύγκλιση. Το σφάλμα στρογγύλευσης, οφείλεται στη μη ακρίβεια της αναπαράστασης των πραγματικών αριθμών και στις αριθμητικές πράξεις που γίνονται μεταξύ αυτών.



Σχήμα 3.2: Είδη στοιχείων στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, (Αγιουτάντης, 2002).

Οι άγνωστες ποσότητες των διαφορετικών εξισώσεων που αναφέρονται σε ένα συνεχές στοιχείο, αντιστοιχούνται σε κομβικές μεταβλητές μέσω γραμμικών ή μη συναρτήσεων παρεμβολής. Στη συνέχεια συναθροίζονται οι κομβικές εξισώσεις των γειτονικών στοιχείων προς υπολογισμό των άγνωστων ποσοτήτων στα υπόλοιπα σημεία του μέσου (Αγιουτάντης, 2002).

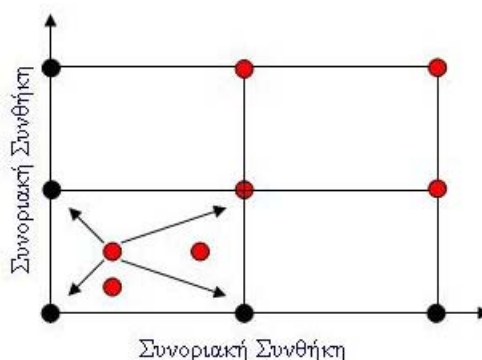
Ειδικότερα, η μέθοδος περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του πεδίου προς ανάλυση, σε στοιχεία.
2. Ακολουθεί, η θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των αγνώστων μεταβλητών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου.
3. Γίνεται προσδιορισμός των συναρτήσεων που συνδέουν το αίτιο (δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση), που αποτελεί και την άγνωστη μεταβλητή.
4. Έπειτα, πραγματοποιείται η κατασκευή των καταστατικών εξισώσεων για κάθε στοιχείο (συνάρτηση συμπεριφοράς του στοιχείου, η οποία αποτελεί μια συνεχή εξίσωση).
5. Οι άγνωστες ποσότητες των εσωτερικών σημείων κάθε στοιχείου του πεδίου, αντιστοιχούνται με τις κομβικές μεταβλητές του στοιχείου μέσω των συναρτήσεων μορφής (Σχήμα 3.3).

6. Λαμβάνει χώρα η εφαρμογή της συνθήκης ισορροπίας, όπου προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων σε επίπεδο στοιχείου, με αγνώστους τις κομβικές μεταβλητές.
7. Στη συνέχεια γίνεται συνάθροιση των κομβικών εξισώσεων (υπέρθεση) κάθε στοιχείου σε επίπεδο σώματος (προς σχηματισμό του συνολικού γραμμικού συστήματος εξισώσεων επίλυσης), και εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος.
8. Ακολουθεί το στάδιο, όπου γίνεται ο υπολογισμός της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου του πεδίου, ως συνάρτηση των μετατοπίσεων (αποτέλεσμα) στους κόμβους των στοιχείων.
9. Δύναται να πραγματοποιηθεί υπολογισμός δευτερογενών αγνώστων μεγεθών, που προκύπτουν από την επίλυση, όπως ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κλπ.
10. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Σε κάθε κόμβο ενός στοιχείου αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο (τάση, δύναμη) και το αποτέλεσμα (μετατόπιση). Τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από το τρόπο που συνδέεται η συμπεριφορά και οι ιδιότητες του υλικού που απαρτίζουν το πεδίο, με τα μεγέθη που αντιστοιχούνται στους κόμβους των στοιχείων αυτών.

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, γίνεται με την επιλογή κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες εκφράζουν την αντιστοίχιση των αγνώστων μεταβλητών κάθε εσωτερικού σημείου, σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους του εκάστοτε στοιχείου. Οι συναρτήσεις αυτές έχουν άμεση σχέση με την ακρίβεια των υπολογισμών και με το χρόνο επίλυσης του προβλήματος, και ονομάζονται συναρτήσεις μορφής.



Σχήμα 3.3: Αντιστοίχιση των αγνώστων μεταβλητών κάθε εσωτερικού σημείου ενός στοιχείου, με τις κομβικές μεταβλητές του στοιχείου.

Οι συναρτήσεις μορφής παρομοιάζονται με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του, καθώς ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων σε σχέση με τη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Βασικά, οι συναρτήσεις αυτές αναφέρονται στις άγνωστες ποσότητες στους κόμβους, αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε άλλη ποσότητα η οποία μπορεί να μεταβληθεί στο εσωτερικό κάθε στοιχείου.

Σε κάθε στοιχείο ορίζονται τόσες συναρτήσεις μορφής, όσοι είναι και οι κόμβοι του, και η χρήση τους εξασφαλίζει την ομαλή μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε αυτό (Αγιουτάντης, 2002).

Η υπόθεση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι οι δυνάμεις εντός ενός στοιχείου, μπορούν να εκπροσωπηθούν με τις αλληλεπιδράσεις στους κόμβους των στοιχείων. Είναι συνεπώς αναγκαίο, να θεσπιστούν εκφράσεις για τις κομβικές δυνάμεις οι οποίες είναι στατιστικά ισοδύναμες στις δυνάμεις που δρουν μεταξύ των στοιχείων καθώς και των αντίστοιχων άκρων/κόμβων. Έτσι, η μέθοδος επιδιώκει να αναλύσει το συνεχές πρόβλημα, από την άποψη των συνόλων των κομβικών δυνάμεων και των μετατοπίσεων για το διακριτοποιημένο χώρο (Brady & Brown, 2004).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εξακολουθεί να είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και πιθανώς η πιο ευέλικτη μέθοδος, για την ανάλυση προβλημάτων συνοριακών συνθηκών στη Γεωτεχνική Μηχανική.

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου, συνοψίζονται παρακάτω (Carter, 2000):

Πλεονεκτήματα

1. Δύναται να θεωρηθεί μη γραμμική συμπεριφορά υλικού, για ολόκληρο το πεδίο διερεύνησης.
2. Είναι δυνατή η μοντελοποίηση ακολουθιών εκσκαφής, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής ενίσχυσης και συστημάτων κατασκευαστικής υποστήριξης.
3. Μπορούν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά δομικά χαρακτηριστικά της εδαφικής ή βραχώδους μάζας, όπως η πυκνή διάταξη παράλληλων ασυνεχειών ή ρωγμών, με τη κατάλληλη τεχνική ομογενοποίησης.
4. Μπορεί να εισαχθεί συμπεριφορά υλικού, η οποία είναι χρονικά εξαρτώμενη.
5. Το σύστημα εξίσωσης είναι συμμετρικό (εκτός από τα ελαστοπλαστικά προβλήματα για μη συντηρημένες πλαστικές ροές, χρησιμοποιώντας μεθόδους εφαπτομενικής ακαμψίας).
6. Η διατύπωση της συμβατικής μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις περισσότερες αναλύσεις διαδρομής της φόρτισης (*load-path analyses*).
7. Είναι πλέον διαθέσιμες ειδικές διατυπώσεις και για άλλους τύπους γεωτεχνικών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα για την ανάλυση διαρροής και τις επιλύσεις του δεσμευμένου θεωρήματος (*the bound theorem solutions*), στη θεωρία της πλαστικότητας.
8. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί ευρέως στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων, και συνεπώς υπάρχει διαθέσιμη μεγάλη εμπειρία σε αυτήν.

Μειονεκτήματα

Τα ακόλουθα μειονεκτήματα αφορούν περισσότερο την ανάλυση στις 3 διαστάσεις και λιγότερο τα μοντέλα στις 2 διαστάσεις.

1. Πρέπει να διακριτοποιηθεί ολόκληρος ο όγκος του πεδίου προς ανάλυση, οπότε απαιτείται μεγάλος χρόνος για την προ- και μετά-επεξεργασία.
2. Λόγω των μεγάλων συστημάτων εξισώσεων που δημιουργούνται, απαιτείται τα υπολογιστικά συστήματα να διαθέτουν μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας και μεγάλο δίσκο αποθήκευσης δεδομένων (ανάλογα με τη γενική δομή και τους εφαρμοζόμενους αλγόριθμους του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων).

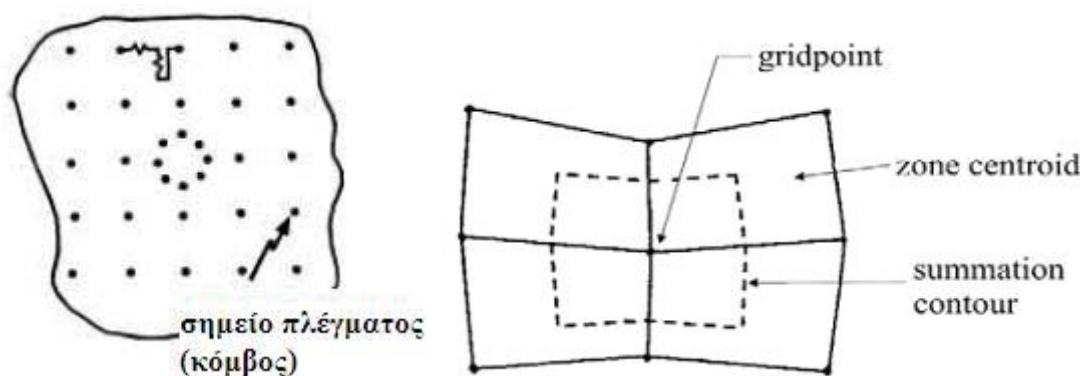
3. Απαιτούνται εξελιγμένοι αλγόριθμοι, για τα καταστατικά μοντέλα κράτυνσης και χαλάρωσης.
4. Γενικότερα, η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για υψηλού βαθμού ασυνέχειας ή έντονα διατμημένου εδάφους, όταν αυτά τα ελαττώματα κατανέμονται τυχαία και κυριαρχούν στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

3.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δεν έχει μακρά παράδοση στη Γεωτεχνική Μηχανική, με μόνη ίσως εξαίρεση την ανάλυση των προβλημάτων της ροής, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν τη στερεοποίηση και τη μεταφορά ρύπων. Ωστόσο, η ανάπτυξη του κώδικα πεπερασμένων διαφορών, FLAC από τους Cundall και Board το 1988, ο οποίος βασίζεται σε ένα άμεσο χρονο-εξελισσόμενο σύστημα, χρησιμοποιώντας τις πλήρως δυναμικές εξισώσεις της κίνησης, ακόμα και για προβλήματα που είναι ουσιαστικά στατικά ή ημιστατικά, παρουσιάζεται ως μια ελκυστική εναλλακτική λύση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Carter, 2000).

Οι άμεσες μέθοδοι δεν απαιτούν την αποθήκευση μεγάλων συστημάτων εξισώσεων, αλλά είναι γνωστές για τη δυσκολία προσδιορισμού αξιόπιστων επιλύσεων κάποιων προβλημάτων στη στατική. Οποιαδήποτε διαταραχή της ισορροπίας διαδίδεται, σε ποσοστό εξαρτώμενο από το υλικό. Αυτό το άμεσο σύστημα είναι σταθερό υπό όρους, και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρά χρονικά βήματα, για την πρόληψη της διάδοσης των πληροφοριών πέρα από τα γειτονικά σημεία υπολογισμού, μέσα σε ένα χρονικό βήμα (Carter, 2000).

Σε αντίθεση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών η διακριτοποίηση του πεδίου γίνεται με δημιουργία νοητών στοιχείων, αλλά καθορίζοντας σημεία (gridpoints – κόμβοι) πάνω σ' αυτό, οι οποίοι καλύπτουν όλο το πεδίο ορισμού των ζητούμενων ποσοτήτων (Σχήμα 3.4).

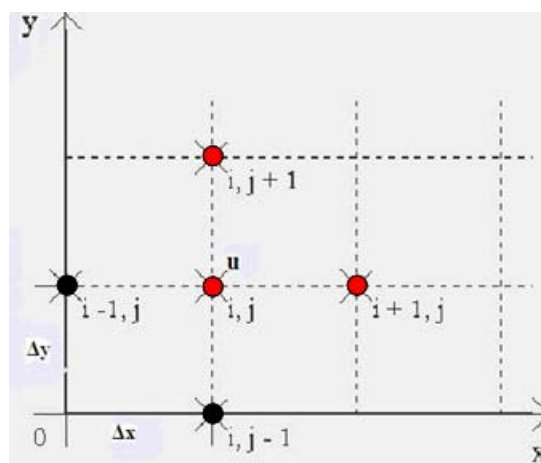


Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση και μέρη αυτής στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, (Brady & Brown, 2004).

Δηλαδή, δημιουργείται στην ουσία ένα πλέγμα από σημεία, στα οποία υπολογίζονται οι μετατοπίσεις, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις. Έπειτα, υπολογίζεται η τιμή των ζητούμενων ποσοτήτων σε κάθε κόμβο του πεδίου, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν τα ζητούμενα μεγέθη στους κόμβους του πεδίου. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών αρχικής κατάστασης σε χώρο και χρόνο, οπότε είναι εφικτή η κατασκευή ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων, από την επίλυση του οποίου προκύπτουν οι άγνωστες μεταβλητές.

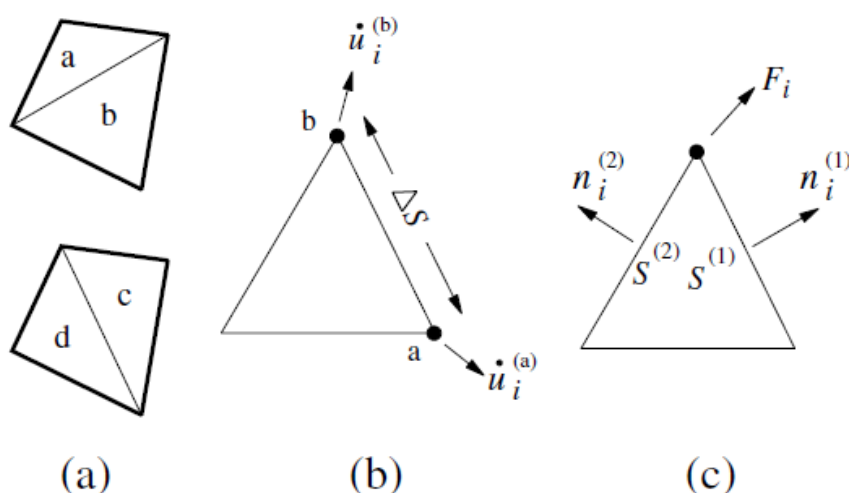
Για την επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο, εφαρμόζονται συνοριακές ή αρχικές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες αποτελούν στην ουσία συνοριακές συνθήκες αρχικής κατάστασης του προβλήματος, στο χώρο και το χρόνο. Με την εφαρμογή αυτών των συνθηκών κατασκευάζεται ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων από την επίλυση του οποίου, προκύπτουν οι άγνωστες μεταβλητές στους κόμβους του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002).

Επομένως η αριθμητική προσέγγιση των παραγώγων των διαφορικών εξισώσεων οι οποίες πρόκειται να επιλυθούν με τη μέθοδο αυτή, έχει σημειοκεντρικό χαρακτήρα (σχήμα 3.5) (Brady & Brown, 2004).



Σχήμα 3.5: Ενδεικτικός κάρναβος της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, για τον υπολογισμό της άγνωστης μεταβλητής u . Απεικόνιση του τρόπου επίλυσης στην Μ.Π.Δ. Τα μαύρα σημεία αποτελούν γνωστές ποσότητες με τις οποίες επιλύονται οι άγνωστες ποσότητες (κόκκινα σημεία) των επόμενων κόμβων. (<http://www.puc-rio.br/marco.ind/katia-num.html#finite-differences>).

Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, το νοητό πλέγμα συνήθως αποτελείται από νοητά τετράπλευρα στοιχεία. Το πρόγραμμα FLAC, του οποίου το λογισμικό FLAC/Slope που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα του, δύναται να διαιρεί κάθε στοιχείο εσωτερικά, σε δύο υπερτιθέμενα σταθερής παραμόρφωσης, τριγωνικά στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, προς λεπτομερέστερη διακριτοποίηση, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για την επίλυση ενός προβλήματος.



Σχήμα 3.6: Είδη στοιχείων στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών: α) Υπερτιθέμενα τετράπλευρα στοιχεία, β) Τυπικό τριγωνικό στοιχείο με ανδύσματα ταχύτητας γ) Διάνυσμα κομβικής δύναμης (Itasca, FLAC v 6.0, User's manual, 2008).

Επομένως τα βήματα που ακολουθούνται κατά την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, ανακεφαλαιωτικά είναι:

1. Διακριτοποίηση του πεδίου σε νοητό πλέγμα, που ορίζουν οι κόμβοι.
2. Μετατροπή της συνεχούς εξίσωσης συμπεριφοράς του, σε εξισώσεις διαφορών στους κόμβους του μέσου, σε διαστήματα που ορίζονται από το πλέγμα των κόμβων.
3. Κατασκευή ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων προς επίλυση, όπου υπολογίζονται οι άγνωστες μεταβλητές.

Γενικότερα, στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, διακρίνονται τρία συστήματα αριθμητικής προσέγγισης των παραγώγων των συναρτήσεων προς επίλυση: το ευθύ σύστημα διαφορών, το κεντρικό και το ανάστροφο (Αγιουτάντης, 2002).

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το κάθε σύστημα, βάσει του σχήματος 3.5 είναι:

Για την πρώτη παράγωγο:

- ✓ Ευθύ σύστημα διαφορών:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y} + O(\Delta y) \quad (3.9)$$

- ✓ Κεντρικό σύστημα διαφορών:

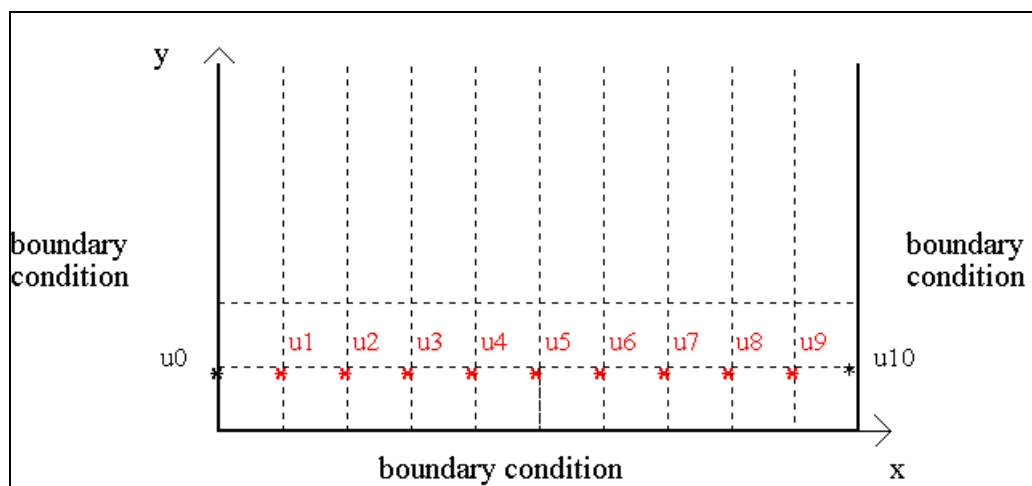
$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta y} + O[(\Delta y)^2] \quad (3.11)$$

- ✓ Ανάστροφο σύστημα διαφορών:

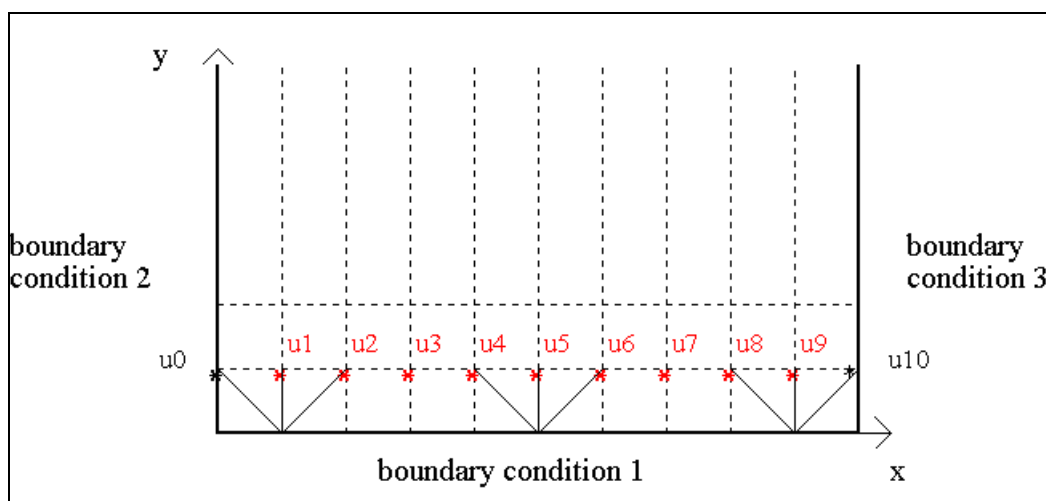
$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\Delta y} + O(\Delta y) \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση έκφρασης συνοριακών συνθηκών (<http://www.puc-rio.br/marco.ind/katia-num.html#finite-differences>)

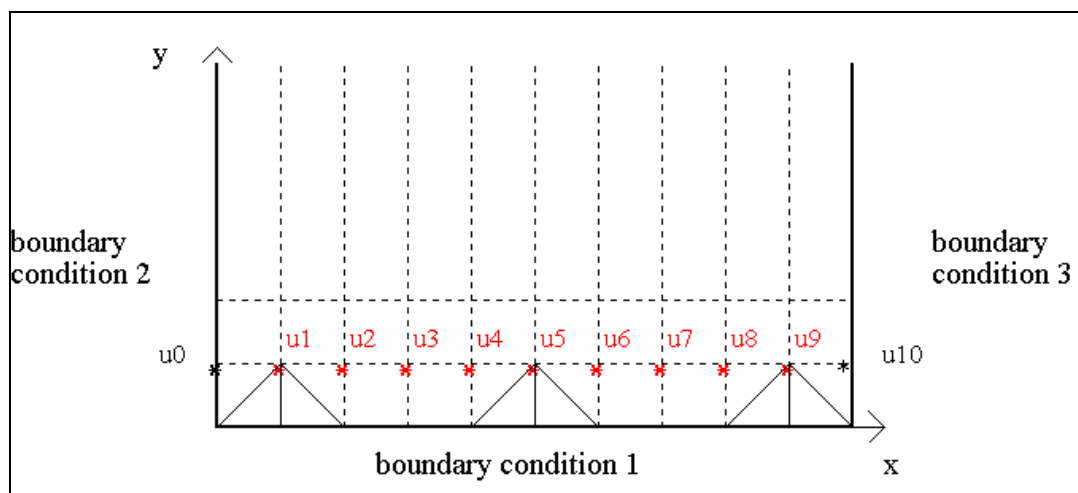
Στην περίπτωση της έμμεσης μεθόδου (Μ.Π.Σ.), δημιουργείται ένα σύστημα εννέα γραμμικών εξισώσεων με εννέα αγνώστους προς επίλυση (σχήμα 3.9) (Rocha, 1999).



Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση έμμεσης μεθόδου υπολογισμού των αγνώστων μεταβλητών (<http://www.puc-rio.br/marco.ind/katia-num.html#finite-differences>)

Στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που διέπουν το στοιχείο, οδηγεί σε μία τελική συνάρτηση, στην οποία απαιτείται η επιπλέον διαδικασία παραγωγίσιμης και ολοκλήρωσης, έτσι ώστε να προκύψουν οι ζητούμενες άγνωστες ποσότητες. Διαδικασία, η οποία είναι χρονοβόρα.

Χρησιμοποιώντας την άμεση μέθοδο (Μ.Π.Δ.), τα στοιχεία $u_1 - u_9$ μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα από τη συνοριακή συνθήκη 1 (σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση άμεσης μεθόδου υπολογισμού των αγνώστων μεταβλητών (<http://www.puc-rio.br/marco.ind/katia-num.html#finite-differences>)

Καθώς στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, εξ αρχής δεν ορίζεται στοιχείο παρά μόνο κόμβοι, δεν τίθεται θέμα αλληλοεμπλοκής των εσωτερικών σημείων του στοιχείου με τους κόμβους του (όπως δηλαδή συμβαίνει στην Μ.Π.Σ.), οπότε το τελικό σύστημα εξισώσεων προς επίλυση, είναι μικρότερο. Επομένως, γίνεται κατανοητό πως η διαδικασία υπολογισμού των αγνώστων μεταβλητών σε ένα πρόβλημα, είναι ταχύτερη και απλούστερη με την άμεση επίλυση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, από αυτή της έμμεσης επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να συγκριθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία παραμόρφωσης. Ως εκ τούτου ορισμένα από τα επιχειρήματα που αναφέρθηκαν στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ισχύουν βασικά και για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ωστόσο, λόγω της χρήσης του άμεσου/ρητού αλγόριθμου, διακρίνονται κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου (Carter, 2000 και Brady & Brown, 2004):

Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου:

1. Δεν σχηματίζονται μεγάλοι πίνακες (μητρώα), οι οποίοι εκτός από δισεπίλυτοι έχουν και μεγάλο υπολογιστικό κόστος.
2. Μοντέλα πλαστικής παραμόρφωσης, κράτυνσης και χαλάρωσης, καθώς και η αλληλεπίδραση εδαφους-κατασκευής, είναι γενικότερα ευκολότερο να εισαχθούν σε σχέση με τα πεπερασμένα στοιχεία.

3. Η προετοιμασία προσομοίωσης για απλά προβλήματα αποτελεί εύκολη διαδικασία.

Μειονεκτήματα:

1. Η μέθοδος είναι λιγότερο αποτελεσματική για γραμμικά ή μετρίως μη γραμμικά προβλήματα.
2. Η επαναληπτική διαδικασία μιας επίλυσης, η οποία δύναται να είναι πολύωρη μέχρι να επιτευχθεί η οριακή ισορροπία (Brady & Brown, 2004).
3. Μέχρι πρόσφατα, η προσομοίωση σύνθετων δομών στις 3 διαστάσεις δεν ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική, επειδή δεν ήταν διαθέσιμα εξελιγμένα εργαλεία προεπεξεργασίας, σε σύγκριση με τους προ-επεξεργαστές των πεπερασμένων στοιχείων.
4. Επειδή η μέθοδος βασίζεται σε νόμο του Νεύτωνα δεν υπάρχει «επίλυση σύγκλισης» για στατικά προβλήματα, όπως στην περίπτωση στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η απόφαση για το κατά πόσο ή όχι, έχουν πραγματοποιηθεί επαρκή χρονικά βήματα για την εξεύρεση λύσης (κάτω αλλά πλησίον της αστοχίας) πρέπει να ληφθεί από το χρήστη. Η κρίση αυτή δεν είναι πάντα εύκολη, κάτω υπό ορισμένες συνθήκες, αν και αρκετοί έλεγχοι είναι δυνατοί (π.χ., μη εξισορροπημένες δυνάμεις, πεδίο ταχύτητας).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC/SLOPE****Εισαγωγή**

Το παρόν κεφάλαιο έχει γραφτεί σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού FLAC/Slope, καθώς και του θεωρητικού υπόβαθρου του μητρικού κώδικα FLAC, που είναι ο πυρήνας του λογισμικού εργαλείου (Fourth Edition FLAC Version 6.0, July 2008).

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα εργασία, η παραμετρική ανάλυση ευστάθειας πρανών πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού πακέτου FLAC/Slope, με τις εκδόσεις 4.0 και 6.0.

Το συγκεκριμένο λογισμικό εργαλείο αποτελεί μία 4έκδοση του λογισμικού FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), της εταιρείας Itasca Consulting Group, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στην ανάλυση ευστάθειας των πρανών. Αυτή η έκδοση λειτουργεί αποκλειστικά από το περιβάλλον εργασίας του FLAC (το GPC), το οποίο παρέχεται για τον πολύ γρήγορο σχεδιασμό μοντέλων/προτύπων για εδαφικά ή και βραχώδη πρανή, και για την επίλυση της κατάστασης σταθερότητας.

Σημειώνεται, πως δεν απαιτείται η εμπειρία του προγράμματος FLAC, για την εκμάθηση και λειτουργία του πακέτου, FLAC/Slope.

4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC

Δεδομένου ότι ο συντελεστής FoS ορίζεται ως ένας παράγοντας μείωσης της διατμητικής δύναμης, ένας προφανής τρόπος να υπολογιστεί το FoS είτε με ένα

πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είτε με ένα πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών, είναι απλά με τη τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής, η οποία πραγματοποιείται με μείωση των παραμέτρων της συνοχής c και της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ του εδαφικού υλικού, έως ότου εμφανιστεί η αστοχία.

Σημειώνεται, πως στο πρόγραμμα των πεπερασμένων διαφορών, η αστοχία υποδεικνύεται με το ρυθμό μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης (με τον οποίο οριοθετείται και η περιοχή της αστοχίας) και τα διανύσματα της ταχύτητας (τα οποία υποδεικνύουν το μοτίβο της αστοχίας).

Το πακέτο FLAC περιγράφεται ως ένα πρόγραμμα άμεσων πεπερασμένων διαφορών, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Dr. Cundall Peter, το 1986, και εκτελεί μια Lagrangian ανάλυση. Το πρόγραμμα ίσως αποτελεί την παλαιότερη αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων, με δεδομένες αρχικές και συνοριακές τιμές (Itasca, 2008).

Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, κάθε παράγωγος στο σύνολο των καταστατικών εξισώσεων, αντικαθίσταται άμεσα από μια αλγεβρική έκφραση γραμμένη σε όρους των μεταβλητών του πεδίου (π.χ., τάση ή μετατόπιση) σε διακριτά σημεία στο χώρο. Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ως βασική προϋπόθεση, οι ποσότητες του πεδίου (τάση, μετατόπιση) να ποικίλλουν σε κάθε στοιχείο, με προκαθορισμένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες λειτουργίες οι οποίες ελέγχονται από τις παραμέτρους. Η διατύπωση περιλαμβάνει την προσαρμογή αυτών των παραμέτρων για την ελαχιστοποίηση των όρων λάθους. Και οι δύο μέθοδοι παράγουν ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων προς επίλυση, με τη διαφορά ότι αυτές προκύπτουν με διαφορετικό τρόπο στην κάθε μέθοδο.

Το πρόγραμμα FLAC προσομοιώνει τη συμπεριφορά των δομών από εδαφικά, βραχώδη ή άλλα υλικά που μπορούν να υποβληθούν σε πλαστική ροή όταν φθάσουν στα όρια διαρροής τους. Τα υλικά αντιπροσωπεύονται από στοιχεία, ή ζώνες, οι οποίες αποτελούν ένα πλέγμα που ρυθμίζεται από το χρήστη, ώστε να ταιριάζει στο σχήμα του αντικείμενου που θα διαμορφωθεί. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με έναν καθορισμένο νόμο γραμμικής ή μη γραμμικής τάσης/παραμόρφωσης για την αντιμετώπιση των δυνάμεων που εφαρμόζονται ή τους περιορισμούς των συνοριακών συνθηκών. Το υλικό μπορεί να αστοχήσει και να παρουσιαστεί ροή, οπότε και το πλέγμα δύναται να παραμορφωθεί (υπό συνθήκη μεγάλης παραμόρφωσης) και να μετακινηθεί μαζί με το υλικό. Το άμεσο σύστημα

υπολογισμού Lagrangian και η μεικτή τεχνική διακριτοποίησης ζωνών (υποδιαίρεση των τετράπλευρων στοιχείων του πλέγματος σε τρίγωνικά στοιχεία, χάριν λεπτομερέστερης διακριτοποίησης) που χρησιμοποιείται στο FLAC, εξασφαλίζουν ότι η πλαστική κατάρρευση και η ροή διαμορφώνονται με μεγάλη ακρίβεια.

Επειδή δεν σχηματίζονται πίνακες (μητρώα), μπορούν να γίνουν δισδιάστατοι υπολογισμοί χωρίς υπερβολικές απαιτήσεις σε μνήμη. Τα μειονεκτήματα της άμεσης επίλυσης (όπως, ο περιορισμός του μικρού βήματος υπολογισμού και το θέμα της απαιτούμενης απόσβεσης) ξεπερνιούνται σε κάποιο βαθμό από την αυτόματη κλιμάκωση αδράνειας και την αυτόματη απόσβεση, που δεν επηρεάζουν το τρόπο λειτουργίας της αστοχίας.

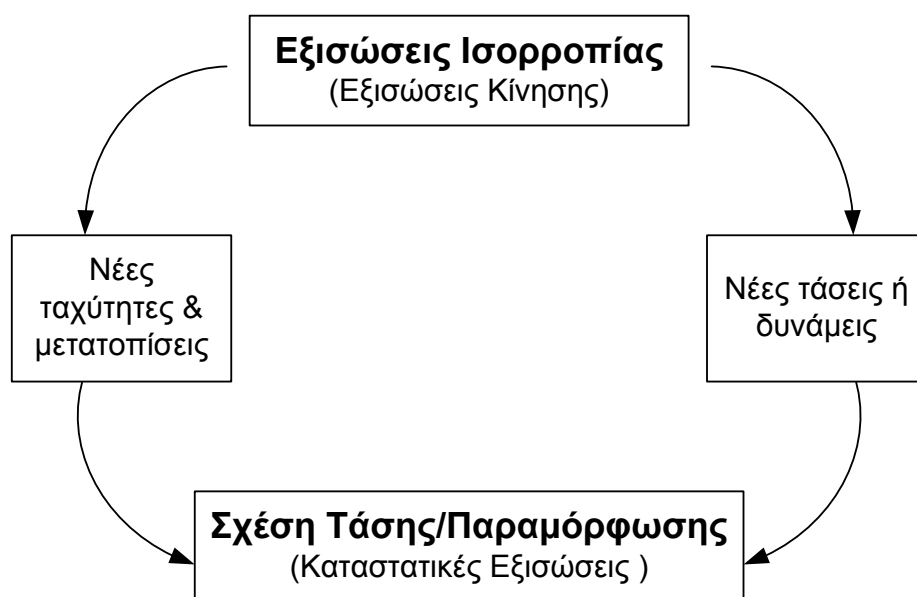
Δεδομένου ότι δεν είναι απαραίτητο να διαμορφωθεί ένα γενικό μητρώο δυσκαμψίας, δεν θεωρείται σημαντικό να ενημερώνονται οι συντεταγμένες σε κάθε χρονικό βήμα σε λειτουργία μεγάλης καταπόνησης/παραμόρφωσης. Οι στοιχειώδεις μετατοπίσεις προστίθενται στις συντεταγμένες, έτσι ώστε το πλέγμα να κινείται και να παραμορφώνεται, μαζί με το υλικό που αντιπροσωπεύει. Αυτό ονομάζεται «Lagrangian» διατύπωση, σε αντίθεση με μια "Euler" διατύπωση, στην οποία το υλικό κινείται και παραμορφώνεται, σε σχέση με ένα σταθερό πλέγμα. Η καταστατική διατύπωση σε κάθε βήμα είναι μικρής-παραμόρφωσης, αλλά ισοδυναμεί με μια μεγάλης-παραμόρφωσης διατύπωση, σε πολλά βήματα.

Το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί για υψηλής ταχύτητας υπολογισμού μοντέλων που περιέχουν αρκετές χιλιάδες στοιχεία. Με τις εξελίξεις στο τομέα των υπολογιστικών συστημάτων και της απόδοσής τους, όπως της ταχύτητας λειτουργίας και τη δυνατότητα εγκατάστασης επιπλέον μνήμης (RAM) με χαμηλό κόστος, όλο και μεγαλύτερα προβλήματα μπορούν να λυθούν με το FLAC. Για παράδειγμα, το FLAC μπορεί να λύσει ένα μοντέλο που περιέχει έως και 30.000 στοιχεία ενός Mohr-Coulomb μοντέλου, σε έναν υπολογιστή με διαθέσιμη μνήμη 24MB. Η ταχύτητα επίλυσης για ένα μοντέλο αυτού του μεγέθους είναι περίπου δεκατέσσερα υπολογιστικά βήματα ανά δευτερόλεπτο, σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή 2.4GHz Pentium IV. Η ταχύτητα είναι ουσιαστικά μια γραμμική συνάρτηση του αριθμού των στοιχείων. Ένα μοντέλο των 15.000 στοιχείων, απαιτεί το ήμισυ του χρόνου εκτέλεσης για την επεξεργασία του ίδιου αριθμού βημάτων υπολογισμού (Itasca, 2008).

Για τυπικά μοντέλα, που αποτελούνται από 15.000 στοιχεία ή λιγότερα, η άμεση λύση στο πρόγραμμα FLAC απαιτεί περίπου 4000 με 6000 βήματα για την επίτευξη επιλυμένης κατάστασης. Έτσι, ένα μοντέλο 15.000 στοιχείων, το οποίο εκτελείται με τον επεξεργαστή Pentium που προαναφέρθηκε, θα απαιτήσει περίπου τρία λεπτά της ώρας για να εκτελέσει 5000 υπολογιστικά βήματα. Ως εκ τούτου, τυπικά προβλήματα μηχανικής που αφορούν αρκετές χιλιάδες στοιχεία για προσομοίωση, μπορούν να επιλυθούν με το FLAC σε έναν υπολογιστή μέσα σε λίγα λεπτά.

Παρόλο που με το FLAC μπορεί να ζητείται μια στατική λύση σε ένα πρόβλημα, οι δυναμικές εξισώσεις της κίνησης περιλαμβάνονται στη διατύπωση. Ένας λόγος που γίνεται αυτό, είναι για να εξασφαλιστεί ότι το αριθμητικό σύστημα είναι σταθερό, όταν το φυσικό σύστημα το οποίο προσομοιώνεται είναι ασταθές. Με μη γραμμικά υλικά, υπάρχει πάντα η πιθανότητα της φυσικής αστάθειας (π.χ., η ξαφνική κατάρρευση ενός στύλου). Στην πραγματικότητα, μέρος της ενέργειας παραμόρφωσης μέσα στο σύστημα μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια αντανακλάται μακριά από την πηγή και διαχέεται. Το FLAC, προσομοιώνει αυτή τη διαδικασία άμεσα, διότι περιλαμβάνονται οι όροι αδράνειας, οπότε παράγεται κινητική ενέργεια και διαχέεται. Αντιθέτως, τα συστήματα που δεν περιλαμβάνουν όρους αδράνειας πρέπει να χρησιμοποιούν κάποια αριθμητική διαδικασία για την αντιμετώπιση φυσικών ασταθειών. Ακόμη και αν η διαδικασία η οποία λήφθηκε είναι επιτυχής στην πρόληψη αστάθειας, η πορεία η οποία πραγματοποιήθηκε μπορεί να μην είναι ρεαλιστική. Στο πρόγραμμα FLAC, η ενσωμάτωση του πλήρους νόμου της κίνησης γίνεται ώστε ο χρήστης να έχει κάποια συναισθήση του τι συμβαίνει. Το πρόγραμμα δεν αποτελεί «μαύρο κουτί» το οποίο δίνει απλά τη λύση, πρέπει να ερμηνεύεται η συμπεριφορά του αριθμητικού συστήματος (Itasca, 2008).

Η γενική ακολουθία υπολογισμού που ενσωματώνεται στο πρόγραμμα FLAC απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Η διαδικασία αυτή επιλύει πρώτα τις εξισώσεις της κίνησης προκειμένου να προκύψουν νέες ταχύτητες και μετακινήσεις από τις τάσεις και τις δυνάμεις. Στη συνέχεια, προκύπτουν οι συντελεστές παραμόρφωσης από τις ταχύτητες, και έπειτα νέες τάσεις από αυτούς τους συντελεστές παραμόρφωσης. Πραγματοποιείται ένα χρονικό βήμα κάθε φορά, για τον κύκλο γύρω από το βρόχο. Το σημαντικό γεγονός που υλοποιείται είναι, ότι κάθε κουτί στο σχήμα 4.1, ενημερώνει όλες τις μεταβλητές του πλέγματός του, από τις γνωστές τιμές που παραμένουν σταθερές, ενώ ο έλεγχος είναι μέσα στο κουτί.



Σχήμα 4.1: Γενική ακολουθία υπολογισμού στο FLAC.

Παραδείγματος χάριν, στο χαμηλότερο πλαίσιο εισάγεται το σύνολο των ταχυτήτων που υπολογίστηκαν ήδη και, για κάθε στοιχείο υπολογίζονται οι νέες τάσεις. Οι ταχύτητες υποτίθεται ότι πρέπει να «παγώσουν»/δεσμευτούν για τη λειτουργία του συγκεκριμένου πλαισίου (δηλαδή, οι πρόσφατα υπολογισμένες τάσεις δεν έχουν επίπτωση στις ταχύτητες). Αυτό μπορεί να φαίνεται παράλογο, διότι είναι γνωστό πως εάν μια τάση αλλάζει κάπου, λογικά θα επηρεάσει τους γείτονές της και θα αλλάξει τις ταχύτητές τους. Εντούτοις, επιλέγεται ένα τόσο μικρό χρονικό βήμα που οι πληροφορίες δεν μπορούν να περάσουν φυσιολογικά από το ένα στοιχείο στο άλλο σε αυτό το διάστημα (όλα τα υλικά έχουν κάποια μέγιστη ταχύτητα με την οποία οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν). Δεδομένου ότι ένας βρόχος του κύκλου καταλαμβάνει ένα χρονικό βήμα, η παραδοχή των "παγωμένων" ταχυτήτων είναι δικαιολογημένη, καθώς τα γειτονικά στοιχεία δεν μπορούν πραγματικά να έχουν επιπτώσεις το ένα στο άλλο, κατά τη διάρκεια της περιόδου υπολογισμού. Φυσικά, μετά από αρκετούς κύκλους της διαδρομής, διαταραχές μπορούν να διαδοθούν σε διάφορα στοιχεία, ακριβώς όπως θα διαδίδονταν φυσικά (Itasca, 2008).

Η κεντρική ιδέα είναι ότι η υπολογιστική «ταχύτητα κύματος» (*wave speed*) προηγείται πάντα μπροστά από τη φυσική ταχύτητα κύματος, έτσι ώστε οι εξισώσεις πάντα να λειτουργούν με γνωστές τιμές που έχουν καθοριστεί για τη διάρκεια του υπολογισμού.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα σε αυτό το τρόπο υπολογισμού, είναι ότι καμία επανάληψη της διαδικασίας δεν είναι απαραίτητη, όταν υπολογίζονται τάσεις από τις παραμορφώσεις σε ένα στοιχείο, έστω και αν ο καταστατικός νόμος είναι έντονα μη γραμμικός.

Σε μια έμμεση μέθοδο (η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων), κάθε στοιχείο επικοινωνεί με κάθε άλλο στοιχείο κατά τη διάρκεια του βήματος επίλυσης: αρκετοί κύκλοι επανάληψης της είναι απαραίτητοι προτού επιτευχθεί η συμβατότητα και η ισορροπία. Το μειονέκτημα της άμεσης μεθόδου, είναι το μικρό χρονικό βήμα που έχει, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να ληφθεί μεγάλος αριθμός βημάτων.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύονται από το *FLAC* είναι πανομοιότυπες με αυτές που επιλύονται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, στο *FLAC*, αυτό το σύνολο των εξισώσεων επιλύεται με δυναμική χαλάρωση (Otter et al., 1996), μια άμεση, χρονο-εξελισσόμενη (*time-marching*) διαδικασία, κατά την οποία οι πλήρως δυναμικές εξισώσεις της κίνησης, ολοκληρώνονται βήμα προς βήμα. Οι στατικές επιλύσεις προκύπτουν συμπεριλαμβάνοντας τους όρους μείωσης, που σταδιακά απομακρύνουν την κινητική ενέργεια από το σύστημα. Το κριτήριο σύγκλισης για το *FLAC* είναι η κομβική μη ισορροπημένη δύναμη, δηλαδή το άθροισμα των δυνάμεων που επιδρούν σε ένα κόμβο από τα γειτονικά του στοιχεία. Εάν ένας κόμβος είναι σε ισορροπία, αυτές οι δυνάμεις θα πρέπει να έχουν άθροισμα μηδέν (Dawson and Roth, 1999).

4.3 ΒΑΣΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ *FLAC/SLOPE*

Το λογισμικό *FLAC/Slope* αποτελεί μία εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά προγράμματα της «οριακής ισορροπίας» για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Τα προγράμματα οριακής ισορροπίας, χρησιμοποιούν ένα προσεγγιστικό σύστημα (συνήθως βασισμένο στη μέθοδο των λωρίδων), κατά το οποίο πραγματοποιείται μια σειρά παραδοχών (π.χ., η θέση και η γωνία των δυνάμεων των φετών). Δοκιμάζονται αρκετές υποτιθέμενες επιφάνειες αστοχίας, και αυτή που δίνει την χαμηλότερη τιμή του συντελεστή ασφαλείας, επιλέγεται. Η ισορροπία επέρχεται μόνο σε ένα εξιδανικευμένο σύνολο επιφανειών.

Αντίθετα, το λογισμικό *FLAC/Slope*, παρέχει πλήρη επίλυση της συζευγμένης τάσης/μετατόπισης, ισορροπίας και καταστατικών εξισώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο ιδιοτήτων, το σύστημα καθορίζεται αν θα είναι σταθερό ή ασταθές. Με αυτόματη εκτέλεση μιας σειράς προσομοιώσεων μεταβάλλοντας τις ιδιότητες αντοχής («η τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής»), ο συντελεστής ασφάλειας μπορεί να βρεθεί και να ανταποκρίνεται στο σημείο σταθερότητας, όπως και η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας (ολίσθηση) μπορεί να εντοπιστεί (Itasca, 2008).

Το συγκεκριμένο λογισμικό, χρειάζεται περισσότερο χρόνο εκτέλεσης για τον προσδιορισμό ενός συντελεστή ασφαλείας, απ' ότι ένα πρόγραμμα οριακής ισορροπίας. Ωστόσο, με την πρόοδο των ταχυτήτων επεξεργασίας των υπολογιστών (π.χ., 1 GHz), οι επιλύσεις μπορούν να επιτευχθούν σε λογικό χρόνο. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των προτύπων στην παρούσα εργασία, διέθετε επεξεργαστή Intel Core i5 2.40GHz με 4GB μνήμη και ο χρόνος επίλυσης κυμαινόταν από 10 λεπτά έως 3,5 ώρες (ανάλογα με την πύκνωση της διακριτοποίησης του πεδίου).

Οι ελάχιστες απαιτούμενες απαιτήσεις συστήματος για τη λειτουργία του λογισμικού, είναι:

1. Η ελάχιστη διαθέσιμη χωρητικότητα του σκληρού δίσκου στον υπολογιστή, που απαιτείται για την εγκατάσταση του προγράμματος, είναι 35 MB. Συνίσταται ελεύθερος χώρος συνολικά 100 MB από το σκληρό δίσκο και για την αποθήκευση των μοντέλων ανάλυσης.
2. Για την ικανοποιητική λειτουργία του λογισμικού, το σύστημα του υπολογιστή πρέπει να διαθέτει το λιγότερο 128 MB μνήμη.
3. Η ταχύτητα του υπολογισμού εξαρτάται άμεσα από τον επεξεργαστή του υπολογιστή, επομένως συνίσταται επεξεργαστής με ελάχιστη δυναμικότητα 2 GHz.
4. Το *FLAC/Slope* είναι προϊόν λογισμικού 32-bit. Επομένως, κάθε υπολογιστής με επεξεργαστή Intel που λειτουργεί τα Windows XP ή νεότερη έκδοση είναι κατάλληλος για τη λειτουργία του κώδικα.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το πρόγραμμα έναντι ενός προγράμματος οριακής ισορροπίας, είναι:

1. Οποιαδήποτε μορφή αστοχίας αναπτύσσεται φυσικά° δεν απαιτείται να καθοριστεί εκ των προτέρων μια σειρά από δοκιμαστικές επιφάνειες.
2. Καμία τεχνητή παράμετρος (π.χ. λειτουργίες για γωνίες μεταξύ λωρίδων) δεν είναι απαραίτητο να δοθεί ως δεδομένο.
3. Πολλαπλές επιφάνειες αστοχίας (ή πολύπλοκη εσωτερική διαρροή) εμπλέκονται φυσικά, αν το ευνοούν οι συνθήκες.
4. Η διαρθρωτική αλληλεπίδραση (π.χ., αγκύρια βράχου, εδαφικά καρφιά, ή γεώπλεγμα) προσομοιώνεται ρεαλιστικά, ως πλήρως συνδεδεμένα παραμορφωτικά στοιχεία και όχι απλά σαν ισοδύναμες δυνάμεις.
5. Η επίλυση αποτελείται από μηχανισμούς οι οποίοι είναι κινηματικά εφικτοί. (Να σημειωθεί πως η μέθοδος της οριακής ισορροπίας, λαμβάνει υπόψη μόνο δυνάμεις και καθόλου κινηματική).

4.4 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLAC/SLOPE

Η τεχνική μείωσης της αντοχής, χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς για το συντελεστή ασφαλείας με προοδευτική μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού, έως ότου επέλθει σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Ο συντελεστής ασφάλειας FoS, προσδιορίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (Itasca, 2008):

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (4.1)$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (4.2)$$

Πραγματοποιείται μια σειρά προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας δοκιμαστικές τιμές για τον συντελεστή F^{trial} για την μείωση της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ , μέχρι να εμφανιστεί η αστοχία του πρανούς. (Πρέπει να σημειωθεί, πως όταν το πρανές είναι αρχικά ασταθές, τα c και ϕ θα αυξηθούν μέχρι να βρεθεί η συνθήκη ισορροπίας). Στο πρόγραμμα FLAC/Slope, γίνεται μια οριακή προσέγγιση όμοια με αυτή που προτάθηκε από τους Dawson et. al (1999).

Η τεχνική μείωσης της αντοχής που ενσωματώνεται στο πρόγραμμα, πάντα θα αποδίδει έγκυρη λύση. Στην περίπτωση ενός ασταθούς φυσικού συστήματος, το πρόγραμμα δείχνει απλά τη συνεχή κίνηση. Δεν χρησιμοποιείται επαναληπτική επίλυση, όπως στις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Η επίλυση του προγράμματος

αποτελεί μια δυναμική, χρονο-εξελισσόμενη προσομοίωση κατά την οποία η συνεχής κίνηση είναι έγκυρη ως ισορροπία. Δεν πραγματοποιείται επανάληψη στη χρήση των ελαστο-πλαστικών καταστατικών κανόνων. Ο τανυστής τάσης τοποθετείται ακριβώς στην επιφάνεια διαρροής όταν εντοπίζεται πλαστική διαρροή (ικανοποιώντας εξισώσεις, όπως τον κανόνα ροής και την ανάλυση της ελαστικο/πλαστικής καταπόνησης). Η τασική κατάσταση στο πρόγραμμα, όπου ο συντελεστής ασφάλειας ισούται με 1, αποτελεί την πραγματική τασική κατάσταση που αντιστοιχεί στον μηχανισμό διαρροής, δεν είναι μια αυθαίρετη τασική κατάσταση προ-διαρροής ή μια ελαστικά τασική κατάσταση.

Η ανίχνευση των ορίων ανάμεσα στη φυσική σταθερότητα και αστάθεια βασίζεται σε ένα αντικειμενικό κριτήριο στο FLAC/Slope, που αποφασίζει κατά πόσον το σύστημα είναι σε ισορροπία, ή σε μια κατάσταση συνεχούς κίνησης. Λεπτομερέστερες στοιχειώδεις αλλαγές που μπορεί να επηρεάσουν τη λύση σε ένα επαναληπτικό σύστημα επίλυσης, δεν είναι απαραίτητες σε ένα χρονο-εξελισσόμενο σύστημα και δεν επηρεάζουν τη λύση. Προκειμένου να προσδιοριστεί το όριο μεταξύ φυσικής σταθερότητας και αστάθειας, πραγματοποιείται μια σειρά από εντελώς διαφορετικές εκτελέσεις, με διαφορετικούς παράγοντες μείωσης. Στη συνέχεια, κάθε εκτέλεση ελέγχεται για να διαπιστωθεί αν επιτυγχάνεται ισορροπία ή συνεχής πλαστική ροή. Το σημείο της αστοχίας μπορεί να εντοπιστεί με οποιαδήποτε απαιτούμενη ακρίβεια (συνήθως 1%) από τη διαδοχική ομαδοποίηση των παραγόντων μείωσης αντοχής. Αυτή η διαδικασία δεν πρέπει να συγχέεται με τη λήψη λεπτομερέστερων μέτρων επίλυσης. Το σύστημα επίλυσης είναι πανομοιότυπο για κάθε εκτέλεση (είτε αυτό οδηγεί σε ισορροπία ή σε συνέχιση της κίνησης).

Η διαδικασία ενσωμάτωσης της τεχνικής αυτής στο πρόγραμμα, γίνεται ως ακολούθως:

Αρχικά, το πρόγραμμα βρίσκει έναν χαρακτηριστικό χρόνο ανταπόκρισης, ο οποίος είναι ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός βημάτων (που συμβολίζεται με N_r) και χαρακτηρίζει τον χρόνο απόκρισης του συστήματος. Ο αριθμός N_r υπολογίζεται με τον καθορισμό της συνοχής και της αντοχής σε εφελκυσμό σε μεγάλες τιμές, πραγματοποιώντας μια μεγάλη αλλαγή στις εσωτερικές τάσεις, και υπολογίζοντας έτσι τον αριθμό των βημάτων που απαιτούνται ώστε το σύστημα να επιστρέψει στην ισορροπία. (Σημειώνεται, πως το μέγιστο όριο βημάτων (N_r) στο πρόγραμμα, έχει καθοριστεί στις 50,000. Εάν το μοντέλο δεν επέλθει σε ισορροπία σε αυτό το

περιθώριο, τότε η εκτέλεση υπολογισμού θα σταματήσει χωρίς να ολοκληρωθεί η διαδικασία επίλυσης).

Εάν η αναλογία μη ισορροπημένης δύναμης είναι μικρότερη από 10^{-3} , τότε το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Αν όμως είναι μεγαλύτερη του, τότε εκτελείται επιπλέον αριθμός βημάτων, βγαίνοντας από το βρόχο, αν η αναλογία δύναμης είναι μικρότερη από 10^{-3} .

Η μη ισορροπημένη δύναμη είναι η καθαρή δύναμη που ενεργεί σε έναν κόμβο του FLAC. Ο λόγος αυτής της δύναμης, προς το μέσο όρο της απόλυτης τιμής της δύναμης που ασκείται από κάθε ζώνη που τον περιβάλλει, είναι η ισορροπημένη αναλογία δύναμης.

Οι ακόλουθες πληροφορίες εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης:

1. Αριθμός βημάτων υπολογισμού που έχουν ολοκληρωθεί για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή FoS, ως ποσοστό του N_r .
2. Αριθμός των ολοκληρωμένων κύκλων επίλυσης (π.χ., δοκιμές για την ισορροπία ή μη).
3. Μήνυμα: «Η διαδικασία διενεργείται επί του παρόντος».
4. Τρέχουσες τιμές οριοθέτησης (*bracketing*) του συντελεστή FoS.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, σταματά όταν η διαφορά (*bracket*) μεταξύ του άνω και κάτω ορίου είναι μικρότερη του 0,005 (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση παράθυρου πληροφοριών κατά το στάδιο επίλυσης στο πρόγραμμα FLAC/Slope.

Εάν στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, έχουν συμπεριληφθεί: η αντοχή σε εφελκυσμό, η τριβή και η συνοχή διεπιφάνειας, η τριβή, συνοχή και αντοχή εφελκυσμού σε μοντέλο συνεχούς άρθρωσης (*ubiquitous-joint*), η αντοχή σκυροδέματος ενίσχυσης, τότε υπολογίζονται δοκιμαστικές ιδιότητες με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που χρησιμοποιείται για τη συνοχή και τριβή του υλικού.

Για την αντοχή σε εφελκυσμό σ^t , η εξίσωση μείωσης είναι:

$$\sigma^{t(trial)} = \frac{1}{F^{trial}} \sigma^t \quad (4.3)$$

Οι τιμές c_i και ϕ_i για την αντοχή διεπιφάνειας, οι εξισώσεις, είναι:

$$c_i^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c_i \quad (4.4)$$

$$\phi_i^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi_i\right) \quad (4.5)$$

Για τις τιμές c_j , ϕ_j και σ_j^t , αντοχής του μοντέλου συνεχούς άρθρωσης, οι εξισώσεις είναι:

$$c_j^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c_j \quad (4.6)$$

$$\phi_j^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi_j\right) \quad (4.7)$$

$$\sigma_j^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} \sigma_j^t \quad (4.8)$$

Οι τιμές c_b και ϕ_b , για την αντοχή σκυροδέματος ενίσχυσης, οι εξισώσεις μείωσης αντοχής, είναι:

$$c_b^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c_b \quad (4.9)$$

$$\phi_b^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi_b\right) \quad (4.10)$$

Αυτές οι τιμές, χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

4.5 ΣΥΝΟΨΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Το λογισμικό FLAC/Slope μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρεία ποικιλία συνθηκών για την αξιολόγηση της ευστάθειας πρανών και επιχωμάτων. Κάθε συνθήκη προσδιορίζεται σε ένα ξεχωριστό γραφικό εργαλείο (Itasca, 2008).

1. Η δημιουργία των ορίων της γεωμετρίας ενός πρανούς (συνοριακές συνθήκες) επιτρέπει την ταχεία δημιουργία γραμμικών, μη γραμμικών και βαθμωτών πρανών και επιχωμάτων. Το εργαλείο **Bound** παρέχει ξεχωριστές επιλογές και για απλές μορφές πρανών και για πιο περίπλοκες μη γραμμικές επιφάνειες. Επίσης, μπορεί να εισαχθεί μια εικόνα σε μορφή ή DXF, ως εικόνα φόντου για την υποβοήθηση δημιουργίας των ορίων.
2. Πολλαπλά στρώματα υλικών μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο σε αυθαίρετους προσανατολισμούς και σε μη ομοιόμορφα πάχη. Τα στρώματα καθορίζονται εύκολα με το πάτημα και σύρσιμο του κέρσορα του υπολογιστή, για τον προσδιορισμό των συνοριακών συνθηκών του στρώματος στο εργαλείο **Layers**.
3. Υλικά και ιδιότητες μπορούν να προσδιοριστούν από το χρήστη ή από μία βάση δεδομένων στο εργαλείο **Material**. Προς το παρόν, όλα τα υλικά υπακούν είτε στο νόμο των Mohr – Coulomb ή το μοντέλο διαρροής συνεχούς άρθρωσης (*ubiquitous-joint yield model*), και να οριστούν ετερογενείς ιδιότητες. Οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να εισαχθούν μέσω των πλαισίων διαλόγου για τα υλικά τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν και να αναπαραχθούν για να δημιουργήσουν πολλαπλά υλικά γρήγορα.
4. Με το εργαλείο **Interface**, μια επίπεδη ή μη, διεπιφάνεια που αντιπροσωπεύει μια ένωση, ένα ρήγμα ή μια ασθενή στρώση, δύναται να τοποθετηθεί σε αυθαίρετη θέση και προσανατολισμό στο μοντέλο. Οι ιδιότητες της αντοχής μιας διεπιφάνειας εισάγονται στο πλαίσιο διαλόγου των ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες μπορούν να προσδιοριστούν έτσι, ώστε να ποικίλουν κατά τη διάρκεια υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας, ή να παραμένουν σταθερές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το FLAC/Slope έχει περιορισμό στις διαμορφώσεις πρανών, με όχι περισσότερες από μία διεπιφάνεια. Για αναλύσεις που

αφορούν πολλαπλές και τεμνόμενες διακλάσεις ή ασθενείς στρώσεις, προτείνεται το πλήρες πρόγραμμα FLAC.

5. Το εργαλείο Apply, χρησιμοποιείται για την εφαρμογή φορτίου στην επιφάνεια του μοντέλου υπό μορφή είτε επιφανειακής φόρτισης, είτε σημειακής φόρτισης.
6. Ένας υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να τοποθετηθεί σε αυθαίρετη θέση χρησιμοποιώντας το εργαλείο Water. Με την εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα, προσδιορίζεται η επιφάνεια αυτού και η κατανομή της πίεσης των πόρων για την ένταξη των ενεργών πιέσεων, των υγρών και ξηρών πυκνοτήτων, στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.
7. Δομική ενίσχυση, όπως τα εδαφικά καρφιά, αγκύρια βράχου ή γεωμεμβράνες, μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιαδήποτε θέση μέσα στο μοντέλο χρησιμοποιώντας το εργαλείο Reinforce. Οι ιδιότητες δομής μπορούν καθοριστούν ξεχωριστά για διαφορετικά στοιχεία, ή κατηγορίες στοιχείων, μέσω του πλαισίου διαλόγου των ιδιοτήτων.
8. Επιλεγμένες περιοχές ενός πρότυπου μοντέλου στο πρόγραμμα, μπορεί να αποκλειστεί από τη διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας μέσω της εντολής Exclude. Αυτό είναι χρήσιμο όταν μελετάται σύνθετη γεωμετρία πρανών στην οποία ο χρήστης επιθυμεί να αγνοήσει περιοχές, όπως η τοπική σχιστότητα (*sloughing*) κατά μήκος του μετώπου του πρανούς.

4.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο εν λόγω λογισμικό ο χρήστης έχει την ευχέρεια επιλογής μεταξύ δύο καταστατικών πλαστικών μοντέλων τα οποία είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα για την ανάλυση πρανών (Itasca, 2008).

1. Μοντέλο Mohr-Coulomb: Το μοντέλο πλαστικότητας Mohr –Coulomb (το οποίο αποτελεί την πλέον εφαρμόσιμη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών) χρησιμοποιείται για υλικά που διαρρέουν, όταν υπόκεινται σε διατμητική φόρτιση, αλλά η διαρροή εξαρτάται από τις μέγιστες και ελάχιστες κύριες τάσεις. Η ενδιάμεση κύρια τάση δεν έχει καμία επίδραση στην διαρροή (εκτενέστερη ανάλυση του μοντέλου αυτού, στο Παράρτημα Α).

2. Μοντέλο συχνά εμφανιζόμενων ρωγμών: Αποτελεί πλαστικό ανισοτροπικό μοντέλο που περιλαμβάνει ασθενή επίπεδα συγκεκριμένου προσανατολισμού τα οποία είναι ενσωματωμένα σε ένα Mohr-Coulomb στερεό. Σε αυτό το μοντέλο, η διαρροή μπορεί να εμφανιστεί είτε μέσα στο στερεό ή κατά μήκος του ασθενούς επιπέδου, ή και α δύο μαζί, ανάλογα με την καταπόνηση, τον προσανατολισμό του ασθενούς επιπέδου και των ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν το μοντέλο. Κατά την εφαρμογή του προγράμματος, γίνεται η χρήση μιας τεχνικής με την οποία πρώτα εντοπίζεται η γενική αστοχία και γίνονται οι σχετικές πλαστικές διορθώσεις, στη συνέχεια αναλύονται οι νέες τάσεις για το ασθενές επίπεδο και ενημερώνονται αναλόγως. Το κριτήριο αστοχίας για το ασθενές επίπεδο, είναι ένα τοπικό κριτήριο τύπου Mohr-Coulomb, με αποκοπή των εφελκυστικών τάσεων. Ο τοπικός κανόνας πλαστικής ροής δεν είναι συνηρτημένος, αλλά ο κανόνας ροής εφελκυσμού είναι.

4.7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Το πρόγραμμα αυτό σχεδιάστηκε ειδικά για τη διεξαγωγή πολλαπλών αναλύσεων και παραμετρικών μελετών για θέματα ευστάθειας πρανών. Η δομή του προγράμματος επιτρέπει την εύκολη δημιουργία διαφορετικών μοντέλων σε ένα έργο, την αποθήκευση και πρόσβαση για απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Η διαδικασία ανάλυσης ενός έργου στο FLAC/Slope χωρίζεται σε τέσσερα στάδια. Αυτά είναι (Itasca, 2008):

4.7.1 Στάδιο Εισαγωγής Μοντέλων (Models Stage)



Σχήμα 4.2: Γραμμή εντολών για το στάδιο μοντέλων.

Κάθε μοντέλο σε ένα έργο ονομάζεται και εισάγεται στο μενού ετικετών στο στάδιο Models (Σχήμα 4.2). Αυτό επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση σε οποιοδήποτε μοντέλο και αποτελέσματα ενός έργου. Νέα μοντέλα μπορούν να προστεθούν ή να διαγραφούν οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια μελέτης ενός έργου. Ακόμη,

μπορούν να επικαλεστούν (φορτωθούν) μοντέλα από προηγούμενα έργα και να προστεθούν στο προς μελέτη έργο.

Σημείωση: Οι συνοριακές συνθήκες του πρανούς, επίσης ορίζονται για κάθε μοντέλο σε αυτό το στάδιο.

4.7.2 Στάδιο Κατασκευής (Build Stage)



Σχήμα 4.3: Γραμμή εντολών για το στάδιο κατασκευής των μοντέλων.

Για ένα συγκεκριμένο μοντέλο, οι συνθήκες του πρανούς ορίζονται στο στάδιο **Build** (Σχήμα 4.3). Αυτό περιλαμβάνει: αλλαγές στη γεωμετρία του πρανούς, προσθήκη στρωμάτων, ορισμός των υλικών και ασθενών επιφανειών (διεπιφάνεια), εφαρμογή επιφανειακής φόρτισης, τοποθέτηση υδροφόρου ορίζοντα και εφαρμογή ενίσχυσης. Οι συνθήκες μπορούν να προστεθούν, να διαγραφούν και να τροποποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου.

4.7.3 Στάδιο Επίλυσης (Solve Stage)

Σε αυτό το στάδιο, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας. Αρχικά, επιλέγεται η ανάλυση του αριθμητικού δικτυώματος από το εργαλείο Solve, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4 (αδρή, μεσαία, λεπτομερής ή οριζόμενη από το χρήστη), και τότε εκτελείται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας.



Σχήμα 4.4: Γραμμή εντολών για το στάδιο επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας των μοντέλων.

Διαφορετικές παράμετροι αντοχής μπορούν να επιλεγθούν για να συμπεριληφθούν στην προσέγγιση της μείωσης της αντοχής, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Η συνοχή του υλικού και η γωνία τριβής χρησιμοποιούνται εξ ορισμού.

4.7.4 Στάδιο Εκτύπωσης (*Plot Stage*)



Σχήμα 4.5: Γραμμή εντολών για το στάδιο εκτύπωσης των αποτελεσμάτων επίλυσης.

Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση, διάφορες επιλογές εξαγωγής γραφήματος είναι διαθέσιμες στο στάδιο εκτύπωσης για την επίδειξη της επιφάνειας αστοχίας και την καταγραφή των αποτελεσμάτων (Σχήμα 4.5). Τ' αποτελέσματα του μοντέλου είναι διαθέσιμα για μεταγενέστερη πρόσβαση και σύγκριση με άλλα μοντέλα του έργου.

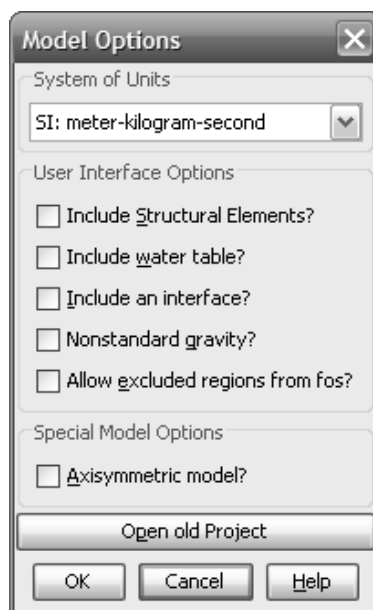
Όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν σε ένα έργο, μαζί με τις λύσεις τους μπορούν να αποθηκευτούν, τα αρχεία του έργου μπορούν εύκολα να επαναφερθούν και τ' αποτελέσματα να εμφανιστούν αργότερα.

4.8 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ *FLAC/SLOPE*

Το πρόγραμμα *FLAC/Slope* έχει σχεδιαστεί για την εκτέλεση μιας σειράς αναλύσεων για μελέτη ευστάθειας πρανούς. Μια παραμετρική μελέτη που περιλαμβάνει διάφορες πρότυπες προσομοιώσεις μπορεί εύκολα να εκπονηθεί, να εκτελεσθεί, και τα αποτελέσματα να αξιολογηθούν. Κάθε πρότυπη προσομοίωση περιλαμβάνει τέσσερα στάδια διαμόρφωσης: Πρότυπα/Μοντέλα (*Models*), Κατασκευή (*Build*), Επίλυση (*Solve*) και Εκτύπωση (*Plot*). Διάφορα εργαλεία συνδέονται με κάθε στάδιο που βοηθά την ανάλυση. Κάθε ένα από τα εργαλεία περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια (Itasca, 2008).

4.8.1 Επιλογή στοιχείων μοντέλου

Με την εκκίνηση του προγράμματος *FLAC/Slope* εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 4.6), για την επιλογή διάφορων συνθηκών και προαιρετικών παραδοχών για κάθε μελέτη.



Σχήμα 4.6: Παράθυρο διαλόγου κατά την εκκίνηση νέας μελέτης στο FLAC/Slope.

Μέσω αυτού του παραθύρου μπορεί να επιλεγθεί το σύστημα των μονάδων για την ανάλυση. Οι παράμετροι στο μοντέλο θα ονομαστούν έπειτα με τις αντίστοιχες μονάδες, και οι αντίστοιχες τιμές, όπως το μέγεθος βαρύτητας και οι ιδιότητες υλικών στην βάση δεδομένων, θα μετατραπούν στο επιλεγμένο σύστημα. Η επιλογή για το σύστημα των μονάδων πρέπει να γίνει στην αρχή της ανάλυσης.

Όταν επιλεγεί κάποια από τις επιλογές, όπως π.χ. **Include Structural Elements**, **Include Water Table** ή **Include An Interface**, τότε θα εμφανιστεί και στο μενού εντολών του εργαλείου **Build**. Εξ ορισμού, στην ανάλυση χρησιμοποιείται τυποποιημένη τιμή για την επιτάχυνση της βαρύτητας. Ένα εικονίδιο βαρύτητας θα εμφανιστεί στο μοντέλο με ένα διάνυσμα βαρύτητας που δείχνει προς τα κάτω και μέγεθος που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σύστημα των μονάδων. Όμως, μπορεί να επιλεγθεί η επιλογή **Nonstandard Gravity**, όπου επιτρέπεται η εισαγωγή τιμής και κατεύθυνσης της επιτάχυνσης βαρύτητας κατά την επιλογή του χρήστη. Είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ψευδο-στατικές επιταχύνσεις, με την εφαρμογή μη κάθετης βαρύτητας.

Καθίσταται δυνατή η εξαίρεση επιλεγμένων περιοχών του μοντέλου από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, με την επιλογή τη εντολής:

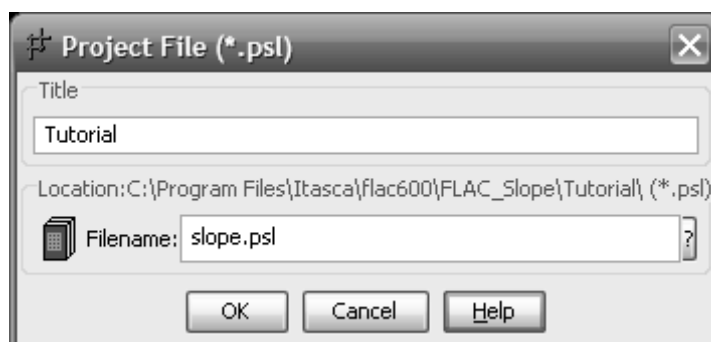
Allow Excluded Regions From FoS, όπου θα προστεθεί το αντίστοιχο εργαλείο στο μενού του σταδίου κατασκευής του μοντέλου.

Από προεπιλογή, πραγματοποιείται δισδιάστατη ανάλυση επίπεδης καταπόνησης στο πρόγραμμα. Εναλλακτικά, με την επιλογή της εντολής **Axisymmetric Model** είναι εφικτή η αξονοσυμμετρική ανάλυση. Σε αυτή τη λειτουργία, γίνεται χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων, όπου ο άξονας συμμετρίας είναι στο $x=0$, η θετική κατεύθυνση x αντιστοιχεί στην ακτινική συντεταγμένη, η κατεύθυνση y στην αξονική συντεταγμένη, και η εκτός επιπέδου κατεύθυνση z , στην περιμετρική συντεταγμένη. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για κυλινδρικά σχήματα σωρών ή κυκλικά ανοιχτά φρεάτια.

4.8.2 Ρύθμιση ενός έργου πρηνούς

Κατά την έναρξη ενός έργου, αρχικά γίνεται επιλογή της εντολής **File/Save Project As...** με σκοπό τη ρύθμιση του έργου ανάλυσης προς αποθήκευση. Με την επιλογή αυτή ανοίγει το παράθυρο διαλόγου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Το όνομα του τίτλου και του έργου του υπό αποθήκευση αρχείου που επιλέγεται για το έργο, θα τυπωθεί στην λεζάντα εκτύπωσης για κάθε γράφημα που δημιουργείται. Το αρχείο του έργου θα έχει την επέκταση **".psl"**. Αυτό το αρχείο περιέχει την καταχώρηση του έργου και επιτρέπει επίσης την πρόσβαση σε όλες τις αποθηκευμένες καταστάσεις του μοντέλου (αποθηκευμένα ως **".sav"** αρχεία) και τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στα αποθηκευμένα στάδια επίλυσης (αποθηκευμένα ως **".fsv"** αρχεία) για κάθε ανάλυση μοντέλου στο έργο.

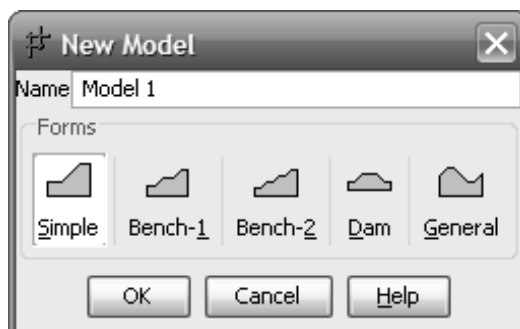
Σημείωση: δύναται να επιλεγεί το κουμπί  σε αυτό το παράθυρο διαλόγου για να επιλεγθεί ο κατά προτίμηση φάκελος στον οποίο θα αποθηκευτεί το έργο και τα αρχεία με τα στάδια μοντελοποίησης.



Σχήμα 4.7: Παράθυρο διαλόγου αποθήκευσης αρχείου.

4.8.3 Δημιουργία μοντέλου

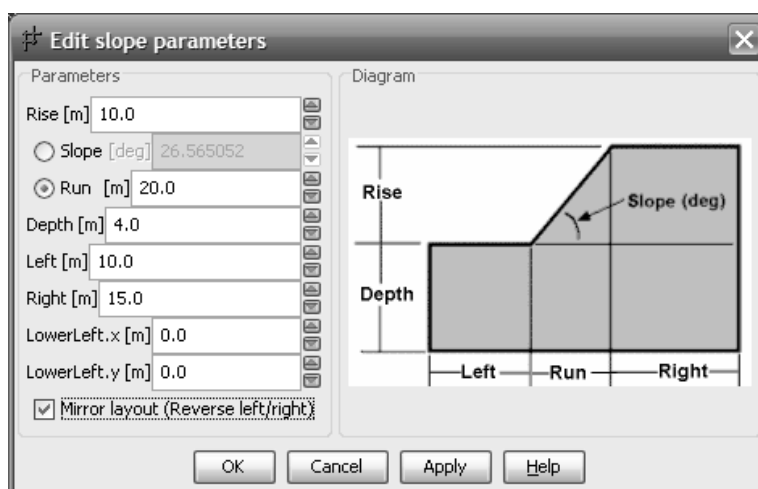
Το επόμενο στάδιο είναι η κατασκευή του πρανούς στο πρόγραμμα. Επιλέγοντας το εικονίδιο **New** εμφανίζεται το παράθυρο με τις επιλογές μοντέλων πρανούς που διατίθενται από το πρόγραμμα (Σχήμα 4.8). Στο ίδιο παράθυρο υπάρχει και η επιλογή ονομασίας του μοντέλου (π.χ. Model 1).



Σχήμα 4.8: Παράθυρο επιλογής γεωμετρίας πρανούς.

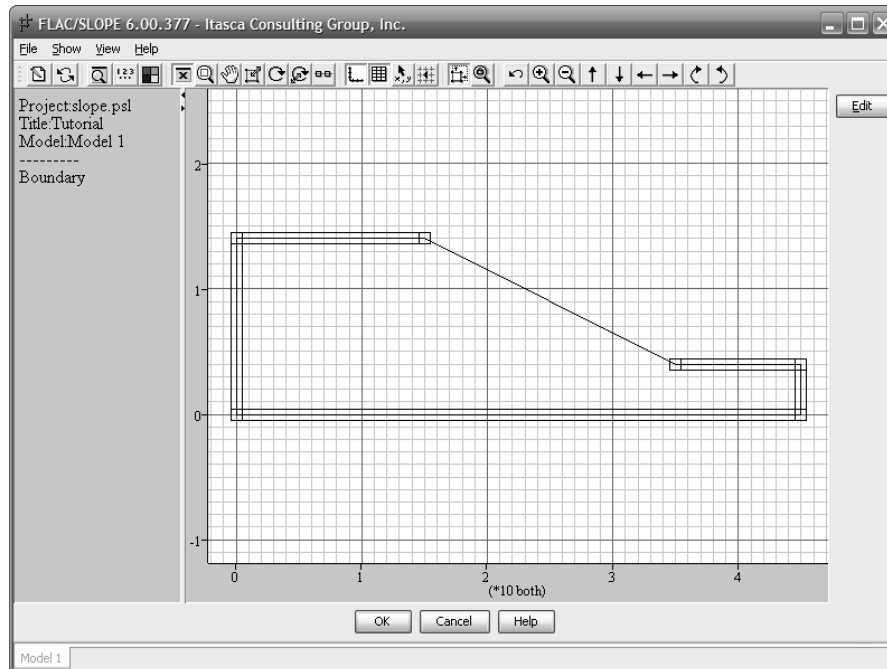
Σημείωση: Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τύπου γεωμετρίας του πρανούς για τη δημιουργία αυτού του προτύπου: απλό, γραμμικό ή πιο σύνθετης γεωμετρίας, όπως η βαθμίδα, το ανάχωμα φραγμάτων ή οι μη γραμμικές μορφές κλίσεων.

Μετά την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας του πρανούς προς ανάλυση, εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο διαλόγου με τις παραμέτρους για την εισαγωγή των γεωμετρικών διαστάσεων του. Στο Σχήμα 4.9, απεικονίζεται το παράθυρο διαλόγου για την περίπτωση πρανούς απλής γεωμετρίας. Οι όποιες αλλαγές αποθηκεύονται στο μοντέλο, με την επιλογή του εικονιδίου **Apply**.

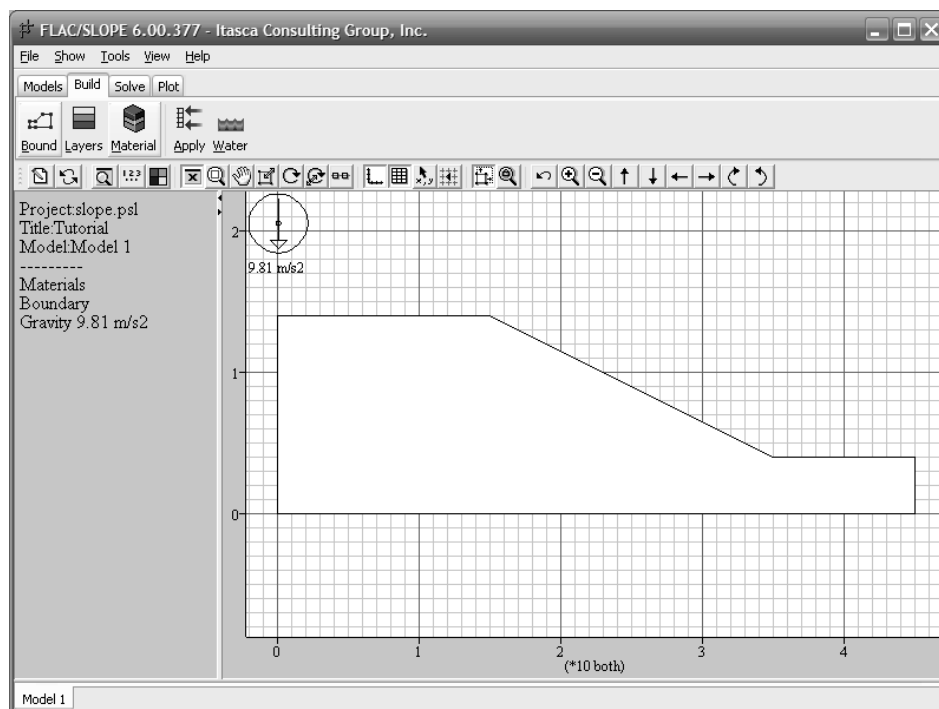


Σχήμα 4.9: Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός πρανούς απλής γεωμετρίας.

Στο στάδιο αυτό δύναται να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του πρανούς επιλέγοντας το εικονίδιο **Edit** (Σχήμα 4.10). Η αποδοχή του μοντέλου γίνεται με την επιλογή του εικονιδίου **OK** και έτσι εμφανίζεται η τελική εικόνα του μοντέλου (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.10: Παράθυρο αλλαγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρανούς.



Σχήμα 4.11: Τελική μορφή πρανούς.

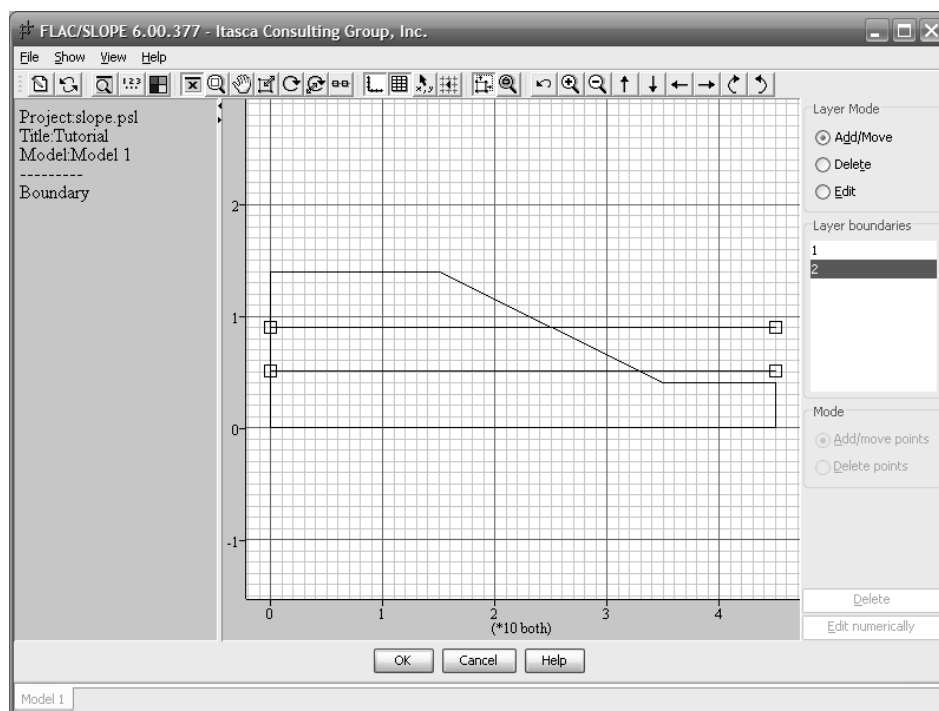
Κατά την επιλογή των διαστάσεων για το βάθος **Depth**, αριστερά **Left** και δεξιά **Right**, είναι σημαντικό αυτές οι διαστάσεις να είναι αρκετά μεγάλες, έτσι ώστε τα τεχνητά όρια (δηλ., αριστερά, δεξιά και κατώτατα όρια) να μην επηρεάζουν την εξέλιξη της επιφάνειας αστοχίας.

Εάν η τελική υπολογισμένη επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται να τέμνει οποιοδήποτε από αυτά τα όρια, τότε το μοντέλο πρέπει να ξαναεκτελεστεί με μια μεγαλύτερη διάσταση, έτσι ώστε η επιφάνεια να μην τέμνει το όριο.

1. Όταν σώξεις ένα μοντέλο αυτόματα το αρχείο παίρνει την κατάληξη/ επέκταση “.SLP.”
2. Είναι εφικτό να εισαχθεί ένα μοντέλο σε ένα άλλο έργο μέσω της εντολής **LOAD**.
3. Η αντιγραφή ενός μοντέλου γίνεται μέσω της εντολής **CLONE**. Μαζί θα αντιγραφούν όλες οι πληροφορίες σε ένα άλλο μοντέλο, τότε θα ανοίξει το παράθυρο διαλόγου **INPUT** για καταχώρηση ονόματος στο μοντέλο.
4. Αλλαγές στο μοντέλο γίνονται με την εντολή **BOUND** η οποία βρίσκεται στο μενού εντολών **BUILD**. Τότε ανοίγει παράθυρο διαλόγου το οποίο επιτρέπει αλλαγές στα όρια. Αυτό πρέπει να γίνεται με προσοχή. Για παράδειγμα, τα όρια σε ένα μοντέλο δεν πρέπει να αλλάζουν μετά την καταχώρηση των: στρώματων (layers), διεπιφανειών (interfaces) και/ή του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτά τα στοιχεία δεν θα είναι έγκυρα εάν αλλάξει η θέση των ορίων.

4.8.4 Προσθήκη στρωμάτων

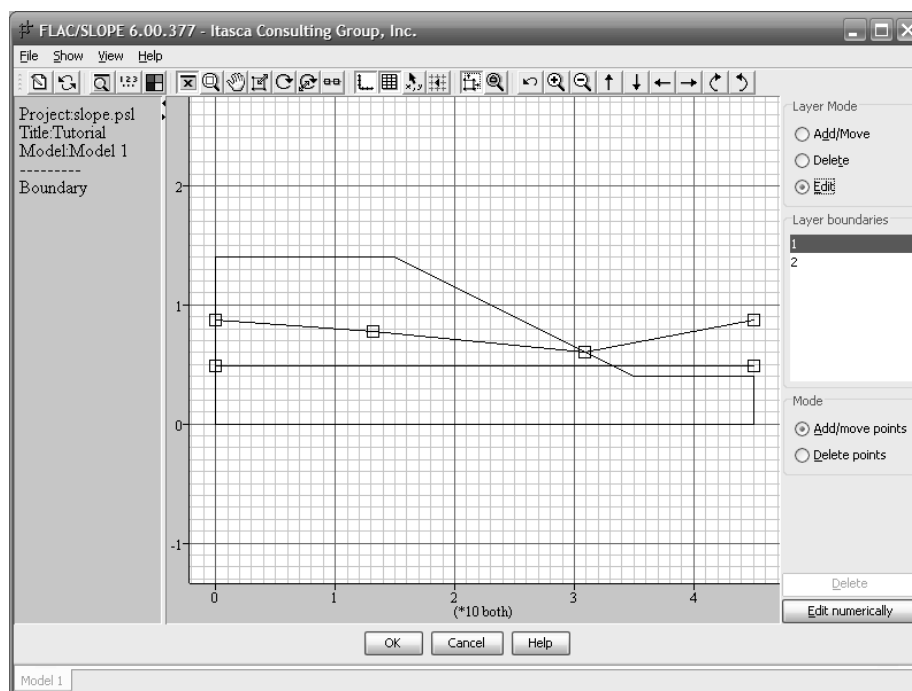
Εάν η ανάλυση ευστάθειας του πρανού εμπλέκει στρώσεις υλικών, τα όρια αυτών στρώσεων θα πρέπει να καταχωρηθούν πρώτα στο μοντέλο. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της εντολής **LAYERS** στο μενού εντολών BUILD (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12: Πρότυπο πρανού με δύο γραμμές για δημιουργία στρώσης.

Η στρώση δύναται να είναι ευθύγραμμη ή και όχι. Αυτό γίνεται ως εξής:

Μέσω της εντολής **EDIT** μπορούν να προστεθούν σημεία κατά μήκος της γραμμής που ορίζει τη στρώση. Έπειτα τραβώντας αυτά τα σημεία σε διαφορετικές θέσεις, αλλάζει και η κατεύθυνση της στρώσης (Σχήμα 4.13). Η επιλογή μιας στρώσης γίνεται με το πάτημα στη γραμμή εντολών του κουμπιού **Line boundaries**, οπότε και η επιλεγμένη γραμμή θα χρωματιστεί άσπρη.



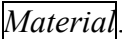
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση μοντέλου δύο στρώσεων, με την άνω στρώση να έχει παραπάνω μη ευθύγραμμα σημεία.

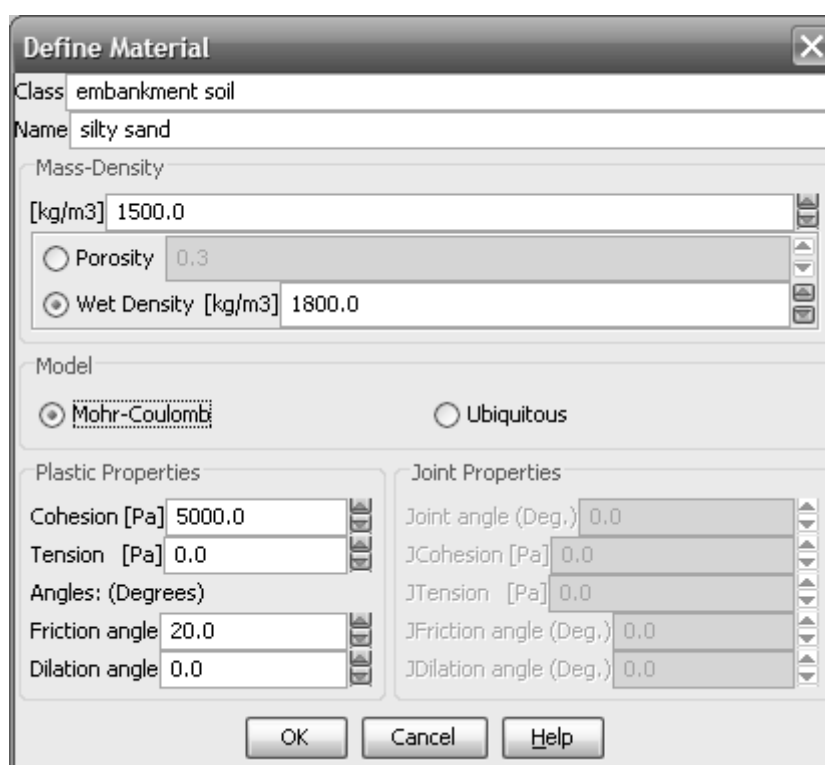
Τα σημεία λαβής (*handle points*) μπορούν να εντοπιστούν σε συγκεκριμένες συντεταγμένες x, y με δεξί κλικ του κέρσορα πάνω στο σημείο λαβής. Τότε θα ανοίξει ένα παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή των συντεταγμένων, μέσω της εντολής **Edit Numerically**. Αυτό με τη σειρά του ανοίγει ένα άλλο παράθυρο το *Edit Table Points* όπου εμφανίζονται σε λίστα οι συντεταγμένες x, y όλων των σημείων της γραμμής. Σε αυτό το παράθυρο γίνεται εισαγωγή και τροποποίηση των σημείων.

Σημείωση: Το συγκεκριμένο εργαλείο δουλεύει καλύτερα με υπο-οριζόντια στρώματα. Είναι δυνατή η κατασκευή μοντέλων με υπο-κάθετα στρώματα, υπό ορισμένους κανόνες. Οι γραμμές ορίου πρέπει να τρέχουν συνεχώς από το αριστερό όριο του μοντέλου στο δεξιό.

Τα στρώματα δεν πρέπει να γίνουν πάρα πολύ λεπτά, επειδή μια κακή γεωμετρία ζώνης μπορεί να έχει επίπτωση, όταν εκτελείται η ζωνοποίηση του μοντέλου στο στάδιο **Solve**. Για διαμόρφωση πιο σύνθετων διατάξεων στρώσεων, ενδείκνυται το πρόγραμμα FLAC.

4.8.5 Εισαγωγή υλικών και ιδιοτήτων τους

Η εν λόγω ανάθεση είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το υλικό και καθορίζονται οι συναφείς ιδιότητές του. Στη συνέχεια το υλικό ανατίθεται σε μια συγκεκριμένη στρώση. Η δημιουργία και η ανάθεση υλικού, γίνονται και οι δύο μέσα στο εργαλείο *Material* που ανοίγει με το πάτημα του εικονιδίου . Πατώντας το εικονίδιο  ανοίγει το παράθυρο διαλόγου δημιουργίας και καθορισμού του υλικού: . Ένα υλικό καθορίζεται από την ταξινόμηση και το όνομά του – παραδείγματος χάριν, ταξινόμηση: *έδαφος αναχωμάτων (embankment soil)*, και όνομα: *ιλυώδης άμμος (silty sand)* (Σχήμα 4.14).

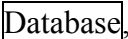
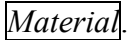


The image shows the 'Define Material' dialog box in the FLAC/SLOPE software. It has a title bar with a close button. The dialog is divided into several sections:

- Class:** A text field containing 'embankment soil'.
- Name:** A text field containing 'silty sand'.
- Mass-Density:** A section with two options:
 - ☐ Porosity: A text field with '0.3'.
 - ☒ Wet Density [kg/m3]: A text field with '1800.0'.
- Model:** A section with two radio buttons:
 - ☒ Mohr-Coulomb
 - ☐ Ubiquitous
- Plastic Properties:** A section with four text fields:
 - Cohesion [Pa]: '5000.0'
 - Tension [Pa]: '0.0'
 - Angles: (Degrees)
 - Friction angle: '20.0'
 - Dilation angle: '0.0'
- Joint Properties:** A section with four text fields:
 - Joint angle (Deg.): '0.0'
 - JCohesion [Pa]: '0.0'
 - JTension [Pa]: '0.0'
 - JFriction angle (Deg.): '0.0'
 - JDilation angle (Deg.): '0.0'

At the bottom, there are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Σχήμα 4.14: Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή των ιδιοτήτων υλικού.

Η ταξινόμηση είναι χρήσιμη εάν είναι να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων για να αποθηκευτούν τα κοινά υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά έργα. Η εισαγωγή στη βάση δεδομένων γίνεται μέσω του εικονιδίου , που βρίσκεται στην κάτω-δεξιά γωνία του εργαλείου .

Η μαζική πυκνότητα και οι ιδιότητες αντοχής του υλικού, ορίζονται για κάθε υλικό.

Σημείωση: οι αντίστοιχες μονάδες για κάθε ιδιότητα παρουσιάζονται στο παράθυρο διαλόγου, ανάλογα με το σύστημα των μονάδων που επιλέγονται στο παράθυρο

διαλόγου *Model Options*. Η μαζική πυκνότητα διευκρινίζεται στις μονάδες λόγου [μάζας/όγκου]. Αυτή η μονάδα πολλαπλασιασμένη με το μέγεθος βαρύτητας είναι ίση με τη μονάδα βάρους του υλικού [βάρος/όγκος].

Εάν το εργαλείο του υδροφόρου ορίζοντα δεν είναι ενεργοποιημένο, τότε ορίζεται μόνο η «ξηρή» (ή «υγρή») μαζική πυκνότητα. Αυτή είναι η πυκνότητα του υλικού, επί τόπου επάνω από τη στάθμη του νερού. Αν η εάν η στάθμη του νερού είναι ενεργοποιημένη, τότε είτε ένα πορώδες είτε μια "υγρή" (ή "κορεσμένη/ διαποτισμένη") μαζική πυκνότητα πρέπει επίσης να οριστεί. Η σχέση μεταξύ «υγρής» και «ξηρής» πυκνότητας μάζας στο πρόγραμμα FLAC/Slope καθορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\rho^{wet} = \rho + n\rho_w \quad (4.11)$$

όπου, ρ^{wet} είναι επί τόπου υγρή πυκνότητα, ρ είναι η ξηρή επί τόπου πυκνότητα, n είναι το πορώδες και ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού.

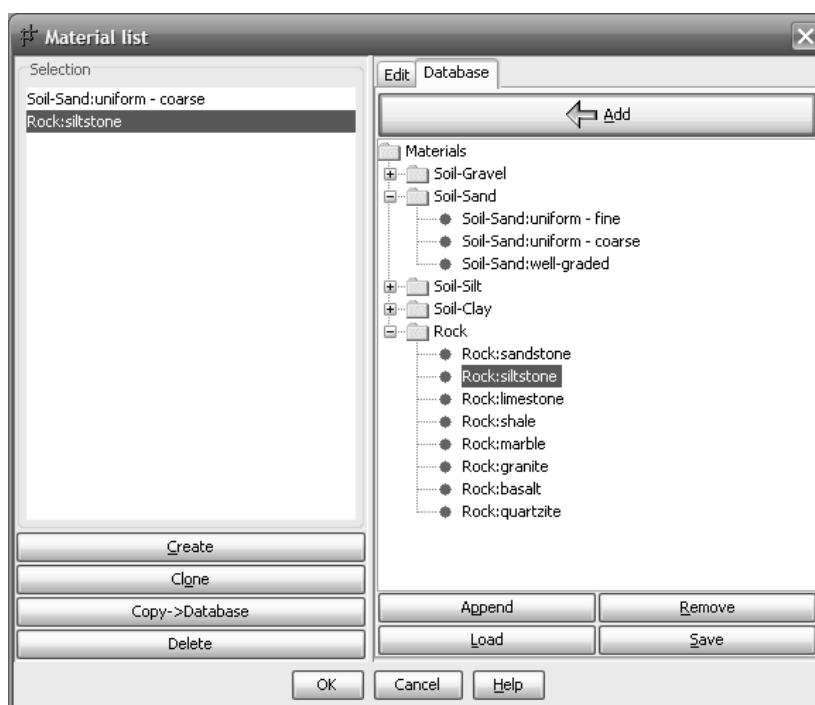
Όταν η στάθμη νερού ορίζεται στο μοντέλο, όλες οι ζώνες με κέντρα βάρους που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη νερού υποτίθεται ότι είναι κορεσμένα πλήρως και θα οριστεί αυτόματα η τιμή της υγρής πυκνότητας για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Η αστοχία του υλικού καθορίζεται από την επιλογή του μοντέλου επίλυσης σε ένα έργο και από τις ιδιότητες αντοχής του υλικού σε αυτό (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής). Η αντοχή σε εφελκυσμό και η γωνία διαστολής ψ , μπορούν επίσης να διευκρινιστούν για το υλικό. Εάν στην ανάλυση υπεισέρχεται και ο κανόνας συνηρητημένης πλαστικής ροής, τότε η γωνία διαστολής ψ , θα ρυθμιστεί αυτόματα έτσι ώστε να συμβαδίζει με τη γωνία τριβής ϕ .

Οι ελαστικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας E και λόγος Poisson ν), έχουν ασήμαντη επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας, και επομένως, αυτές οι ιδιότητες δεν απαιτούνται ως εισαγωγή. Εξ ορισμού, το μέτρο μεταβολής όγκου (ή συμπίεσης) K , και το μέτρο διάτμησης G , όλων των υλικών στο μοντέλο (υποθέτοντας μονάδες SI) ορίζονται σε 100MPa και 30MPa, αντίστοιχα.

Το πρόγραμμα FLAC/Slope διαθέτει μια βάση δεδομένων με τις κυριότερες περιπτώσεις υλικών. Η βάση δεδομένων είναι διαιρεμένη σε κατηγορίες, καθορισμένη σε ονόματα ομάδων, και έχει τη δομή δένδρου (Σχήμα 4.15). Η βάση

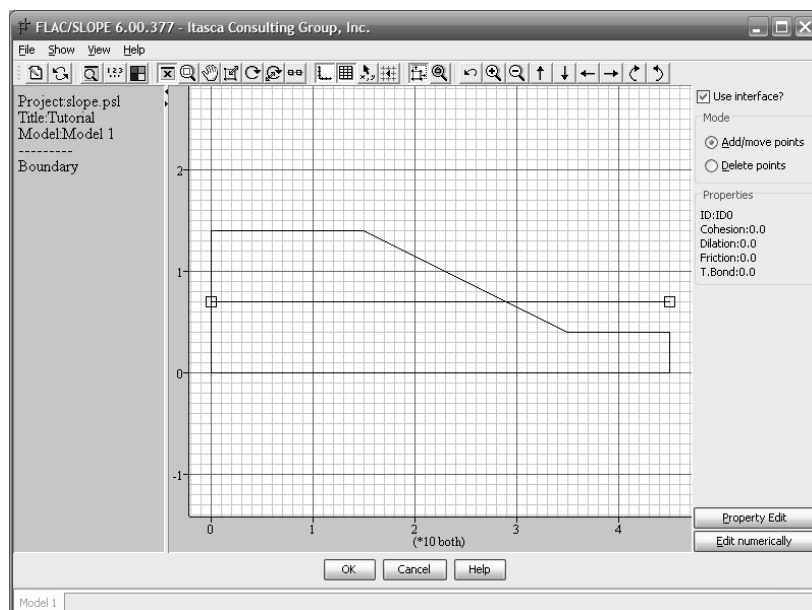
αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση σειράς κοινών υλικών και των ιδιοτήτων αυτών για τη χρήση τους σε διάφορα προγράμματα. Οι ιδιότητες των υλικών αυτής της βάσης δεδομένων, μπορούν να τροποποιηθούν μέσω του εικονιδίου **Edit**, ενώ με την επιλογή του εικονιδίου **Create** δύναται να κατασκευαστεί κάποιο υλικό της επιλογής του χρήστη με τις αντίστοιχες ιδιότητες.



Σχήμα 4.154: Βάση Δεδομένων Υλικών

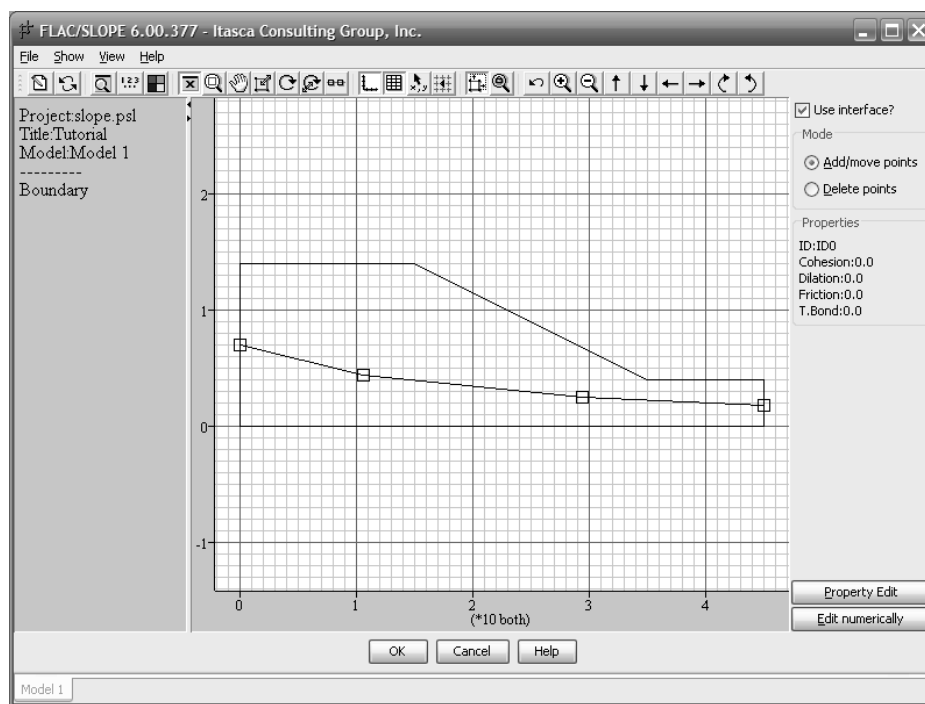
4.8.6 Προσθήκη ασθενούς επιπέδου

Ένα ασθενές επίπεδο ή διεπιφάνεια μπορεί να προστεθεί στο μοντέλο με το εικονίδιο **Interface** στη γραμμή εργαλείων κατασκευής του προτύπου **Build** (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.16: Εισαγωγή διεπιφάνειας στο μοντέλο.

Σημείωση: Μόνο μία διεπιφάνεια μπορεί να προστεθεί στο μοντέλο. Η διεπιφάνεια, όπως και στην εισαγωγή των στρώσεων, μπορεί να μην είναι ευθύγραμμη (σχήμα 4.17). Επίσης, η διεπιφάνεια πρέπει να προσανατολιστεί έτσι ώστε να τέμνει τα αριστερά και δεξιά όρια του μοντέλου. Δεν είναι δυνατή ή διαμόρφωση κάθετων ή σχεδόν κάθετων διεπαφών στο FLAC/Slope. Εάν είναι απαραίτητο να διαμορφωθούν πολλαπλές ή σχεδόν κάθετες διεπαφές, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα FLAC.



Σχήμα 4.17: Εισαγωγή σημείων στη γραμμή διεπιφάνειας.

Εφόσον η διεπιφάνεια εισαχθεί στο μοντέλο, πρέπει να καθοριστούν οι ιδιότητες αυτής. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής **Property Edit** που ανοίγει το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων διεπαφής **Interface property**.

Διάφορα υλικά διεπαφών μπορούν να δημιουργηθούν απευθείας σε αυτό το παράθυρο (Σχήμα 4.18) για μελλοντική χρήση σε επόμενα έργα. Το υπογραμμισμένο υλικό, θα εφαρμοστεί στη διεπιφάνεια όταν επιλεγθεί το **OK**. Το υλικό και οι ιδιότητες των διεπαφών παρατίθενται στον κατάλογο **Properties** στο εργαλείο **Interface**.

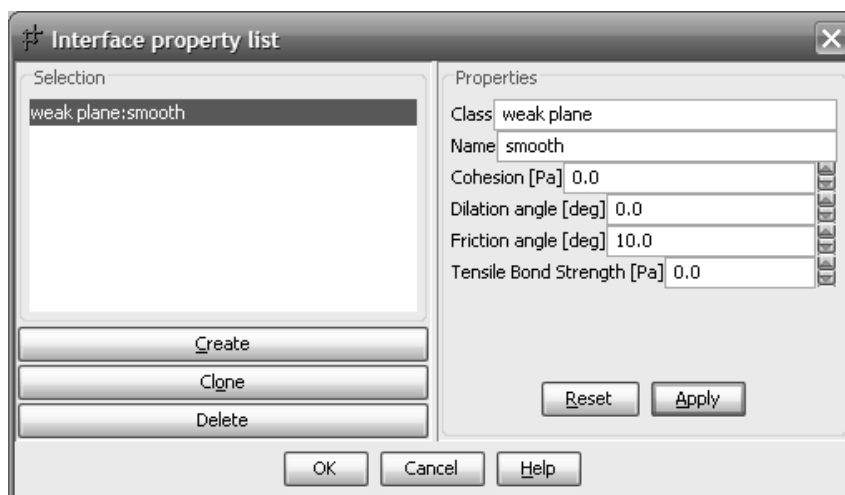
Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας προσδιορίζεται από το κριτήριο ολίσθησης του Mohr-Coulomb το οποίο περιορίζει τη διατμητική αντοχή, $\tau_{\max}$, κατά μήκος της διεπιφάνειας μέσω της σχέσης:

$$\tau_{\max} = c_i + \sigma_n \tan \phi_i \quad (4.12)$$

Όπου, c_i = συνοχή (σε μονάδες ισχύος) κατά μήκος της διεπιφάνειας, ϕ_i = γωνία τριβής της επιφάνειας διεπαφής, και σ_n είναι η κανονική δύναμη που δρα στη διεπιφάνεια.

Επιπροσθέτως, η διεπιφάνεια μπορεί να διασταλεί στην έναρξη της ολίσθησης. Η διαστολή συμβολίζεται στο μοντέλο Coulomb μέσω μιας προσδιορισμένης γωνίας διαστολής, ψ .

Εάν μια εφελκυστική δύναμη δεσμού ορίζεται για τη διεπιφάνεια, τότε η διεπιφάνεια συμπεριφέρεται σαν είναι κολλημένη, ενώ η εφελκυστική ορθή τάση που ενεργεί στη διεπιφάνεια είναι κάτω από την αντοχή των δεσμών. Εάν η εφελκυστική ορθή τάση υπερβεί την αντοχή των δεσμών, τότε δύναται να εμφανιστούν σπασίματα δεσμών, αποκόλληση και ολίσθηση.

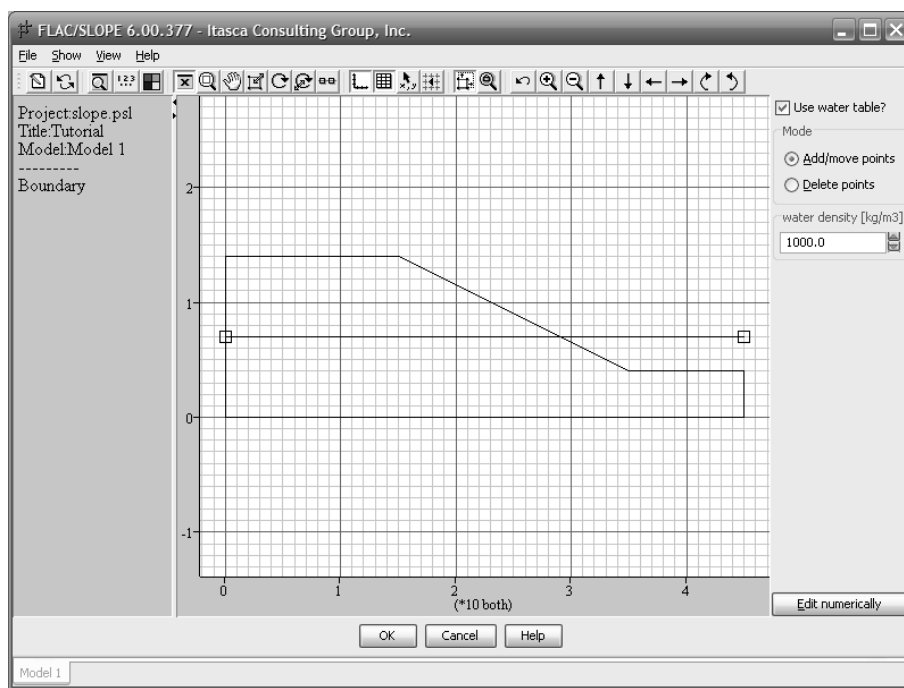


Σχήμα 4.18: Παράθυρο εισαγωγής των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας.

Η ελαστική διάτμηση και η ορθή ακαμψία που συνδέονται με τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας, δεν έχουν επιπτώσεις στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Για το λόγο αυτό, ορίζονται προεπιλεγμένες τιμές αυτόματα από το πρόγραμμα, για τη βελτιστοποίηση σύγκλισης της επίλυσης.

4.8.7 Εισαγωγή Υδροφόρου Ορίζοντα

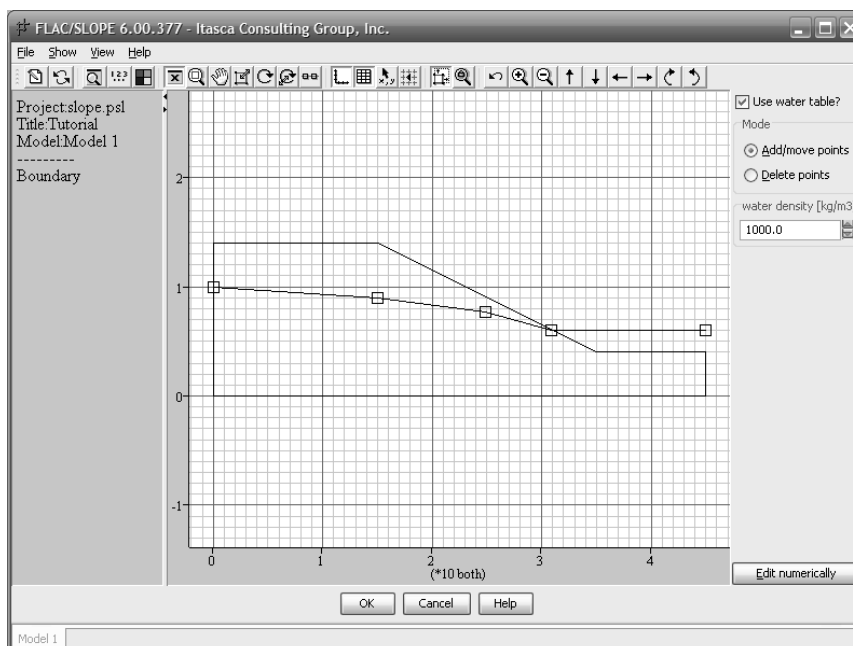
Το στοιχείο του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο με την επιλογή του εικονιδίου **Water** στη γραμμή εντολών **Build**. Με την εντολή αυτή ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου όπως αυτό του σχήματος 4.19. Το εργαλείο αυτό περιέχει μια μπλε οριζόντια γραμμή, που αναπαριστά τον υδροφόρο, με τετράγωνους κόμβους στις δύο άκρες της. Η θέση της γραμμής στο μοντέλο μπορεί να αλλάξει μετατοπίζοντας τους ακριανούς κόμβους πάνω στο μοντέλο. Η πυκνότητα του νερού εισάγεται αυτόματα με τιμή που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σύστημα μονάδων. Η τιμή της πυκνότητας μπορεί να αλλάξει μέσω της εντολής **Water Density**.



Σχήμα 4.19: Εισαγωγή της γραμμής του υδροφόρου ορίζοντα στο μοντέλο.

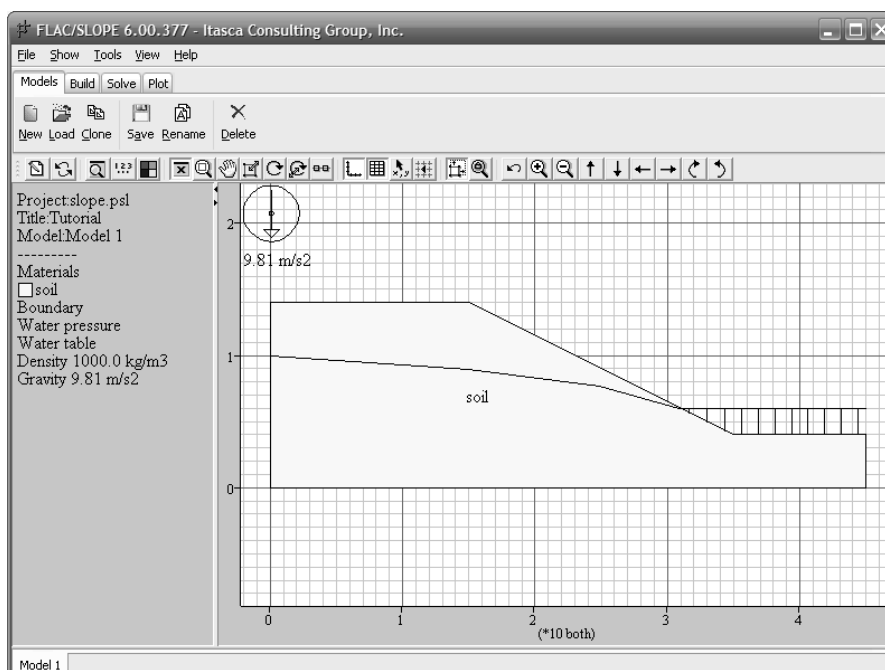
Όταν η στάθμη νερού είναι ενεργή, η αστοχία στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας ελέγχεται από την κατάσταση ενεργής-τάσης του μοντέλου. Η τιμή για την πυκνότητα ύδατος χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης των πόρων που εφαρμόζεται έπειτα για να καθορίσει τις ενεργές τάσεις σε όλες τις ζώνες κάτω από τη στάθμη νερού.

Η θέση της στάθμης του νερού χρησιμοποιείται επίσης για να καθορίσει εάν η ξηρά ή υγρή πυκνότητα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το βάρος του υλικού. Εάν η στάθμη του νερού βρίσκεται έτσι ώστε να τέμνει την επιφάνεια κλίσης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.20, τότε το βάρος του ύδατος συμπεριλαμβάνεται αυτόματα ως μηχανική πίεση ενεργώντας στις ελεύθερες επιφάνειες κάτω από τη στάθμη νερού.



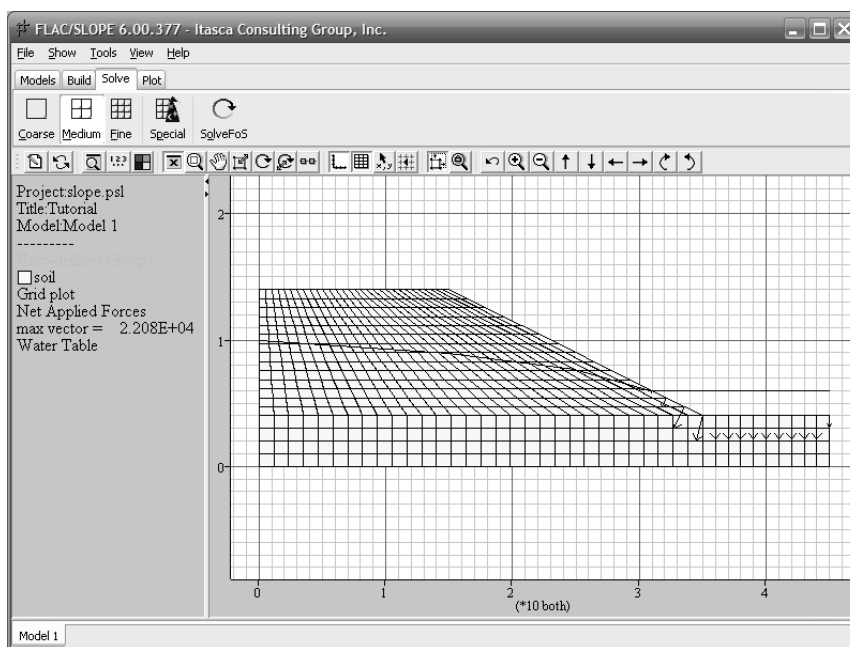
Σχήμα 4.20: Απεικόνιση της μετακινούμενης στάθμης ύδατος με την προσθήκη δύο σημείων στο μοντέλο.

Πατώντας το εικονίδιο **OK** για την αποδοχή της θέσης του υδροφόρου, η πίεση της επιφάνειας του νερού στο μοντέλο περιγράφεται στο σχήμα 4.21, με μια διαγράμμιση πίεσης (*pressure bar*) κατά μήκος του ορίου του πρανούς. Κατά το στάδιο επίλυσης η επιφάνεια του νερού στο μοντέλο απεικονίζεται με τόξα στα σημεία του πλέγματος κατά μήκος της επιφάνειας του πρανούς.



Σχήμα 4.21: Δράση της πίεσης του νερού κατά μήκος της επιφάνειας του πρανούς.

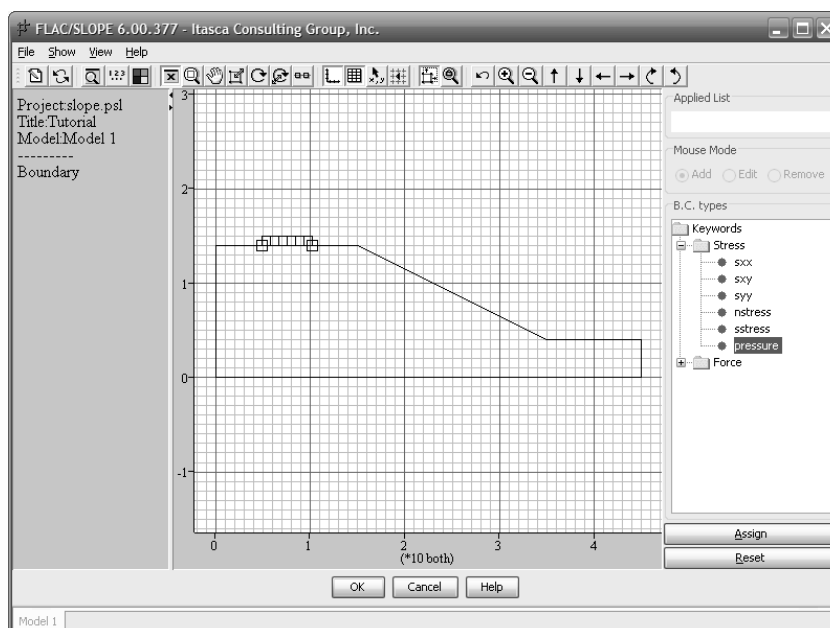
Το μήκος των τόξων αντιπροσωπεύει τις εφαρμοζόμενες μηχανικές δυνάμεις οι οποίες προέρχονται από την τιμή της πίεσης του νερού πολλαπλασιασμένη με το μήκος συσχετιζόμενο με το κάθε σημείο. Το σχήμα 4.22 απεικονίζει τα τόξα που αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια της πίεσης του νερού που εφαρμόστηκε στο σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.22: Εφαρμοζόμενες δυνάμεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πίεση ύδατος στην επιφάνεια που εφαρμόστηκε στο μοντέλο του σχήματος 4.21.

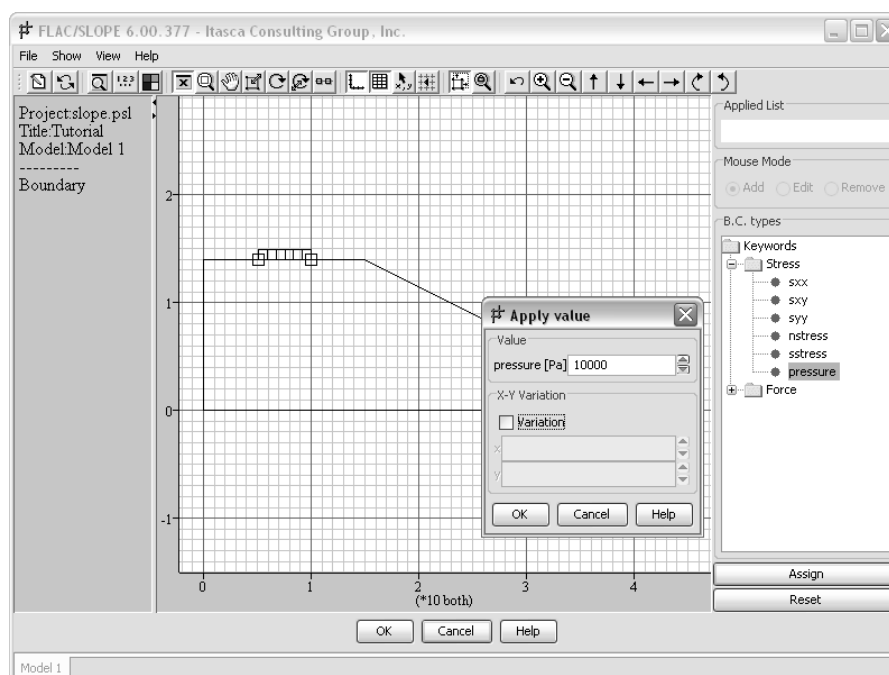
4.8.8 Εφαρμογή επιφανειακών φορτίων

Σημειακά φορτία και τοπικές πιέσεις μπορούν να εφαρμοστούν κατά μήκος μιας επιφάνειας πρανούς με την επιλογή του εικονιδίου **Apply** στη γραμμή εντολών **Build**. Ποικίλες μορφές φορτίων (σχήμα 4.23) μπορούν να εφαρμοστούν στην επιφάνεια του πρανούς· οι τύποι των φορτίων βρίσκονται σε λίστα σε δομή δένδρου.



Σχήμα 4.23: Απεικόνιση εργαλείου εφαρμογής φορτίου.

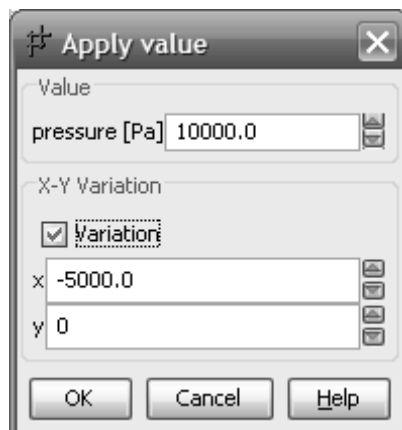
Με την επιλογή του εικονιδίου **Assign** στο παράθυρο του σχήματος 4.22, ανοίγει ένα δεύτερο μικρότερο παράθυρο διαλόγου, όπου εισάγονται οι τιμές φορτίου (Σχήμα 4.24) και με το πάτημα του **OK** γίνεται αποδοχή των εισαγωγών.



Σχήμα 4.24: Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή τιμών φορτίου.

Εάν κρίνεται αναγκαίο να γίνει κάποια αλλαγή στην εφαρμοζόμενη τιμή, αυτό πραγματοποιείται μέσω της επιλογής του εικονιδίου **Edit** στο παράθυρο διαλόγου **Applied List**. Παραδείγματος χάριν, είναι επιθυμητή η διακύμανση της πίεσης στον

άξονα x, τότε εισάγεται η τιμή της πίεσης και μέσω της επιλογής του εικονιδίου **Edit** γίνεται η αλλαγή στο παράθυρο διαλόγου που ανοίγει όπως φαίνεται στο σχήμα 4.25.

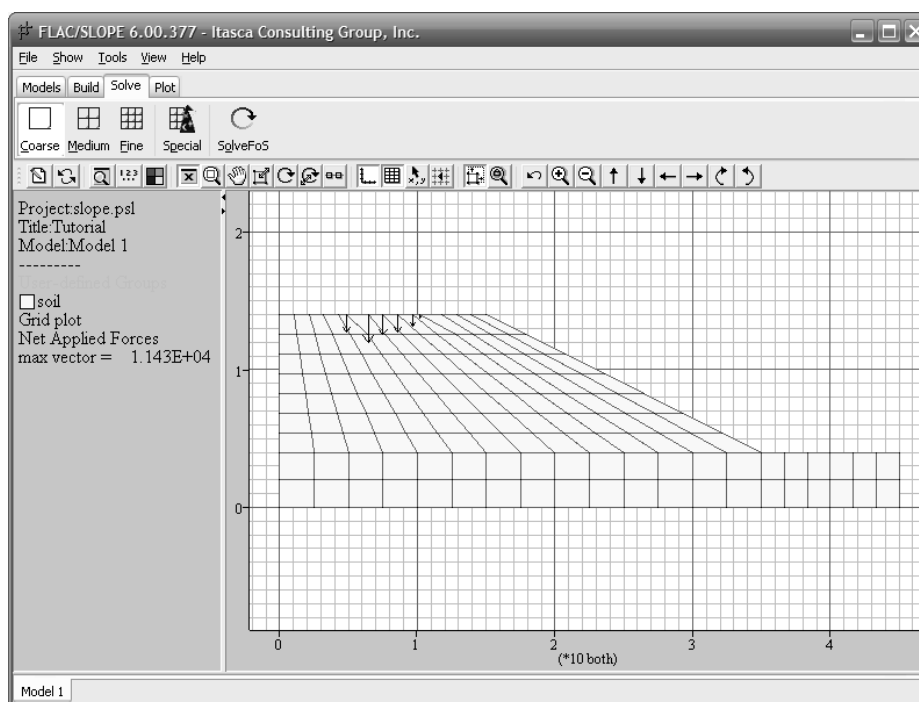


Σχήμα 4.25: Επεξεργασία της εφαρμοζόμενης τιμής στο παράθυρο διαλόγου Applied value.

Οι τύποι εφαρμογής φόρτισης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε τάση (stress) και δύναμη (force). Οι τύποι τάσεων s_{xx} , s_{yy} και s_{xy} , αναφέρονται στις κατευθύνσεις x, y και αυτή της διατμητικής τάσης xy, κατά μήκος του συγκεκριμένου ορίου, αντίστοιχα. Εναλλακτικά, μπορούν να εφαρμοστούν στην ορθή κατεύθυνση του ορίου με την επιλογή της ορθής τάσης (n-stress) ή της πίεσης (pressure) και στη κατεύθυνση διάτμησης με την επιλογή της s-stress.

Οι τάσεις που εφαρμόζονται στο πρόγραμμα FLAC/Slope, μετατρέπονται σε δυνάμεις εφαρμοζόμενες στους κόμβους, αφού έχει δημιουργηθεί το δικτύωμα διακριτοποίησης. Οι εφαρμοσμένες δυνάμεις προκύπτουν από τη τιμή της τάσης (ή πίεσης) πολλαπλασιασμένη με το μήκος τμήματος του ορίου που συνδέεται με κάθε κόμβο.

Η σημασία της εφαρμοσμένης τάσης ή δύναμης μπορεί να ελεγχθεί με την είσοδο στο στάδιο επίλυσης (Solve) μετά την επιλογή του εικονιδίου **OK** για την έξοδο από το **Apply** εργαλείο. Η εφαρμοσμένη συνθήκη φόρτισης θα απεικονιστεί στην εικόνα του μοντέλου σε αυτό το στάδιο μέσω βελών με μήκη που αντιστοιχούν στις εφαρμοσμένες δυνάμεις, ενεργώντας στους κόμβους κατά μήκος του ορίου του μοντέλου. Παραδείγματος χάριν, το σχήμα 4.26 επεξηγεί τις εφαρμοσμένες δυνάμεις που αντιστοιχούν στην εφαρμοζόμενη διακύμανση πίεσης που ορίζεται στο σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.26: Εφαρμοσμένες δυνάμεις οι οποίες αντιστοιχούν στην εφαρμοζόμενη πίεση στο σχήμα 4.24.

Οι τιμές της χωρικής διακύμανσης της εφαρμοζόμενης τάσης ή δύναμης, προσδιορίζονται από την σχέση 4.13. Για μία διακύμανση τάσης ή δύναμης που εφαρμόζεται κατά μήκος ενός ορίου, μεταξύ των ορίων $x=x^{(s)}$ έως $x^{(e)}$ και $y=y^{(s)}$ έως $y^{(e)}$, τότε η τιμή της εφαρμοσμένης τάσης ή δύναμης, v , είναι:

$$v = v^{(s)} + \frac{x - x^{(s)}}{x^{(e)} - x^{(s)}} v_x + \frac{y - y^{(s)}}{y^{(e)} - y^{(s)}} v_y \quad (4.13)$$

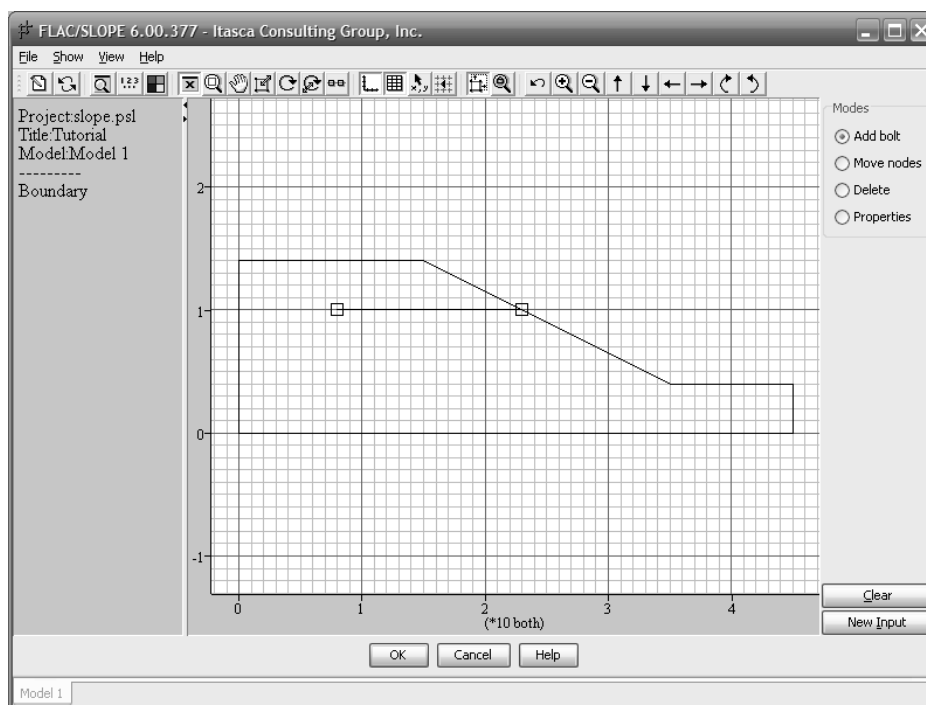
όπου: $(x^{(s)}, y^{(s)})$ είναι η συνιστώσα του σημείου έναρξης, $(x^{(e)}, y^{(e)})$ είναι η συνιστώσα του σημείου τέλους, $v^{(s)}$ είναι η αρχική τιμή της τάσης ή δύναμης που εισήχθη στο παράθυρο διαλόγου, και v_x και v_y είναι οι τιμές διακύμανσης.

4.8.9 Εφαρμογή δομικής ενίσχυσης

Η λογική των δομικών στοιχείων παρέχεται στο πρόγραμμα FLAC/Slope για την προσομοίωση της επίδρασης της ενίσχυσης σε ένα πρανές ή σε ένα ανάχωμα.

Η ενίσχυση στο μοντέλο εφαρμόζεται μέσω της εντολής **Reinforce**, η οποία βρίσκεται στη γραμμή εντολών του σταδίου κατασκευής **Build**. Αυτό ανοίγει το εργαλείο ενίσχυσης. Η ενίσχυσης με στοιχεία συρματόσχοινων εισάγονται σε ένα πρανές με την επιλογή της εντολής **Add Bolt**. Με κέρσορα επιλέγεται ένα άκρο του συρματόσχοινου, και τραβιέται μέχρι το άλλο άκρο των ορίων του μοντέλου. Τότε,

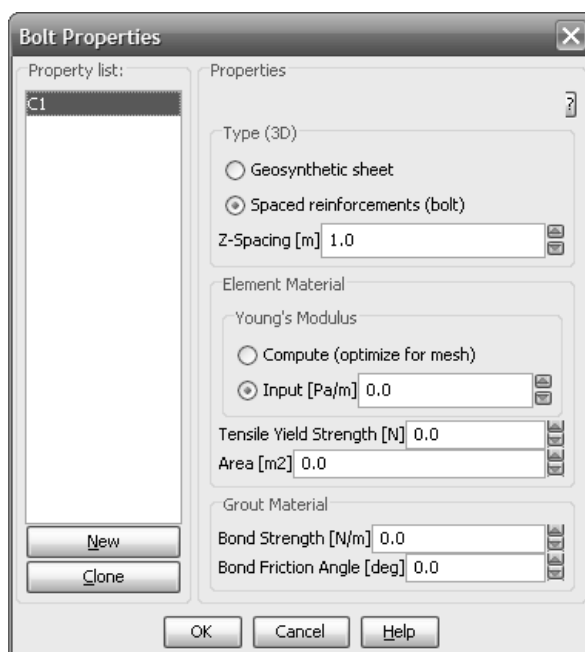
μία κίτρινη γραμμή με άσπρα τετράγωνα άκρα θα σχεδιαστεί (Σχήμα 4.27). Οποιοσδήποτε αριθμός συρματόσχοινων μπορεί να σχεδιαστεί με αυτό τον τρόπο μέσα στο πρανές.



Σχήμα 4.27: Εφαρμογή ενίσχυσης πρανούς.

Τα άκρα του συρματόσχοινου μπορούν να τοποθετηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια με επιλογή των λαβών της γραμμής που χαρακτηρίζει την ενίσχυση. Αυτή η ενέργεια ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου: Coordinates, για την εισαγωγή των συντεταγμένων x, y στα άκρα. Ακόμη, τα άκρα δύναται να επανατοποθετηθούν με την επιλογή Move Nodes, επιλέγοντας το άκρο και τραβώντας το εκεί που είναι επιθυμητό. Τα συρματόσχοινα ενίσχυσης μπορούν να διαγραφούν από το πρανές με την επιλογή Delete.

Μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης στο πρανές, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των ιδιοτήτων του υλικού της ενίσχυσης. Αυτό πραγματοποιείται με την επιλογή της εντολής Properties. Οι ιδιότητες των στοιχείων εδώ εισάγονται μέσω ενός αριθμού αναγνώρισης. Αυτός ο αριθμός θα εμφανιστεί πάνω από κάθε συρματόσχοινο όταν επιλεγθεί η εντολή Properties. Ο κωδικός που έχει δοθεί εξαρχής είναι C1 (σχήμα 4.28). Επιλέγοντας τον κωδικό ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου με τις ιδιότητες αυτού.



Σχήμα 4.28: Παράθυρο εισαγωγής των ιδιοτήτων των συρματόσχοινων ενίσχυσης.

Μπορούν να προσομοιωθούν 2 τύποι ενίσχυσης: Μία συνεχής *Geosynthetic Sheet* ή μία κατά διαστήματα ενίσχυση *Spaced Reinforcement*.

Αν επιλεγεί η δεύτερη (π.χ. για προσομοίωση εδαφικών αγκυρίων), τότε καθορίζεται και το διάστημα στην κατεύθυνση εκτός επιπέδου πεδίου.

Η παράμετρος διαστήματος, χρησιμοποιείται για την αυτόματη διαβάθμιση των ιδιοτήτων και των παραμέτρων, για τον υπολογισμό της επίδρασης της κατανομής των συρματόσχοινων πάνω από ένα τακτικά χωρισμένο ανά διαστήματα σχέδιο.

Σημείωση: Οι πραγματικές ιδιότητες του συρματόσχοινου εισάγονται στο παράθυρο διαλόγου *Cable Element Properties*, και όχι στις διαβαθμισμένες ιδιότητες.

Στη διαδικασία αυτή, δύναται να εισαχθεί ένα μοντέλο του Young για την ενίσχυση, ή να επιτραπεί στο πρόγραμμα να υπολογίσει αυτόματα την αναλογία, για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας του υπολογισμού. Προτείνεται, εάν ο συντελεστής της ενίσχυσης είναι δύο τάξεις μεγέθους (ή παραπάνω), μεγαλύτερος από την ελαστική ακαμψία του υλικού του πρανούς, τότε η υπολογισμένη τιμή για το συντελεστή, να επιλέγεται.

Εάν ο συντελεστής ενίσχυσης είναι κάτι περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από την ακαμψία υλικού του πρανούς, ο υπολογισμένος συντελεστής

ασφάλειας θα είναι ουσιαστικά ο ίδιος για το συντελεστή εισαγωγής, όπως και για τον υπολογισμένο συντελεστή, αλλά η σύγκλιση της λύσης θα είναι πολύ αργή.

Επιπλέον, στο συντελεστή του Young, πρέπει να εισαχθούν η εφελκυστική αντοχή διαρροής και η περιοχή διατομής της ενίσχυσης. Για ένα γεωσυνθετικό φύλλο, η περιοχή είναι ίση με το πάχος του φύλλου πολλαπλασιασμένο με μία μονάδα βάρους, στην κατεύθυνση, εκτός επιπέδου πεδίου.

Οι ιδιότητες που περιγράφουν τη διατμητική αλληλεπίδραση της ενίσχυσης με το πρανές στο υλικό διεπιφάνειας, εισάγονται στο παράθυρο διαλόγου **Grout Material**. Αυτές οι ιδιότητες καθορίζονται στα πλαίσια μιας δύναμης συνεκτικής ή δεσμού και μιας γωνίας τριβής δεσμού. Η σχέση που ακολουθεί, χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό της μέγιστης διατμητικής δύναμης δεσμού, $F_s^{\max}$, που μπορεί να αναπτυχθεί κατά μήκος της διεπιφάνειας ανά μήκος L , του συρματόσχοινου:

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = c_b + \sigma'_c \times \tan(\phi_b) \times p \quad (4.14)$$

όπου:

c_b = αντοχή ή συνοχή δεσμού [δύναμη/μήκος συρματόσχοινου]

σ'_c = μέση αποτελεσματική περιοριζόμενη ορθή τάση στο στοιχείο ενίσχυσης

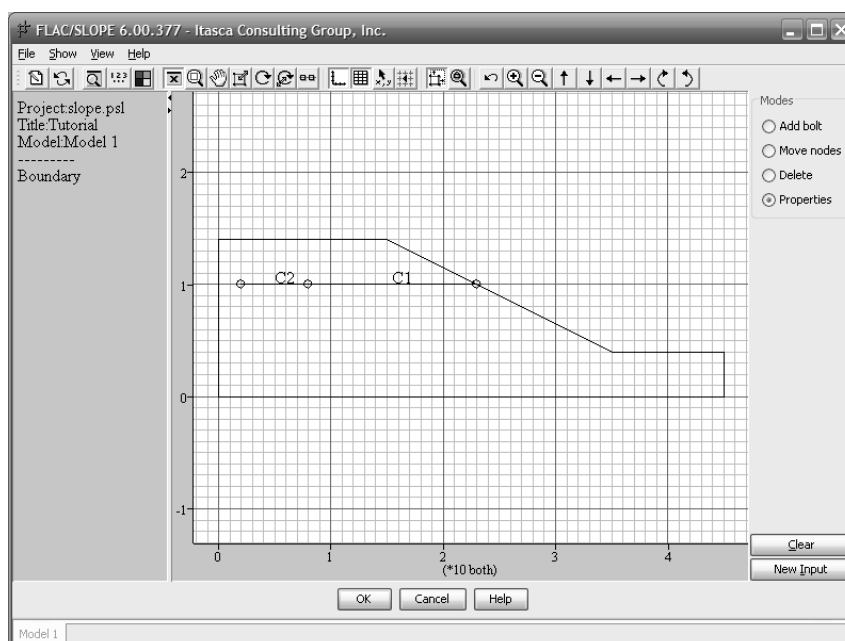
ϕ_b = γωνία τριβής του δεσμού (σε μοίρες) και

p = περίμετρος του στοιχείου ενίσχυσης

Η ελαστική διατμητική ακαμψία στη διεπιφάνεια δεν επηρεάζει στον υπολογισμό του παράγοντα της ασφάλειας. Επομένως, υπολογίζεται αυτόματα για να βελτιστοποιήσει τη σύγκλιση λύσης.

Οι ιδιότητες της ενίσχυσης καθορίζονται με έναν κωδικό, ο οποίος είναι C1 (βλέπε σχήμα 4.28). μπορούν όμως να δημιουργηθούν κι άλλοι κωδικοί με την επιλογή **NEW** στο **Cable Element Properties**, οι οποίοι θα εμπεριέχουν διαφορετικές ιδιότητες (π.χ C2 κτλ).

Μπορούν να προσδιοριστούν τμήματα με διαφορετικές ιδιότητες κατά μήκος ενός συρματόσχοινου (cable), π.χ. για την προσομοίωση ενωμένων και μη, τμημάτων ενός σκυροδετημένου αγκυρίου. Στο σχήμα 4.29 απεικονίζεται ένα αγκύριο το οποίο αποτελείται από δύο τμήματα.



Σχήμα 4.29: Δημιουργία αγκυρίου με το ένα τμήμα σκυροδετημένο και το άλλο τμήμα μη σκυροδετημένο.

Το συγκεκριμένο αγκύριο κατασκευάστηκε μέσω της επιλογής **Add Bolt** στο ίδιο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 4.29). Κατασκευάζεται ένα τμήμα και επιλέγοντας με το κέρσορα το τελευταίο κόμβο, τότε αρχίζει η κατασκευή του δεύτερου τμήματος, το οποίο αυτόματα θα ενωθεί με το πρώτο τμήμα. Έπειτα με την επιλογή του εικονιδίου **Properties** εισάγονται οι επιθυμητές ιδιότητες των δύο τμημάτων (C1 και C2) του αγκυρίου.

Τέλος, εφόσον οι συνθήκες και ιδιότητες ενίσχυσης κρίνονται ικανοποιητικές, επιλέγεται το εικονίδιο **OK**, με το οποίο επιτυγχάνεται και η έξοδος από το παράθυρο διαλόγου.

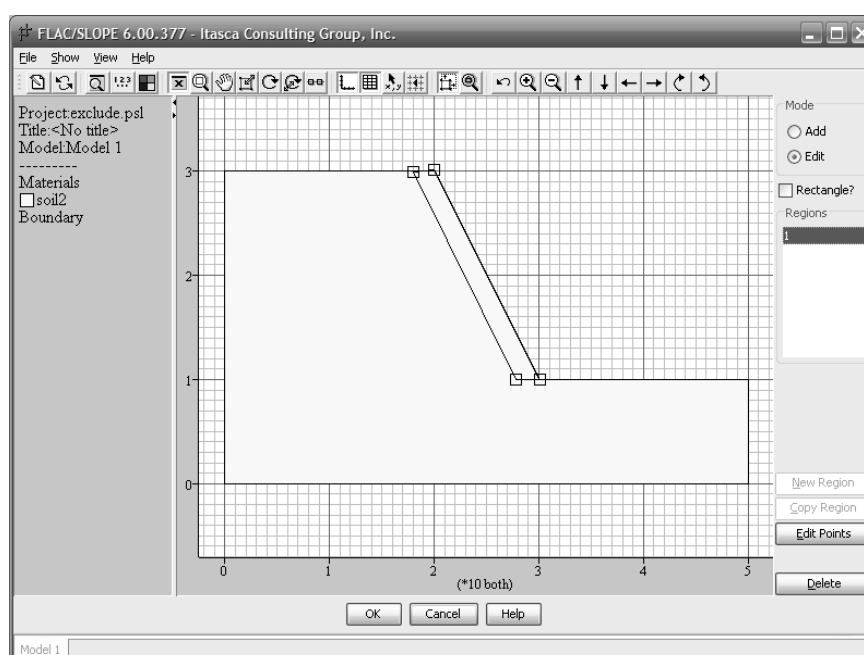
Οι αξονικές δυνάμεις υπολογίζονται στα συρματόσχοινα, κατά το στάδιο επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας. Αυτές οι τιμές δύναται να εμφανίζονται στη τελική φάση της εκτύπωσης του μοντέλου με τ' αποτελέσματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύμβαση συμβολισμού για τις αξονικές δυνάμεις στα καλώδια, είναι ότι οι δυνάμεις είναι αρνητικές στην καταπόνηση. Επίσης, τα συρματόσχοινα στο πρόγραμμα *FLAC/Slope* δεν μπορούν να δεχθούν φορτίο σε θλίψη.

4.8.10 Εξαίρεση περιοχών από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας

Είναι εφικτό να εξαιρεθούν περιοχές του προτύπου από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, με τη χρήση του εργαλείου **Exclude**. Η επιλογή του κατά το

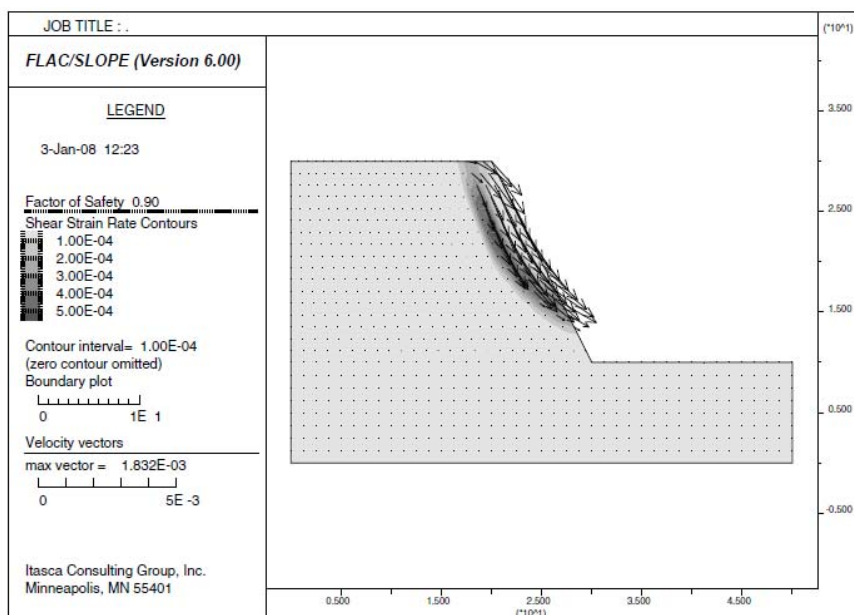
στάδιο κατασκευής του προτύπου, οδηγεί σε παράθυρο διαλόγου της μορφής του σχήματος 4.30. Επιλέγοντας με το κέρσορα εντός των ορίων του μοντέλου, ανοίγει ένα πολυγωνικό κουτί με τέσσερις γωνιακές λαβές. Τα σημεία λαβής μπορούν να συρθούν για να τοποθετηθεί το πλαίσιο τόσο ώστε να καλύψει την περιοχή που εξαιρείται. Στο Σχήμα 4.30, το πλαίσιο έχει επανατοποθετηθεί για να καλύψει μια λεπτή περιοχή κατά μήκος του μετώπου του πρανούς.

Πολλαπλές περιοχές μπορούν να επιλεγούν προς εξαίρεση, και οι γωνιακές λαβές μπορούν να επεξεργαστούν για την επανατοποθέτηση περιοχών. Οι περιοχές αυτές, μπορούν επίσης να διαγραφούν.



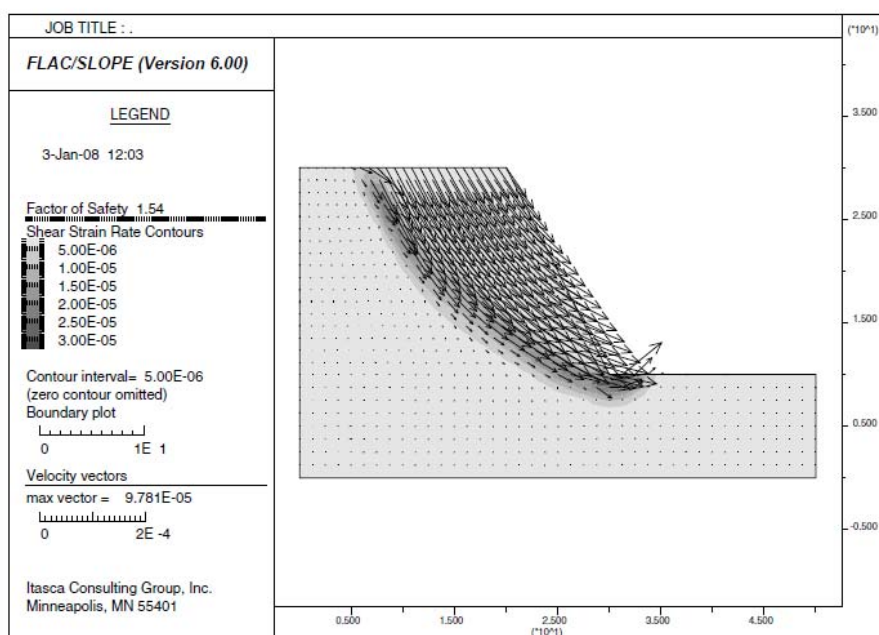
Σχήμα 4.30: Δικτύωμα μεσαίας ζωνοποίησης, που δείχνει τις ζώνες οι οποίες εξαιρούνται από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Οι επιπτώσεις της χρήσης του εργαλείου αποκλεισμού **EXCLUDE** φαίνονται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του συντελεστή ασφαλείας για το πρανές που φαίνεται στο σχήμα 4.30, με και χωρίς την αποκλεισμένη περιοχή. Το σχήμα 4.31 παρουσιάζει το γράφημα του συντελεστή ασφάλειας, για την περίπτωση χωρίς τον αποκλεισμό μιας περιοχής, και το σχήμα 4.32 δείχνει το αποτέλεσμα με την εξαιρούμενη περιοχή. Στην πρώτη περίπτωση, η επιφάνεια αστοχίας τέμνει το πρανές, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η επιφάνεια αστοχίας εκτείνεται κάτω από το πρανές και μέσα στη βάση του.



Σχήμα 4.31: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας χωρίς αποκλεισμένη περιοχή από αυτόν.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το εργαλείο εξαίρεσης, ισχύει μόνο για τις ζώνες, στο μοντέλο του *Flac/Slope*. Οι διεπαφές ή οι δομικές ενισχύσεις οι οποίες βρίσκονται εντός μιας εξαιρουμένης περιοχής, θα εξακολουθούν να επηρεάζονται από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, αν η αντοχή της διεπαφής ή οι παράμετροι αντοχής του σκυροδέματος επιλέγονται ως παράμετροι του συντελεστή ασφαλείας στον υπολογισμό.



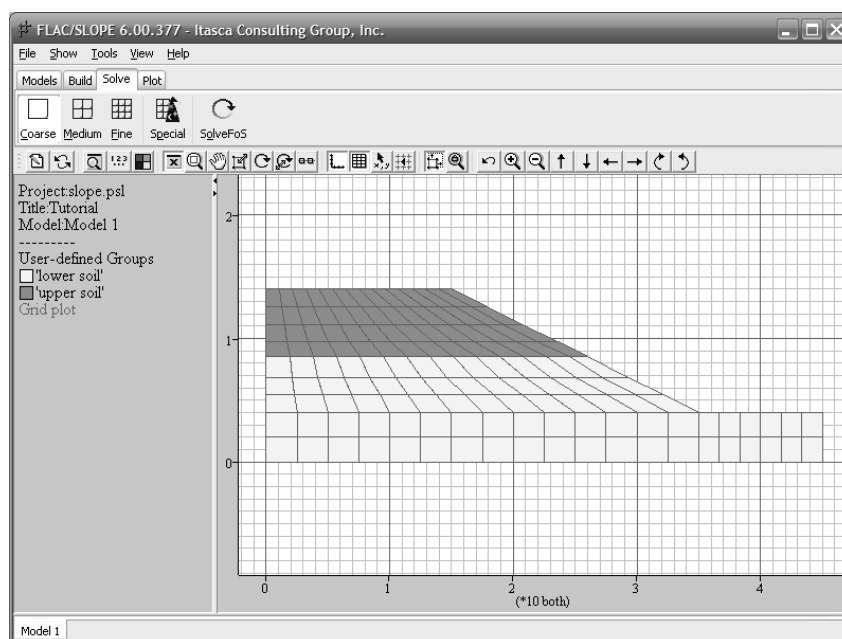
Σχήμα 4.32: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας με εξαιρουμένη περιοχή.

4.8.11 Στάδιο επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας

Η επίλυση του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται στο στάδιο επίλυσης **Solve**. Υπάρχουν τρία βήματα στο στάδιο αυτό: η δημιουργία κανάβου, η επιλογή της παραμέτρου του συντελεστή ασφάλειας και η επίλυση του συντελεστή ασφάλειας.

1. Δημιουργία δικτύωματος στοιχείων

Στο στάδιο επίλυσης αρχικά, πρέπει να δημιουργηθεί ένα αριθμητικό πλέγμα. Είναι διαθέσιμες τέσσερις επιλογές ζωνοποίησης: η απλή διακριτοποίηση (αδρόκκοκα τεμάχια-coarse mesh), η μέτρια (medium mesh), η λεπτή (μικρά τεμάχια-fine mesh) και η επιλογή από τον χρήστη (ειδική διακριτοποίηση). Για την καθεμιά επιλογή υπάρχει το αντίστοιχο εικονίδιο στο εργαλείο επίλυσης. Στο σχήμα 4.33 απεικονίζεται παράδειγμα διακριτοποίησης με την επιλογή της απλής μορφής πλέγματος (coarse mesh).



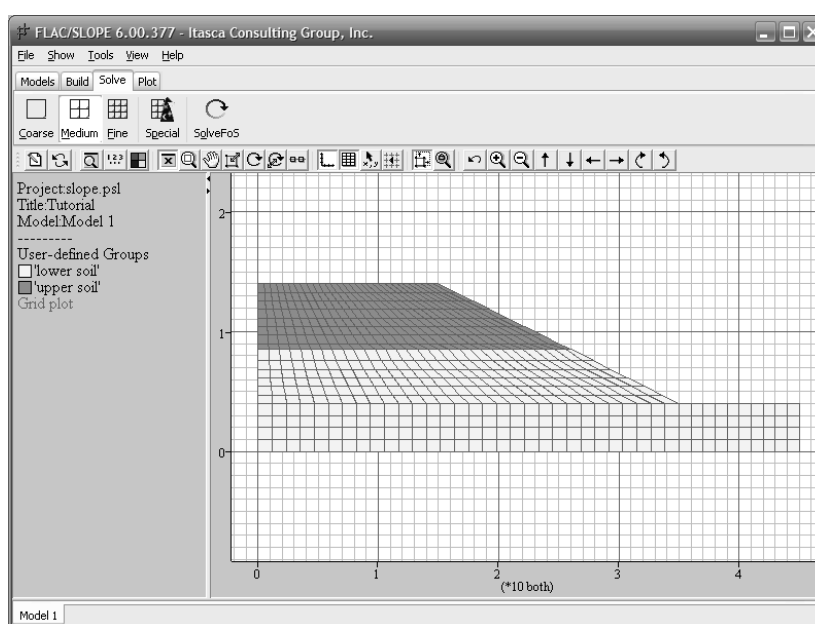
Σχήμα 4.33: Μοντέλο με απλή ζώνη διακριτοποίησης.

Η αραιότητα της ζώνης επηρεάζει την ακρίβεια του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας. Όσο πιο πυκνή είναι η διακριτοποίηση, τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια της επίλυσης.

Το μοντέλο απλής διακριτοποίησης συνίσταται για προκαταρκτικές αναλύσεις και αποτελείται από 20 ζώνες, κατά τον άξονα x του μοντέλου. Η επίλυση αυτού του

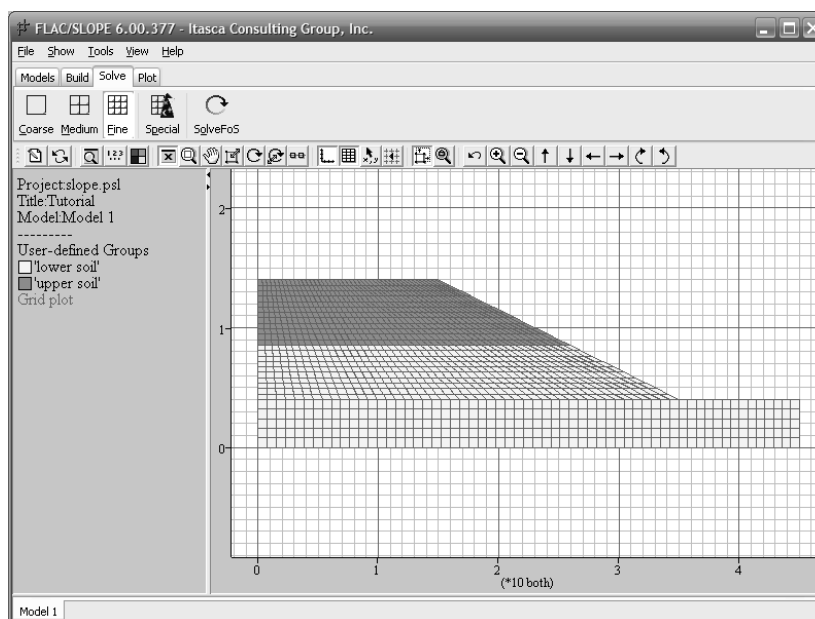
μοντέλου είναι ιδιαίτερα γρήγορη (σε υπολογιστή με δυνατότητα 1 GHz, η διαδικασία διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα).

Το μοντέλο με την μέτρια διακριτοποίηση (σχήμα 4.34) προτείνεται για πιο περιεκτικές μελέτες και ο αριθμός ζωνών που εισάγεται σε αυτό το τύπο πλέγματος είναι 40. Τα αποτελέσματα αυτού του τύπου ζώνης, έχει βρεθεί ότι είναι σε καλή συμφωνία με τις οριακές αναλύσεις και τα αποτελέσματα οριακής ισορροπίας. Ένα μοντέλο μέτριας διακριτοποίησης χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την επίλυση του συντελεστή ασφάλειας (σε υπολογιστή ίδιας δυναμικότητας όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η διαδικασία διαρκεί μερικά λεπτά).



Σχήμα 4.34: Μοντέλο με μέτρια πυκνωση ζωνών διακριτοποίησης.

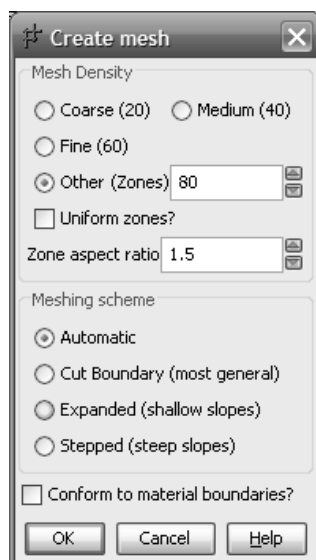
Το μοντέλο πυκνής διακριτοποίησης, με 60 ζώνες στο πλέγμα κατά τον άξονα x (σχήμα 4.35), προτείνεται ως έλεγχος σε αναλύσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε μοντέλα μέτριας διακριτοποίησης. Ο υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας σε μοντέλο πυκνής διακριτοποίησης έρχεται σε πολύ καλή συμφωνία με αυτόν του μοντέλου μέτριας διακριτοποίησης. Εντούτοις, εξαιτίας του τύπου διακριτοποίησης, παίρνει περισσότερο χρόνο ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, συνήθως δεν προτιμάται η επιλογή του μοντέλου αυτού για περιεκτικές μελέτες.



Σχήμα 4.35: Μοντέλο με πυκνή διακριτοποίηση ζωνών.

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετά ανώμαλες επιφάνειες στο μοντέλο που προσομοιώνεται (π.χ., ανώμαλη επιφάνεια πρανούς, όριο στρώσεων υλικού ή διεπιφάνειας) δύναται και είναι απαραίτητη, η χρήση μοντέλου πυκνής διακριτοποίησης. Σε αυτού του τύπου την διακριτοποίηση, οι ζώνες του πλέγματος, είναι άνω των 60. Εάν κατά τη διάρκεια του βήματος δημιουργίας της διακριτοποίησης, εμφανιστεί στην οθόνη του υπολογιστή το μήνυμα που δηλώνει κακή γεωμετρία “Bad Geometry”, τότε θα πρέπει να δοκιμαστεί η επιλογή ειδικής διακριτοποίησης **Special** από τον χρήστη.

Το συγκεκριμένο εργαλείο προσφέρει περισσότερο έλεγχο στις παραμέτρους ζωνοποίησης, καθώς ο ίδιος ο χρήστης ορίζει τον αριθμό ζωνών διακριτοποίησης, αλλά μπορεί και να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά αναλογίας των ζωνών, π.χ. με επιλογή άνω των 60 ζωνών διακριτοποίησης, η αναλογία ζωνών από 1:1 γίνεται 1,5:1 (σχήμα 4.36) ή όσο χρειαστεί, ώστε να αποδοθεί καλύτερα η διακριτοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προς ανάλυση μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί, πως σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας, αυξάνεται κατά πολύ, σε σχέση με τις προηγούμενες επιλογές διακριτοποίησης.



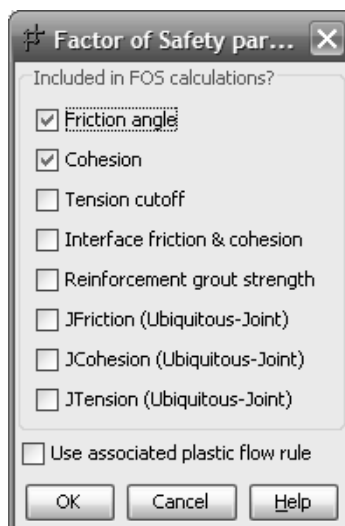
Σχήμα 4.36: Παράθυρο επιλογής τύπου διακριτοποίησης ενός μοντέλου.

Εάν συνεχίσει να υφίσταται το πρόβλημα με τη δημιουργία κανάβου, τότε είναι απαραίτητη η επιστροφή στο στάδιο κατασκευής **Build** ώστε να διευθετηθεί η ανώμαλη επιφάνεια.

2. Παράμετροι του συντελεστή ασφάλειας

Εφόσον ολοκληρωθεί η δημιουργία του κανάβου, τότε μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφάλειας. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με την επιλογή του εικονιδίου **Solve FoS**. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας βασίζεται στη τεχνική μείωσης αντοχής. Εξ ορισμού, οι παράμετροι αντοχής του υλικού, συνοχή και γωνία τριβής μειώνονται σε συμφωνία με τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) που προαναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Μετά την επιλογή του εικονιδίου επίλυσης, ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή των παραμέτρων του συντελεστή ασφάλειας, με επιλεγμένες τις ιδιότητες γωνία τριβής και συνοχής (σχήμα 4.37). Με την επιλογή του εικονιδίου **OK**, αρχίζει ο υπολογισμός.

Είναι δυνατό να εισαχθούν και άλλες παράμετροι αντοχής στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, όπως η επιλογή του πλαισίου **Tension Cutoff**, κατά το οποίο η εφελκυστική αντοχή του υλικού, δύναται να μειωθεί με τον ίδιο τρόπο που μειώνονται η συνοχή και η γωνία τριβής του υλικού.



Σχήμα 4.37: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής των παραμέτρων επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας.

Ο κανόνας συνηρημένης ή μη, πλαστικής ροής μπορεί επίσης να οριστεί για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με επιλογή της εντολής `Use associated plastic flow rule`. Ο κανόνας συνηρημένης πλαστικής ροής του υλικού, ποσοτικοποιεί την επίδραση της διατμητικής διαστολής που εμφανίζεται σε ένα υλικό στην αρχή της αστοχίας. Αυτό γενικότερα εκφράζεται με τη σχέση μεταξύ, της γωνίας τριβής ενός μοντέλου Mohr-Coulomb και της γωνίας διαστολής· η γωνία διαστολής σχετίζεται με το λόγο του όγκου πλαστικής καταπόνησης, προς τη διατμητική πλαστική καταπόνηση. Για συνηρημένη πλαστική ροή, η γωνία διαστολής ισούται με την γωνία τριβής. Εάν είναι επιλεγμένες οι ιδιότητες `Use associated plastic flow rule` και `Friction angle`, τότε η γωνία διαστολής θα καθοριστεί ίση με τη γωνία τριβής κατά τη διάρκεια υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας· ειδάλλως, θα διατηρηθεί σταθερή στην προκαθορισμένη της τιμή.

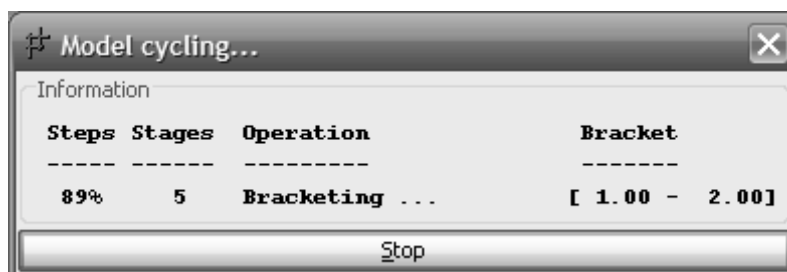
Για εδάφη, πετρώματα και σκυρόδεμα, η γωνία διαστολής γενικότερα είναι σημαντικά πολύ μικρότερη από τη γωνία τριβής ενός υλικού. Η υφιστάμενη πλαστική ροή, δεν παρατηρείται σε τριαξονική ή διατμητική δοκιμή αυτών των υλικών. Εάν επιλεγθεί η υφιστάμενη πλαστική ροή για φυσικώς μη ρεαλιστική γωνία διαστολής (π.χ., στην περίπτωση που η γωνία τριβής είναι μεγαλύτερη των 30°), ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, μπορεί να μην συγκλίνει.

3. Επίλυση του συντελεστή ασφαλείας

Με την επιλογή του εικονιδίου `OK` στο προαναφερθέν παράθυρο διαλόγου του σχήματος 4.37, αρχίζει ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, κατά τον οποίο

πραγματοποιείται μια σειρά προσομοιώσεων και η κατάσταση του υπολογισμού θα καταγράφεται στο παράθυρο διαλόγου **Model cycling** (Σχήμα 4.38). Αυτό το εικονίδιο εμφανίζει το ποσοστό των βημάτων που ολοκληρώνονται για ένα συγκεκριμένο στάδιο επίλυσης (βασισμένο στον χαρακτηριστικό χρόνο ανταπόκρισης), το συνολικό αριθμό σταδίων που έχουν εκτελεστεί μέχρι εκείνη τη στιγμή στην ακολουθία, τη λειτουργία η οποία διενεργείται τη δεδομένη στιγμή, και τις τιμές οριοθέτησης (bracketing) του συντελεστή ασφαλείας· το εύρος του ορίου (bracket) θα μειώνεται συνεχώς μέχρι να προσδιοριστεί η τελική τιμή.

Η εκτέλεση του υπολογισμού σταματά, όταν η διαφορά τιμής μεταξύ του άνω και κάτω ορίου γίνει μικρότερη από 0,005. Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός, καταγράφεται η τελική τιμή.



Σχήμα 4.38: Παράθυρο διαλόγου «εκτέλεσης» επίλυσης του μοντέλου.

Αν η διαδικασία υπολογισμού, διακοπεί μετά την επίτευξη της πρώτης οριοθέτησης, τότε εκτιμάται ένας συντελεστής ασφάλειας κατά προσέγγιση, αλλά όχι με μεγάλη ακρίβεια.

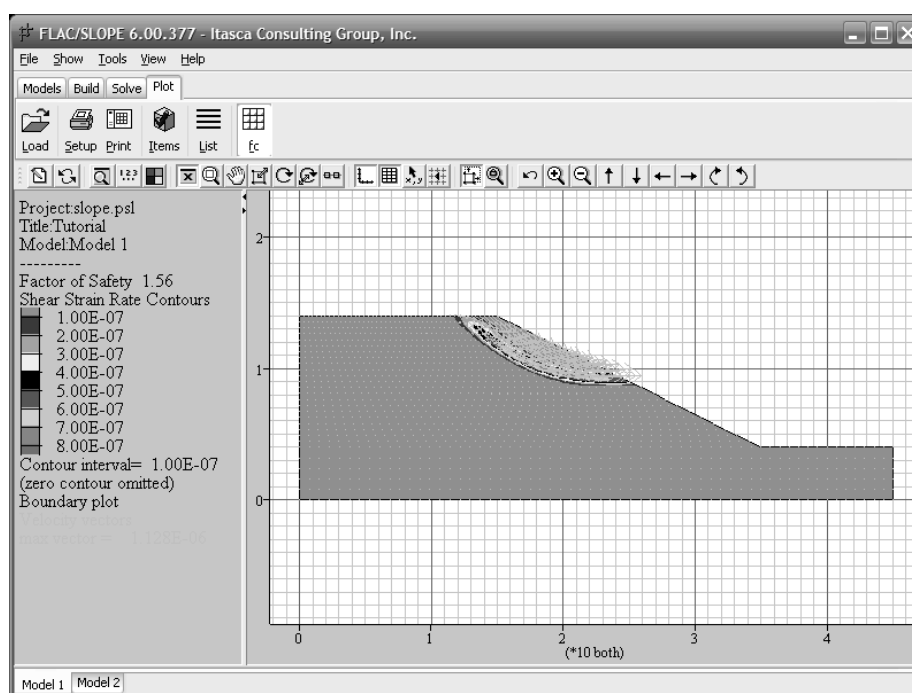
Μετά την ολοκλήρωση του υπολογισμού, του συντελεστή ασφαλείας, δημιουργείται ένας φάκελος με κατάληξη “*.FSV.” Το αρχείο αυτό αντιστοιχεί στη τελευταία κατάσταση μη-ισορροπίας του μοντέλου, στο οποίο ο υπολογισμός σταμάτησε. Τα αποτελέσματα του αρχείου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση των μεταβλητών, όπως για παράδειγμα τα περιγράμματα της διατμητικής παραμόρφωσης και τα διανύσματα της ταχύτητας, τα οποία προσδιορίζουν την κρίσιμη επιφάνεια, αλλά και το πιθανό μοτίβο της αστοχίας, στο μοντέλο. Τα αρχεία αυτά προσδιορίζονται με το όνομα του μοντέλου (π.χ., Model 1) τον τύπο διακριτοποίησης (π.χ., Coarse) και τις παραμέτρους του συντελεστή ασφάλειας (π.χ., fc=Friction angle + Cohesion ή afc = associated plastic flow + friction angle + coarse). Οι συντομεύσεις

για τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας είναι:

- ✓ f = γωνία τριβής
- ✓ c = συνοχή
- ✓ t = αντοχή εφελκυσμού
- ✓ uf = γωνία τριβής συνεχούς άρθρωσης
- ✓ uc = συνοχή συνεχούς άρθρωσης
- ✓ ut = αντοχή εφελκυσμού συνεχούς άρθρωσης
- ✓ i = τριβή και συνοχή διεπιφάνειας
- ✓ s = αντοχή σκυροδέματος δομικού στοιχείου
- ✓ a = κανόνας συνηρημένης πλαστικής ροής.

4.8.12 Δημιουργία Εκτύπωσης Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας παρουσιάζονται στο εργαλείο εκτύπωσης το οποίο είναι προσπελάσιμο μέσω του εικονιδίου **Plot**. Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός, τότε προστίθεται ακόμη ένα εικονίδιο στο μενού του Plot για την απεικόνιση της αστοχίας (σχήμα 4.39), με όνομα που αντιστοιχεί στην διακριτοποίηση και τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό.

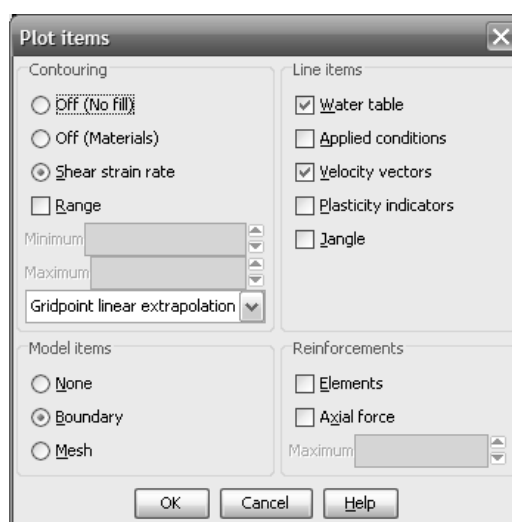


Σχήμα 4.39: Γράφημα συντελεστή ασφαλείας για πυκνή διακριτοποίηση, συμπεριλαμβανομένου της γωνίας τριβής και της συνοχής, στο υπολογισμό.

Η απεικόνιση της αστοχίας γίνεται μέσω ενός γραφήματος το οποίο περιλαμβάνει τη συγκέντρωση των περιγραμμάτων της διατμητικής παραμόρφωσης και τα διανύσματα ταχύτητας. Τα περιγράμματα της διατμητικής παραμόρφωσης υποδηλώνουν τη περιοχή της επιφάνειας αστοχίας, και τα διανύσματα ταχύτητας υποδεικνύουν το πιθανό μοτίβο της αστοχίας. Τα διανύσματα ταχύτητας δε σχετίζονται με μετακίνηση σε πραγματικό χρόνο, απλά υποδηλώνουν μια αίσθηση του μοτίβου κίνησης σε οποιοδήποτε επιλεγμένο σημείο στον υπολογισμό.

Το γράφημα αυτό δημιουργείται στο στάδιο της επίλυσης κατά το οποίο οι δυνάμεις μειώνονται στις τιμές κατά την έναρξη της αστοχίας. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας (δηλαδή, ο λόγος της πραγματικής αντοχής προς την αντοχή στην οποία εμφανίζεται η αστοχία, όπως προσδιορίζεται από τις εξισώσεις 4.1 και 4.2) απεικονίζεται στο υπόμνημα του γραφήματος.

Στην εκτύπωση των αποτελεσμάτων δύναται να επιλεγούν διαφορετικές παράμετροι, μέσω του εικονιδίου **Items**, το οποίο ανοίγει το παράθυρο διαλόγου που φαίνεται στο σχήμα 4.40.



Σχήμα 4.40: Παράθυρο διαλόγου για τα στοιχεία της εκτύπωσης του συντελεστή ασφαλείας.

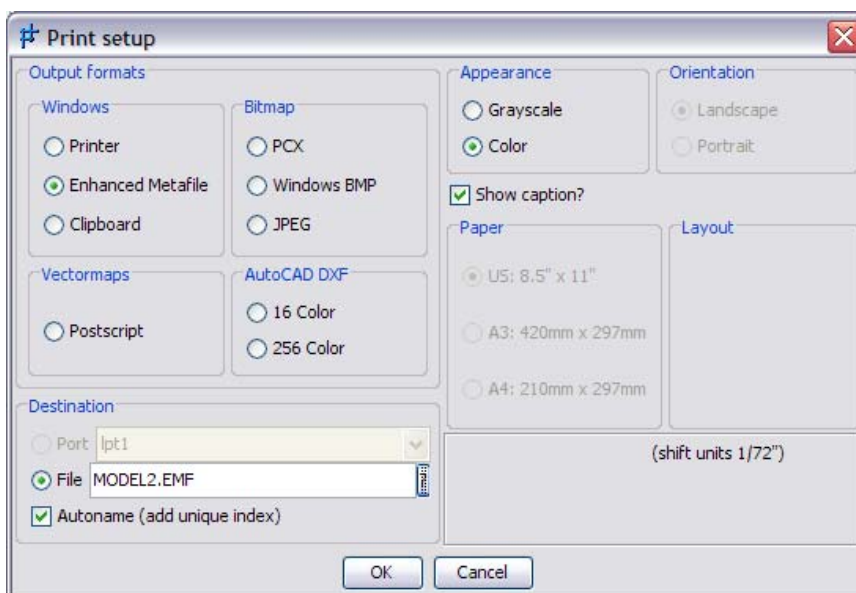
Τα περιγράμματα αναλογίας για τη διατμητική καταπόνηση τερματίζουν στα κέντρα βάρους της ζώνης· δεν επεκτείνονται στα γεωμετρικά όρια του μοντέλου. Μια λειτουργία προσέγγισης είναι διαθέσιμη για να επεκτείνει τα περιγράμματα στα γεωμετρικά όρια. Η λειτουργία αυτή χρησιμοποιεί έναν απλό γραμμικό υπολογισμό μέσου όρου.

Οι τρεις καμπύλες προσέγγισης είναι προσβάσιμες με την επιλογή των εικονιδίων **Zone Centroid (Exact)**, **Gridpoint Linear Extrapolation** ή **Gridpoint Bilinear Extrapolation** στο μενού του εργαλείου **Plot**. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η δεύτερη επιλογή παρέχει την πιο ευκρινή απεικόνιση της επιφάνειας αστοχίας.

Άλλες προαιρετικές επιλογές που μπορούν να συμπεριληφθούν στην εκτύπωση είναι: τα στοιχεία πλέγματος, η γραμμή του υδροφόρου ορίζοντα και οι εφαρμοσμένες συνθήκες. Επίσης, μπορούν να συμπεριληφθούν οι ενδείξεις πλαστικότητας· οι οποίες αποδίδουν μοτίβο του τύπου αποτυχίας — π.χ., διατμητική αστοχία ή αστοχία εφελκυσμού.

Εάν στο μοντέλο έχουν εισαχθεί στοιχεία ενίσχυσης, η θέση εφαρμογής της ενίσχυσης και η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο τελευταίο στάδιο μη-ισορροπίας, μπορούν να συμπεριληφθούν στο σχέδιο του συντελεστή ασφαλείας.

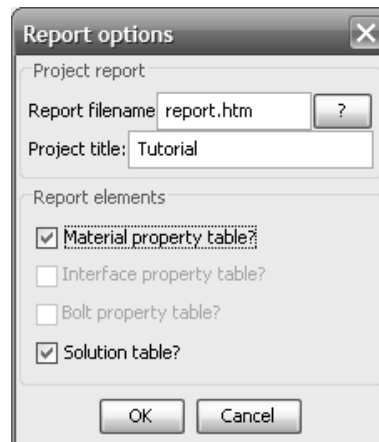
Στο παράθυρο διαλόγου για τις παραμέτρους εκτύπωσης του γραφήματος των αποτελεσμάτων, υπάρχει επιλογή για την έντυπη εκτύπωση αυτών (σχήμα 4.41). Αυτό το παράθυρο διαλόγου παρέχει επιλογές για το είδος, τη μορφή και την ονομασία της έντυπης εκτύπωσης.



Σχήμα 4.41: Παράθυρο διαλόγου για τη ρύθμιση εκτύπωσης των αποτελεσμάτων.

Τέλος, μέσω του προγράμματος μπορεί να εξαχθεί αναφορά με τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Επιλέγοντας το αρχείο (File) στο κύριο μενού του προγράμματος και στη συνέχεια **Create Report** ανοίγει το παράθυρο διαλόγου του σχήματος 4.42. Αυτή η

διαδικασία δημιουργεί ένα αρχείο μορφής HTML το οποίο περιέχει πίνακες με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε (σχήμα 4.43).



Σχήμα 4.42: Παράθυρο διαλόγου για την εξαγωγή αναφοράς της ανάλυσης.

Help

URL file:C:\Program Files\Itasca\flac600\FLAC_Slope\Tutorial\report.htm

Home Back Undo Close

Project file: slope.psl
Project title: Tutorial

Material Properties - Mohr-Coulomb

Class Name	Density kg/m ³	Cohesion Pa	Tension Pa	Friction Deg.	Dilation Deg.
upper soil	1500.0	5000.0	0.0	20.0	0.0
lower soil	1800.0	10000.0	0.0	25.0	0.0

Factor of Safety

Project	Model	Material Type	Shape	Mesh	Switches	FOS
slope	Model_1	Mohr-Coulomb	Simple Slope	Fine	fc	1.56
slope	Model_2	Mohr-Coulomb	Simple Slope	Fine	fc	1.46

Program: FLAC/Slope v6.0.377 & GIIC/Slope v2.10.395
Created: Wed Jan 02 11:10:15 CST 2008

Σχήμα 4.43: Απεικόνιση αναφοράς με πίνακες αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ****5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης ενός απλού μοντέλου εδαφικού πρανού με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC/Slope, στο οποίο δημιουργούνται συνθήκες αστοχίας. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου μοντέλου από την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (μέσω του προγράμματος Plaxis v7.0) και μιας απλοποιημένης μεθόδου οριακής ισορροπίας. Τα αποτελέσματα των επιλύσεων από τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και της οριακής ισορροπίας, ανακτήθηκαν αυτούσια από την Καλογήρου (2003).

Για λόγους απλοποίησης της διαδικασίας επίλυσης, το αρχικό μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε στο FLAC/Slope περιλαμβάνει τους εξής τρεις εδαφικούς σχηματισμούς (αρχίζοντας από το πάνω στρώμα): Ψαμμίτης – Άργιλος – Ψαμμίτης.

Το υπερκείμενο στρώμα ψαμμίτη είναι στραγγιζόμενο, ενώ το υποκείμενο δεν είναι. Το στρώμα της αργίλου για κάθε περίπτωση είναι λεπτότερο από τα άλλα δύο, ώστε να δημιουργηθεί με αυτό το τρόπο, συνθήκη ολίσθησης του πάνω τμήματος του πρανού στη διεπιφάνεια της στρώσης αργίλου - ψαμμίτη.

Το στρώμα της αργίλου προσομοιώνεται με τα εξής μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά: πάχος (h), γωνία κλίσης (α) ως προς την οριζόντιο, και συνοχή (c).

Στον πίνακα 5.1 παρατίθεται το σύνολο των περιπτώσεων επίλυσης με τα αντίστοιχα μεταβαλλόμενα μεγέθη.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των επιλύσεων αναφορικά με το ενδιάμεσο στρώμα της αργίλου

a/a Επίλυσης	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	Σενάρια Μοντέλων
1	1,25	150	5	<i>Clay-Aa</i>
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	1,25	50	5	<i>Clay-Ab</i>
8	1,25	50	10	
9	1,25	50	15	
10	1,25	50	20	
11	1,25	50	25	
12	1,25	50	30	
13	2,50	150	5	<i>Clay_Ba</i>
14	2,50	150	10	
15	2,50	150	15	
16	2,50	150	20	
17	2,50	150	25	
18	2,50	150	30	
19	2,50	50	5	<i>Clay_Bb</i>
20	2,50	50	10	
21	2,50	50	15	
22	2,50	50	20	
23	2,50	50	25	
24	2,50	50	30	

Λόγω του ότι η άργιλος ορίζεται για διάφορα πάχη και τιμές συνοχής, για διευκόλυνση της διαδικασίας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, δόθηκε η ονομασία αναφορικά με τις περιπτώσεις του Πίνακα 5.1:

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης του προβλήματος ευστάθειας πρανούς, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με τις ανάλογες ιδιότητες των υλικών και των συνθηκών που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση στο υπό μελέτη πρανές.

Η διαδικασία προσομοίωσης, ακολουθεί τα στάδια που περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

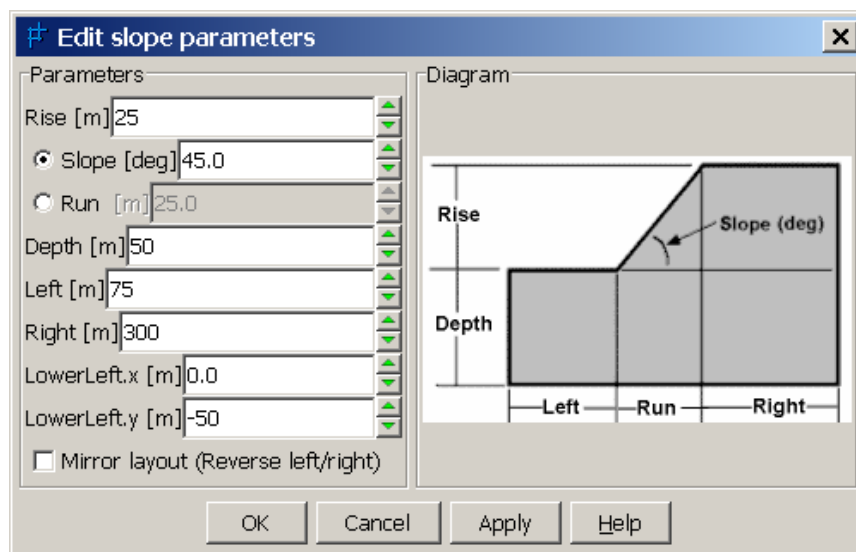
5.2.1 Γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης

Στις γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης περιλαμβάνονται η ονομασία του αρχείου που θα αποθηκευτεί η ανάλυση και το σύστημα των μονάδων που θα χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, όπως αυτές αναφέρονται στην παράγραφο 4.8.1 του κεφαλαίου 4. Στο ίδιο στάδιο μπορεί να γίνει και η επιλογή παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα ή η επιλογή εξαίρεσης περιοχών από τον υπολογισμό του FS, αλλά αυτό αν δεν είναι αποφασισμένο εξαρχής, μπορεί να γίνει οποιαδήποτε άλλη στιγμή στη συνέχεια από το βασικό μενού του προγράμματος στις επιλογές του αρχείου (File).

5.2.2 Κατασκευή μοντέλου

Σε αυτό το στάδιο επιλέγεται το βασικό σχήμα που θα έχει το μοντέλο και η ονομασία του. Το μοντέλο που επιλέγεται είναι απλής μορφής και η ονομασία που του δίνεται αρχικά είναι *Model 1*. Στη συνέχεια ακολουθεί το παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων αυτού του πρανούς, τα οποία αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (Εικόνα 5.1). Πρέπει να σημειωθεί, πως το πρόγραμμα ορίζει αυτόματα τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες στα πρανή:

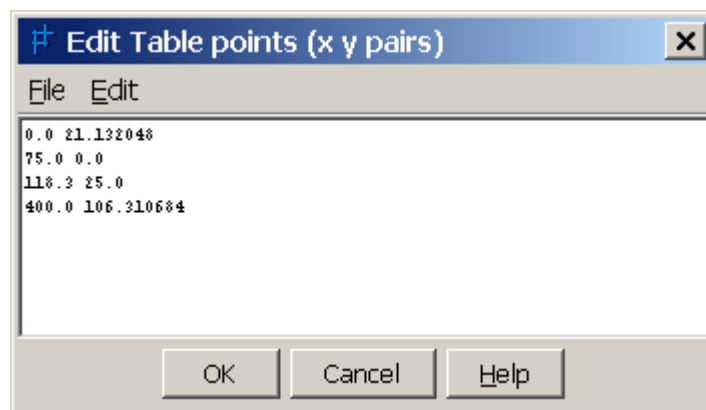
- Στα κατακόρυφα όρια του μοντέλου θεωρεί μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα y, άρα κύλιση σε αυτόν και
- στην κάτω οριζόντια επιφάνεια του μοντέλου θεωρείται μηδενική μετατόπιση ως προς και τους δύο άξονες άξονα x και y , δηλαδή πάκτωση αυτής.



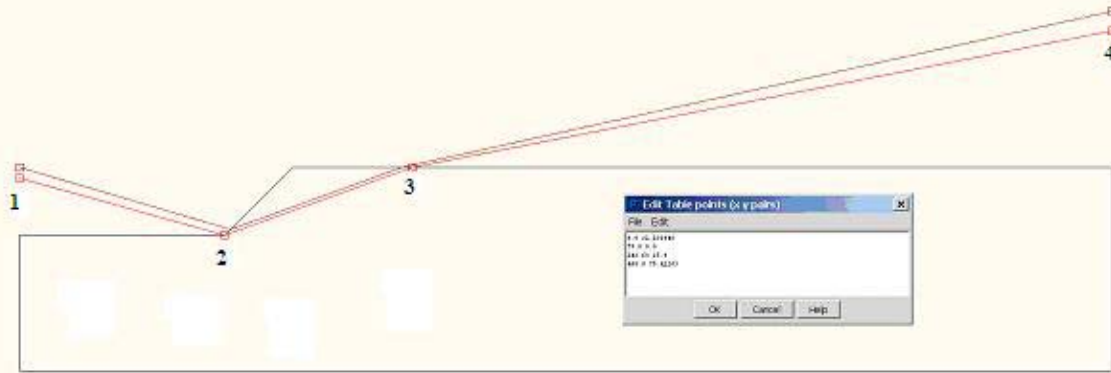
Εικόνα 5.1: Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών πρανούς προσομοίωσης .

5.2.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών μοντέλου

Στο στάδιο αυτό, πριν την εισαγωγή των ιδιοτήτων των σχηματισμών που δομούν το πρανές, δημιουργείται η ενδιάμεση στρώση της αργίλου για κάθε περίπτωση κλίσης (σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1). Για να γίνει αυτό, ο χρήστης μέσω του παραθύρου (εικόνα 5.2 και 5.3) εισαγωγής συντεταγμένων και αφού έχει προηγηθεί ο υπολογισμός τους για κάθε κλίση της αργλικής στρώσης, εισάγει τις συντεταγμένες που ορίζουν τη στρώση για διάφορες γωνίες κλίσης της.



Εικόνα 5.2: Εισαγωγή συντεταγμένων γεωμετρικών ορίων της στρώσης αργίλου.



Εικόνα 5.3: Δημιουργία της στρώσης αργίλου, βάσει των συντεταγμένων που ορίστηκαν στην εικόνα 5.2.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, η διαδοχή των στρώσεων από πάνω προς τα κάτω στο μοντέλο αρχίζει με το στραγγισμένο στρώμα του ψαμμίτη, ακολουθεί η στρώση της αργίλου και τέλος το στρώμα του μη στραγγιζόμενου ψαμμίτη.

Η διαφορά των δύο στρώσεων του ψαμμίτη, αναγνωρίζεται από το πρόγραμμα τη στιγμή που ορίζεται υδροφόρος ορίζοντας (ο τρόπος εισαγωγής της υδροφορίας γίνεται σε επόμενη παράγραφο), με τον εξής τρόπο:

Για τον υπερκείμενο (της αργίλου) ψαμμίτη το ότι είναι στραγγισμένος σημαίνει ότι στο παράθυρο των ιδιοτήτων του, θα εισαχθεί μόνο η ξηρή πυκνότητα, στο πλαίσιο Mass Density (Εικόνα 5.4).

Ενώ για τον υποκείμενο ψαμμίτη, λόγω του ότι ένα μέρος του είναι κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, στο παράθυρο των ιδιοτήτων του εκτός από τη ξηρή πυκνότητα (που αντιστοιχεί στο τμήμα στρώματος πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα) εισάγεται και η υγρή πυκνότητα του στο πλαίσιο Wet Density (εικόνα 5.5).

Όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.4 και 5.5, στο ίδιο παράθυρο διαλόγου εισαγωγής ιδιοτήτων, γίνεται και η επιλογή του μοντέλου το οποίο προσεγγίζει τη συμπεριφορά των υλικών. Στην προκειμένη παραμετρική ανάλυση, επιλέγεται το μοντέλο του Mohr-Coulomb.

The 'Define Material' dialog box is shown with the following settings:

- Class:** Tuc Slope Stability
- Name:** Sandstone
- Mass-Density:** [kg/m3] 2142.0
- Porosity:** 0.0 (selected)
- Wet Density [kg/m3]:** 2142.0
- Model:**
 - ☒ Mohr-Coulomb
 - ☐ Ubiquitous
- Plastic Properties:**
 - Cohesion [Pa]: 1000000.0
 - Tension [Pa]: 0.0
 - Angles: (Degrees)
 - Friction angle: 37.0
 - Dilation angle: 0.0
- Joint Properties:**
 - Joint angle (Deg.): 0.0
 - JCohesion [Pa]: 0.0
 - JTension [Pa]: 0.0
 - JFriction angle (Deg.): 0.0
 - JDilation angle (Deg.): 0.0

Buttons: OK, Cancel, Help

Εικόνα 5.4: Παράθυρο εισαγωγής ιδιοτήτων στραγγισμένου ψαμμίτη. Φαίνεται από τη τιμή που έχει το πλαίσιο της ιδιότητας πορώδους (porosity) και η υγρή πυκνότητα έχει μείνει ίδια με την ξηρή.

The 'Define Material' dialog box is shown with the following settings:

- Class:** Tuc Slope Stability
- Name:** Sandstone_drained
- Mass-Density:** [kg/m3] 2142
- Porosity:** 0.102 (selected)
- Wet Density [kg/m3]:** 2244.0
- Model:**
 - ☒ Mohr-Coulomb
 - ☐ Ubiquitous
- Plastic Properties:**
 - Cohesion [Pa]: 1000000
 - Tension [Pa]: 0.0
 - Angles: (Degrees)
 - Friction angle: 37
 - Dilation angle: 0.0
- Joint Properties:**
 - Joint angle (Deg.): 0.0
 - JCohesion [Pa]: 0.0
 - JTension [Pa]: 0.0
 - JFriction angle (Deg.): 0.0
 - JDilation angle (Deg.): 0.0

Buttons: OK, Cancel, Help

Εικόνα 5.5: Παράθυρο εισαγωγής ιδιοτήτων αστράγγιστου ψαμμίτη. Έχει εισαχθεί και η τιμή της υγρής πυκνότητας του υλικού, οπότε αλλάζει και η τιμή στο πορώδες.

Οι ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται σε αυτή την περίπτωση, είναι η συνοχή (c) και η εσωτερική γωνία τριβής (ϕ) του κάθε υλικού. Οι ελαστικές παράμετροι (το μέτρο ελαστικότητας του Young E και ο λόγος του Poisson ν), κατά το πρόγραμμα θεωρείται πως έχουν αμελητέα επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, για αυτό το λόγο, δεν γίνεται η εισαγωγή τους. Όμως, είναι αυτόματα καταχωρημένες στο σύστημα (για όλα τα υλικά στο μοντέλο) το μέτρο συμπίεσης (K) και το μέτρο διάτμησης (G) (σε μονάδες συστήματος SI) με τιμές 100MPa και 30MPa, αντίστοιχα.

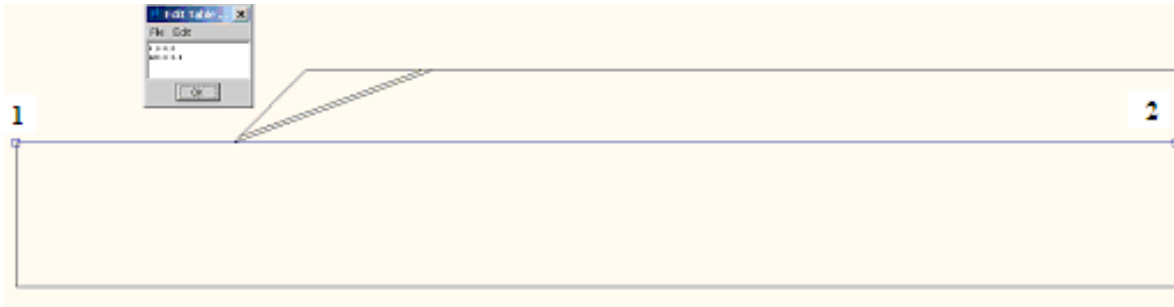
Οι ιδιότητες των υλικών που εισάγονται για την παραμετρική ανάλυση, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2, καθώς και οι παράμετροι επίλυσης για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας, για τις οποίες θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες στρωμάτων μοντέλου προσομοίωσης.

	Ψαμμίτης I	Αργίλος	Ψαμμίτης II
Καταστατικό Μοντέλο	Mohr-Coulomb		
γ_{dry} (kg/m ³)	2.142,00	1.632,00	2.142,00
γ_{wet} (kg/m ³)	2.244,00	1.836,00	2.244,00
c (kN/m ²)	1.000,00	150 ή 50	1.000,00
ϕ (°)	37,00	24,00	37,00
Tension cutoff	NAI		
Associated plastic flow rule	NAI		

5.2.4 Προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα

Σε όλες τις περιπτώσεις παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιούνται στην παρούσα εργασία, εισάγεται υδροφόρος ορίζοντας έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στην επίλυση και η πίεση του νερού των πόρων. Η θέση του υδροφόρου ορίζεται στα σημεία (0,0) έως και (400,0) της γεωμετρίας του πρανούς. Δηλαδή, ο υδροφόρος διέρχεται από τη βάση του πόδα του πρανούς, και το ειδικό βάρος του (*water density*) είναι ίσο με 1000kg/m³ όπως ορίζεται αυτόματα από το σύστημα (Εικόνα 5.6). Η θέση του υδροφόρου ορίζοντα, είναι τέτοια που να μην επηρεάζει άμεσα τη στρώση της αργίλου και την ενδεχόμενη αστοχία του πρανούς. Στην ουσία δεν υπάρχει λόγος εισαγωγής του στο μοντέλο προς διερεύνηση, αλλά εισήχθη χάριν επακριβούς προσομοίωσης με τις μεθόδους προς σύγκριση.

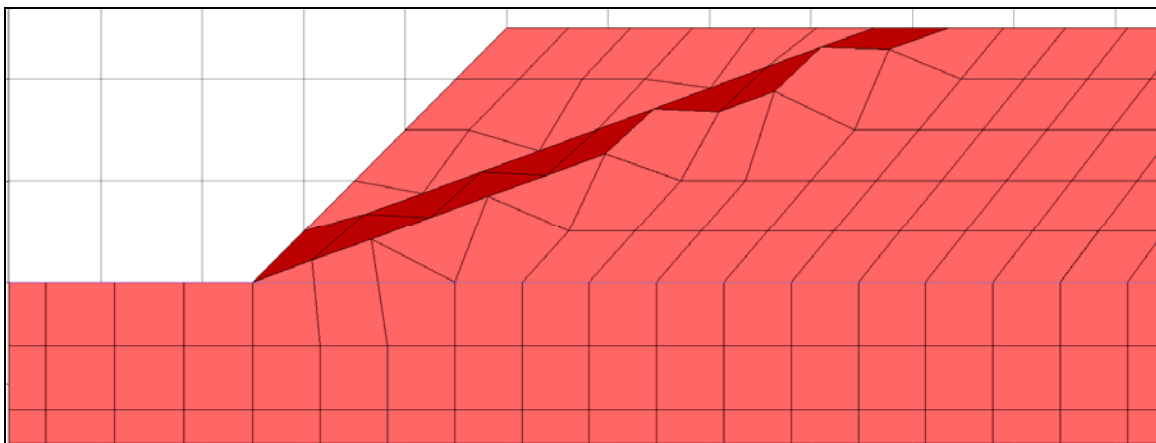


Εικόνα 5.6: Απεικόνιση γραμμής (μπλε) υδροφόρου ορίζοντα με εισαγωγή συντεταγμένων της στάθμης του, στα όρια 1 και 2 του μοντέλου.

5.2.5 Στάδιο επίλυσης μοντέλου προσομοίωσης

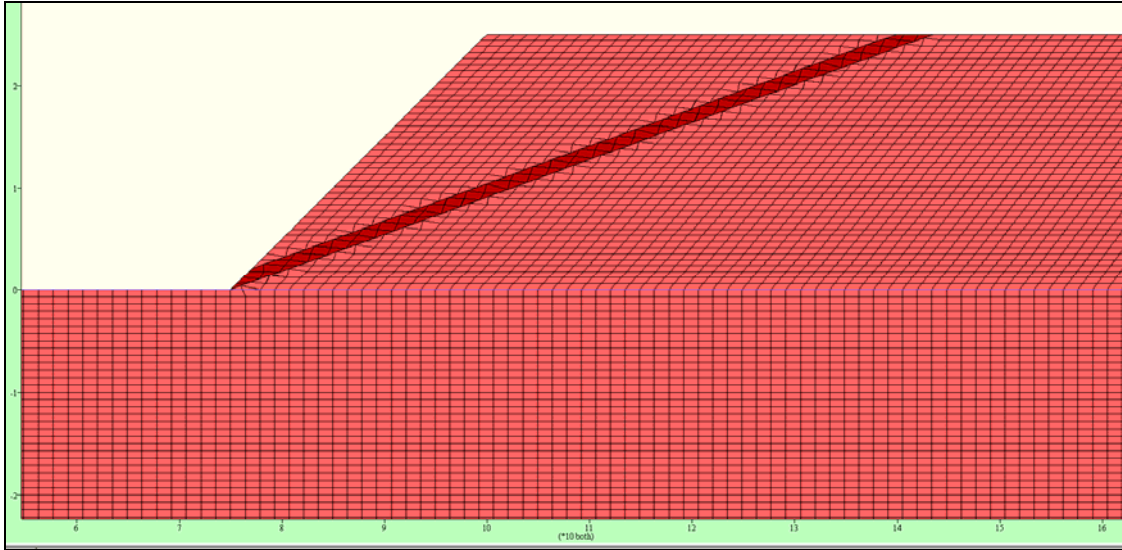
Για τον υπολογισμό⁴ του συντελεστή ασφαλείας, αρχικά θα πρέπει να πραγματοποιηθεί διακριτοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης, ορίζοντας ένα αριθμητικό πλέγμα. Σε όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν, οι τρεις οριζόμενες επιλογές διακριτοποίησης του προγράμματος (αραιή, μέτρια και πυκνή διακριτοποίηση), δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα διακριτοποίησης, αναφορικά με το ενδιάμεσο στρώμα της αργίλου.

Στην εικόνα 5.7 που ακολουθεί, απεικονίζεται ένα μοντέλο με ενδιάμεση στρώση αργίλου πάχους 2,5m και κλίση 20°, του οποίου η διακριτοποίηση έγινε με την επιλογή του προγράμματος για πυκνή διάταξη πλέγματος (*Fine*), με 60 ζώνες (κατακόρυφες λωρίδες του καννάβου) και αναλογία διαστάσεων της κυψέλης του πλέγματος ως προς τον κατακόρυφο άξονα y, 1:1. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7, η διακριτοποίηση της είναι μη ικανοποιητική, εφόσον δεν διακρίνεται εξολοκλήρου η ενδιάμεση στρώση.



Εικόνα 5.7: Παράδειγμα κακής διακριτοποίησης μοντέλου, όπου η ενδιάμεση στρώση δεν διακρίνεται ολόκληρη.

Επομένως, για όλα τα μοντέλα, η διακριτοποίηση προσδιορίστηκε με την εντολή *Special Mesh*, κατά την οποία εισάγεται μεγαλύτερος αριθμός ζωνών (άνω των 60 που αντιστοιχούν σε πυκνή διάταξη πλέγματος) και με την δυνατότητα περαιτέρω πύκνωσης των ζωνών αυξάνοντας το λόγο των διαστάσεών τους (*zone aspect ratio*) από 1:1 σε 1,5:1 ή και 2:1, όπου θεωρείται απαραίτητο για την επιτυχή διακριτοποίηση της στρώσης της αργίλου (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση καλής διακριτοποίησης μοντέλου, όπου διακρίνεται η ενδιάμεση στρώση της αργίλου και τα όριά της είναι ευκρινή.

Όσο αυξάνεται η αναλογία διαστάσεων των ζωνών διακριτοποίησης, μειώνεται το όριο του αριθμού των ζωνών για διακριτοποίηση και φυσικά αυξάνεται κατά πολύ ο χρόνος υπολογισμού.

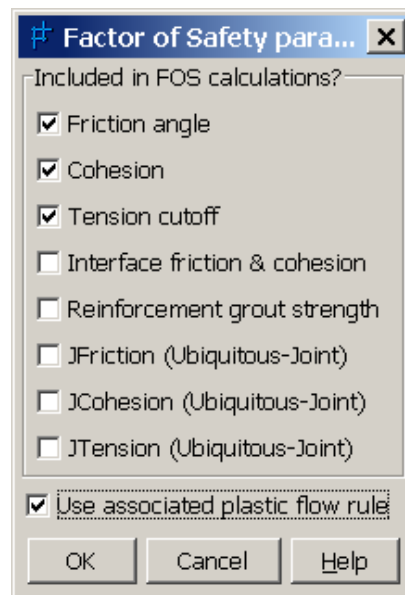
Έπειτα, από αρκετές δοκιμές διακριτοποίησης και διερεύνησης για την αναλογία διαστάσεων των ζωνών, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Ο λόγος της αναλογίας μπορεί να αυξηθεί έως και 4:1, πραγματοποιώντας διακριτοποίηση των μοντέλων, αλλά κανένα μοντέλο δεν επιλύεται για αναλογία πάνω από 2:1.
- Γενικότερα για κάθε επιλογή αναλογίας διαστάσεων των ζωνών διακριτοποίησης, υπάρχει ένας μέγιστος αριθμός ζωνών. Για παράδειγμα στην αναλογία 1,5:1, το μέγιστο όριο ζωνών για διακριτοποίηση, είναι 376, αλλά η επίλυση μπορεί να γίνει μέχρι και για 375 ζώνες, αν και αυτός ο αριθμός μειώνεται ανάλογα με τη

κλίση και το πάχος της αργίλου. Για παράδειγμα στην περίπτωση στρώσης αργίλου κλίσης 5° , με πάχος 2,5m και συνοχή 50kN/m^2 (δύσκολη περίπτωση διακριτοποίησης της ενδιάμεσης ασθενούς στρώσης), η επίλυση δεν πραγματοποιείται για ζώνες άνω των 243 με αναλογία 1,5:1. Το μήνυμα που εμφανίζει το πρόβλημα, ορίζει πως έχει κακή γεωμετρία σε συγκεκριμένες ζώνες.

Εφόσον, γίνει η βέλτιστη διακριτοποίηση του μοντέλου, ακολουθεί η εισαγωγή των παραμέτρων που θα συμπεριληφθούν στη διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας.

Στο παράθυρο διαλόγου που ανοίγει με την επιλογή επίλυσης, *Solve*, (Εικόνα 5.9) επιλέγονται τα πλαίσια της συνοχής (cohesion), της γωνίας εσωτερικής τριβής (friction angle), η διαδικασία αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων του υλικού (στο μηδέν) και τέλος επιλέγεται η επίδραση συμπεριφοράς του υλικού με υφιστάμενη πλαστική ροή (Associated plastic flow rule), κατά την οποία το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει την γωνία διαστολής ψ , ίση με τη γωνία τριβής ϕ , του υλικού.



Εικόνα 5.9: Παράθυρο διαλόγου για την επιλογή των παραμέτρων επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας.

Με την ολοκλήρωση αυτών των σταδίων το πρόγραμμα είναι έτοιμο να επιλύσει το πρόβλημα για κάθε περίπτωση/σενάριο προσομοίωσης. Στην επόμενη ενότητα, θα παρουσιαστούν τέσσερα παραδείγματα επίλυσης μοντέλων στο πρόγραμμα FLAC/Slope.

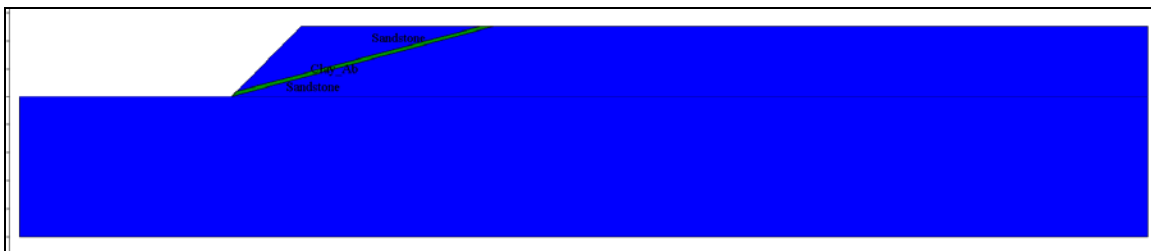
5.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ FLAC/SLOPE

Από τον Πίνακα 5.1, που παρουσιάστηκε στην πρώτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου, επιλέγονται τέσσερα σενάρια περιπτώσεων προς επίλυση με το πρόγραμμα FLAC/Slope v.6, κατά τις οποίες μεταβάλλονται οι τιμές της συνοχής και του πάχους της στρώσης αργίλου με κλίση αυτής, στις 15° .

Υπενθυμίζεται πως, στο πακέτο FLAC/Slope, η αστοχία υποδεικνύεται μέσω του γραφήματος που εξάγεται μετά το στάδιο της επίλυσης και συγκεκριμένα: η περιοχή της αστοχίας υποδεικνύεται από το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης και το μοτίβο της μετακίνησης υποδηλώνεται με τα διανύσματα της ταχύτητας.

5.3.1 1η Περίπτωση

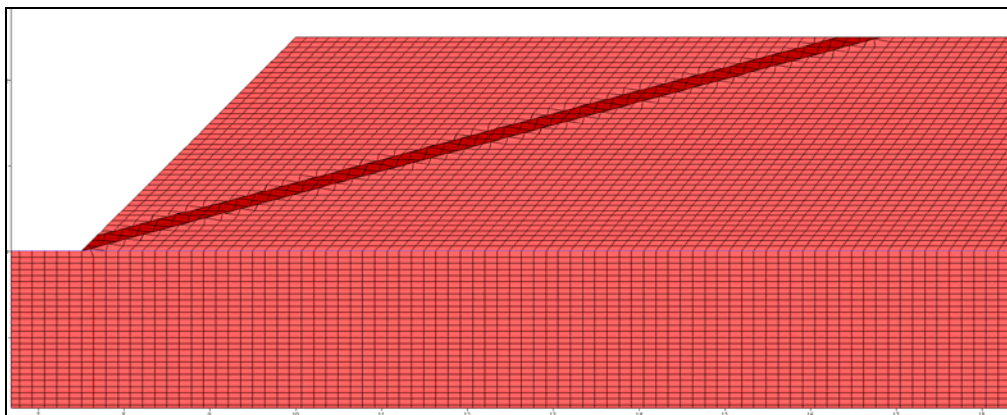
Η πρώτη περίπτωση (Εικόνα 5.10) αναφέρεται στο μοντέλο πρανούς Clay_Aa, με κλίση στρώματος αργίλου 15° , γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=24^\circ$, συνοχή $c=150\text{kN/m}^2$ και πάχος στρώσης 1,25m.



Εικόνα 5.10: Γεωμετρία πρανούς με ενδιάμεση στρώση αργίλου κλίσης 15° και πάχος στρώσης 1,25m.

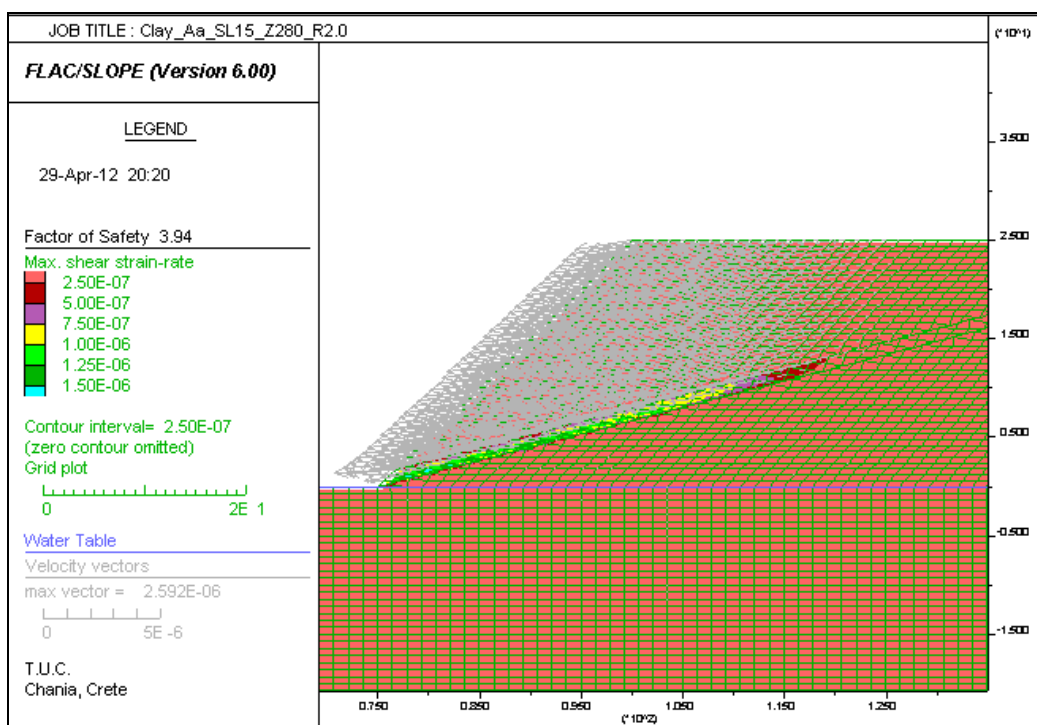
Ο αριθμός των λωρίδων ως προς τον άξονα x, που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης, είναι 280 και ο λόγος των διαστάσεων της κάθε κυψέλης του πλέγματος ως προς τον άξονα y, είναι 2:1.

Το αποτέλεσμα της διακριτοποίησης φαίνεται στην εικόνα 5.11 που ακολουθεί.



Εικόνα 5.11: Είναι εμφανής η πλήρης διακριτοποίηση της 1^{ης} περίπτωσης ενδιάμεσης αργλικής στρώσης αργίλου.

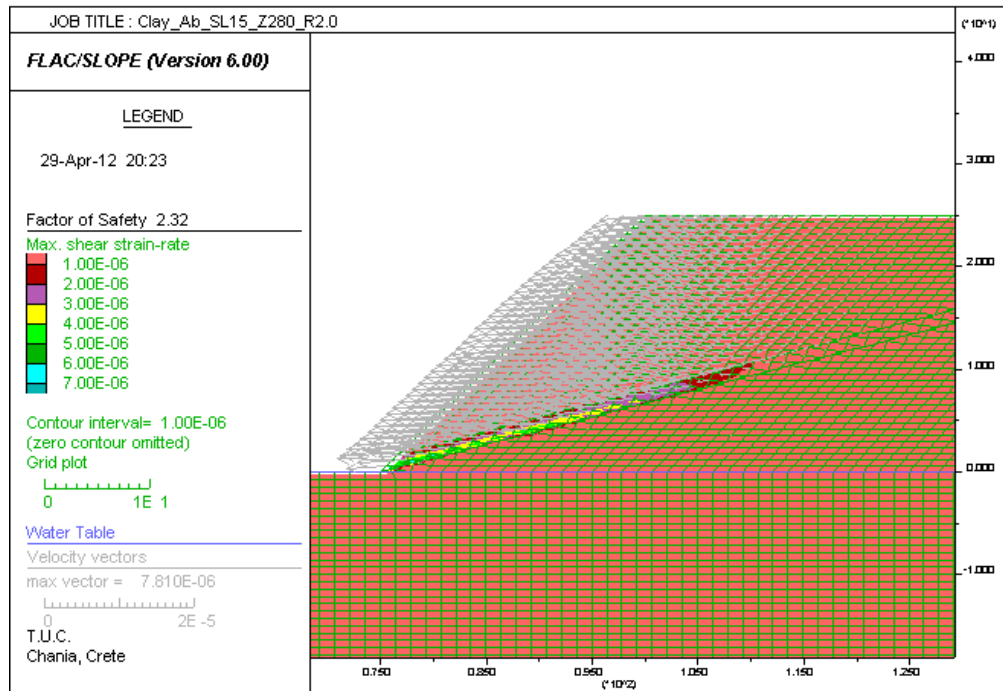
Η επίλυση της περίπτωσης δίνει τιμή για το συντελεστή ασφαλείας: $FS = 3,94$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στην μάζα της αργίλου, όπου αναμένεται να αναπτυχθεί και η επιφάνεια αστοχίας, απεικονίζεται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12: Απεικόνιση αποτελεσμάτων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας για το πρανές της 1^{ης} περίπτωσης και κατανομή των διατμητικών τάσεων μέσα στη μάζα της αργίλου.

5.3.2 2^η Περίπτωση

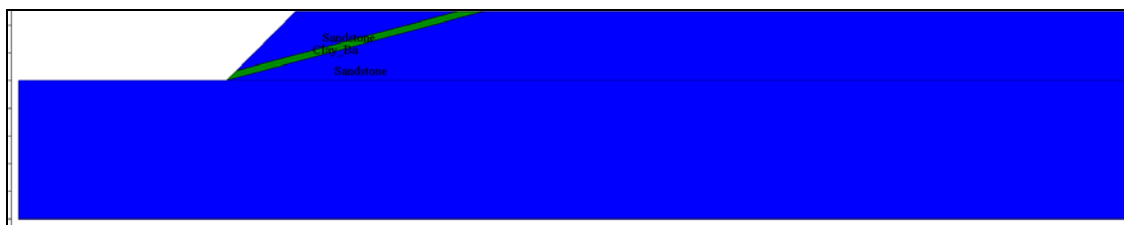
Η δεύτερη περίπτωση, είναι ίδια με την πρώτη περίπτωση, με μόνη αλλαγή στη συνοχή της αργιλικής στρώσης, η οποία μειώνεται κατά 100kN/m^2 και πλέον είναι ίση με: $c=50\text{kN/m}^2$. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν και το αποτέλεσμα της επίλυσης για το συντελεστή ασφαλείας είναι: $FS=2,32$. Ακολουθεί το γράφημα αποτελεσμάτων και κατανομής διατμητικών τάσεων στη στρώση της αργίλου (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13: Απεικόνιση αποτελεσμάτων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας για το δεδομένο μοντέλο πρανούς και της κατανομής των διατμητικών τάσεων μέσα στη μάζα της αργίλου.

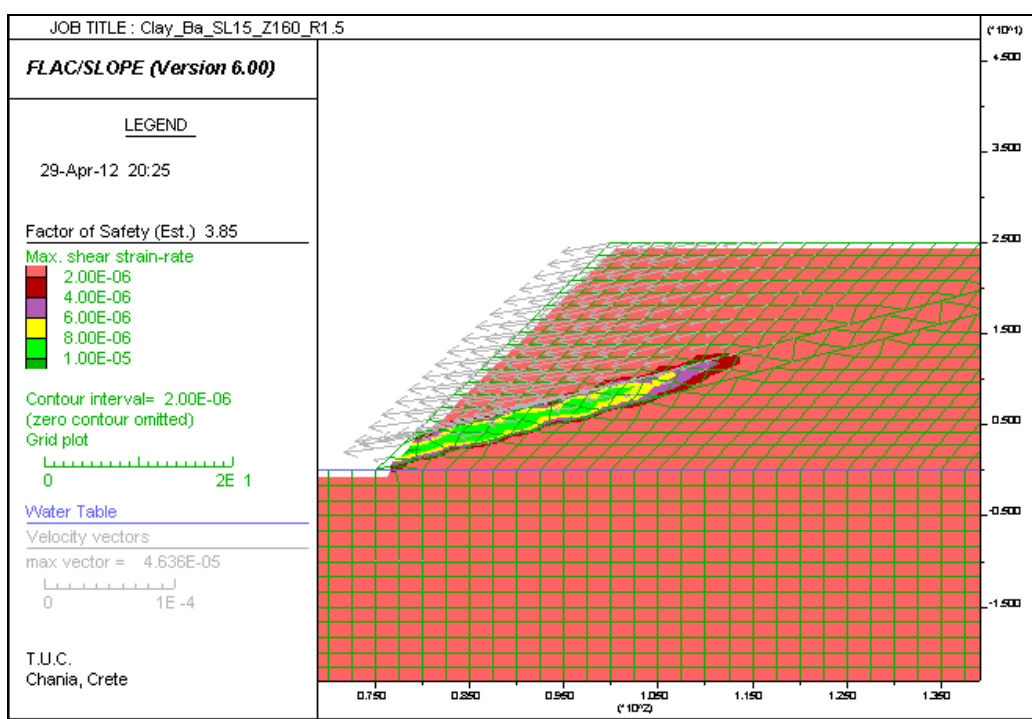
5.3.3 3^η Περίπτωση

Η 3^η και 4^η περίπτωση, αναφέρονται στην κατηγορία Clay_B (Πίνακας 5.1), όπου το πάχος της αργίλου αυξάνεται και είναι ίσο με $h=2,5\text{m}$ (Εικόνα 5.14). Η συγκεκριμένη περίπτωση ανήκει στην υποκατηγορία Clay_Ba, όπου η συνοχή της αργίλου είναι: $c=150\text{kN/m}^2$. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά παραμένουν ίδια, δηλαδή: γωνία κλίσης στρώσεως αργίλου 15° και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=24^\circ$. Η διακριτοποίηση σε αυτή την περίπτωση έχει οριστεί σε αριθμό ζωνών 160 με αναλογία διαστάσεών τους 1,5:1.



Εικόνα 5.14: Γεωμετρία πρανούς με ενδιάμεση στρώση αργίλου κλίσης 15° και πάχος στρώσης 2,50m.

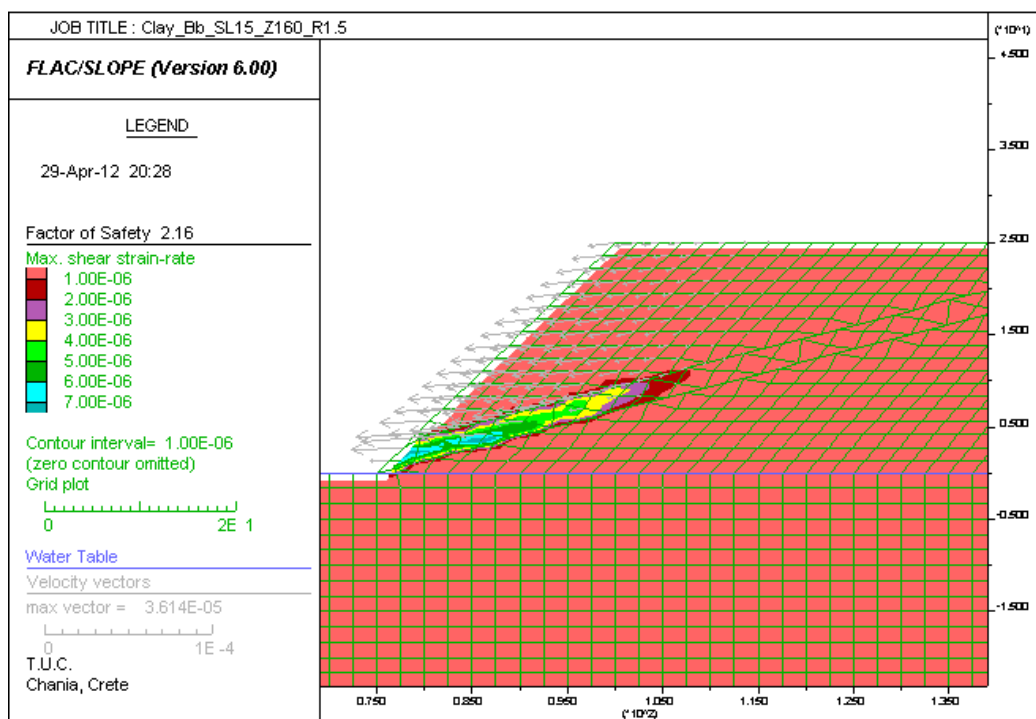
Η επίλυση δίνει συντελεστή ασφαλείας 3.85. Το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της αργλικής στρώσης, φαίνεται στην εικόνα 5.15.



Εικόνα 5.15: Αποτελέσματα υπολογισμού 3^{ης} περίπτωσης με αυξημένο πάχος αργίλου.

5.3.4 4^η Περίπτωση

Η περίπτωση αυτή, αναφέρεται στο μοντέλο πρανούς με ενδιάμεση αργλική στρώση, αντίστοιχων χαρακτηριστικών της προηγούμενης περίπτωσης, με μόνη διαφορά τη συνοχή της αργίλου, η οποία είναι: $c=50\text{kN/m}^2$. Ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση ισούται με $FS=2.16$. Στην εικόνα 5.16 απεικονίζεται το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της αργίλου.



Εικόνα 5.16: Αποτελέσματα υπολογισμού 4^{ης} περίπτωσης με αυξημένο πάχος αργίλου και μειωμένη συνοχή αυτής..

Τα αποτελέσματα αυτών των τεσσάρων περιπτώσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.3, προς σύγκριση και επεξήγηση.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης για τις 4 περιπτώσεις.

(α/α) Περίπτωση	Κατηγορία Υλικού	Συνοχή c (kN/m ²)	Πάχος στρώσης (m)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1η	Clay_Aa	150	1,25	3,94
2η	Clay_Ab	50	1,25	2,32
3η	Clay_Ba	150	2,50	3,85
4η	Clay_Bb	50	2,50	2,16

Από τα αποτελέσματα, παρατηρείται πως για τις περιπτώσεις που η στρώση αργίλου έχει την ίδια συνοχή, αλλά διαφορετικό πάχος, ο συντελεστής ασφαλείας FS, είναι μικρότερος στην περίπτωση που το πάχος της αργιλικής στρώσης αυξάνεται. Αυτό εξηγείται, από το γεγονός, ότι αυξάνει το πάχος της ασθενούς στρώσης του πρσανούς, μεγαλώνει και η πιθανότητα αστοχίας του.

5.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στον Πίνακα 5.4, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς και των 24 περιπτώσεων παραμετρικής διερεύνησης. Η διαδικασία που ακολουθείται σε όλες τις περιπτώσεις, είναι ίδια με αυτή των περιπτώσεων που προαναφέρθηκαν. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα γραφήματα κατανομής διατμητικών τάσεων για κάθε περίπτωση προσομοίωσης, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή ασφάλειας των προσομοιωμένων μοντέλων εδαφικών πρανών, όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC/Slope.

α/α Επίλυσης	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	Συντελεστής Ασφάλειας FLAC/Slope
1	1,25	150	5	6,59
2	1,25	150	10	4,94
3	1,25	150	15	3,94
4	1,25	150	20	3,49
5	1,25	150	25	3,43
6	1,25	150	30	3,68
7	1,25	50	5	4,34
8	1,25	50	10	3,17
9	1,25	50	15	2,32
10	1,25	50	20	1,93
11	1,25	50	25	1,77
12	1,25	50	30	1,74
13	2,50	150	5	6,10
14	2,50	150	10	4,27
15	2,50	150	15	3,85
16	2,50	150	20	3,36
17	2,50	150	25	3,41
18	2,50	150	30	3,67
19	2,50	50	5	3,24
20	2,50	50	10	2,42
21	2,50	50	15	2,16
22	2,50	50	20	1,82
23	2,50	50	25	1,71
24	2,50	50	30	1,69

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ FS

Στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα παραμετρική ανάλυση, καθώς και τα αποτελέσματα υπολογισμών από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, τα οποία ανακτήθηκαν αυτούσια από την Καλογήρου (2003).

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επίλυσης του συντελεστή ασφαλείας F.S., με το FLAC/Slope, το Plaxis και την ισορροπία δυνάμεων.

α/α Επίλυσης	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	Συντελεστής Ασφαλείας F.S.		
				FLAC/Slope	Plaxis	M.O.I.
1	1,25	150	5	6,59	6,74	12,60
2	1,25	150	10	4,94	5,04	6,77
3	1,25	150	15	3,94	3,98	4,95
4	1,25	150	20	3,49	3,50	4,19
5	1,25	150	25	3,43	3,38	3,97
6	1,25	150	30	3,68	3,73	4,22
7	1,25	50	5	4,34	7,25	7,59
8	1,25	50	10	3,17	3,33	3,94
9	1,25	50	15	2,32	2,42	2,76
10	1,25	50	20	1,93	1,93	2,21
11	1,25	50	25	1,77	1,78	1,96
12	1,25	50	30	1,74	1,73	1,92
13	2,50	150	5	6,10	6,01	12,91
14	2,50	150	10	4,27	4,14	6,96
15	2,50	150	15	3,85	3,70	5,12
16	2,50	150	20	3,36	3,26	4,38
17	2,50	150	25	3,41	3,38	4,21
18	2,50	150	30	3,67	3,65	4,61
19	2,50	50	5	3,24	3,42	7,70
20	2,50	50	10	2,42	2,67	4,00
21	2,50	50	15	2,16	2,16	2,82
22	2,50	50	20	1,82	1,84	2,28
23	2,50	50	25	1,71	1,73	2,04
24	2,50	50	30	1,69	1,70	2,05

Πρέπει να σημειωθεί, πως από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και οριακής ισορροπίας, που εισήχθησαν προς σύγκριση με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, ανακτήθηκαν αυτούσια από την εργασία Καλογήρου, 2003.

Τα αποτελέσματα από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αντιστοιχούν στην επιπέδωση (stable) της καμπύλης των τιμών του συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τη μετατόπιση. Τα αποτελέσματα από τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας που επιλέχθηκαν προς σύγκριση, αφορούν τις επιλύσεις που έγιναν, με επιλεγμένη επιφάνεια ολίσθησης το μέσον της αργιλικής στρώσης (το οποίο προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα).

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.5 φαίνεται πως και οι τρεις μέθοδοι παρέχουν ταύτιση τιμών κυρίως για τις μεγάλες κλίσεις του στρώματος αργίλου, από 20° έως 30°, με απόκλιση τιμών κάτω της μισής μονάδας. Μόνο σε μία περίπτωση η διαφορά μεταξύ των αριθμητικών επιλύσεων με την οριακή ισορροπία, υπερβαίνει την μονάδα και αφορά την επίλυση του σεναρίου, όπου το πάχος της αργιλικής στρώσης είναι 2,5m και η συνοχή της 150kN/m². Στις υπόλοιπες περιπτώσεις κλίσεων ως προς την οριζόντιο της αργιλικής στρώσης, η απόκλιση των τιμών αυξάνεται και σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνά την μονάδα κατά πολύ. Αναλυτικά, τα συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι επιλύσεις που προέκυψαν μέσω του FLAC/Slope εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το Plaxis, φαίνεται να έχουν πολύ καλή ταύτιση σε όλες τις περιπτώσεις, με απόκλιση τιμών μικρότερης του 0,3 εκτός από μία περίπτωση που η διαφορά υπερβαίνει τις δύο μονάδες.

Αυτή η περίπτωση, αφορά τη στρώση αργίλου με κλίση 5°, πάχους 1,25m και συνοχή $c=50\text{kN/m}^2$. Η διαφορά δεν έχει κάποιο προφανή λόγο, ούτε έγκειται στη διακριτοποίηση, λόγω του μεγέθους της διαφοράς. Σε σύγκριση όμως των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν από το πρόγραμμα Plaxis για τη συγκεκριμένη κλίση της αργίλου, με αυτούς από τη Μ.Ο.Ι., εξάγεται το συμπέρασμα πως για τα δύο πάχη και αντοχές της αργίλου, ο συντελεστής ασφαλείας από τη Μ.Ο.Ι. είναι σχεδόν διπλάσιος από τον αντίστοιχο του Plaxis (που αυτό ισχύει και για το FLAC/Slope), εκτός όμως από αυτή την περίπτωση. Επομένως, βάσει του ότι τα υπόλοιπα αποτελέσματα σχεδόν

ταυτίζονται, ίσως αυτή η απόκλιση να οφείλεται σε κάποια λανθασμένη εισαγωγή δεδομένου ή παραμέτρου επίλυσης, στο Plaxis.

5.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιείται επίλυση ενός πιο σύνθετου προτύπου, το οποίο σχεδιάστηκε με βάση το αρχικό πρότυπο. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ένα νέο πρότυπο ίδιας γεωμετρίας με το αντίστοιχο αρχικό πρότυπο που διερευνήθηκε στις προηγούμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου, αλλά με τρεις λεπτές στρώσεις αργίλου παράλληλες μεταξύ τους, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ κλίση στρώσεων αργίλου: 5°
- ✓ πάχος κάθε στρώσης αργίλου: 1,25m

Οι υπόλοιπες ιδιότητες των υλικών που αποτελούν το πρότυπο είναι οι ίδιες με του αρχικού μοντέλου διερεύνησης (βλέπε Πίνακα 5.2).

Για το σύνθετο μοντέλο προσομοίωσης, θα διερευνηθούν δύο περιπτώσεις οι οποίες αφορούν τα μοντέλα Clay_Aa και Clay_Ab, στα οποία μεταβάλλεται η συνοχή των αργιλικών στρώσεων, (τιμές 150kN/m^2 και 50kN/m^2 αντίστοιχα).

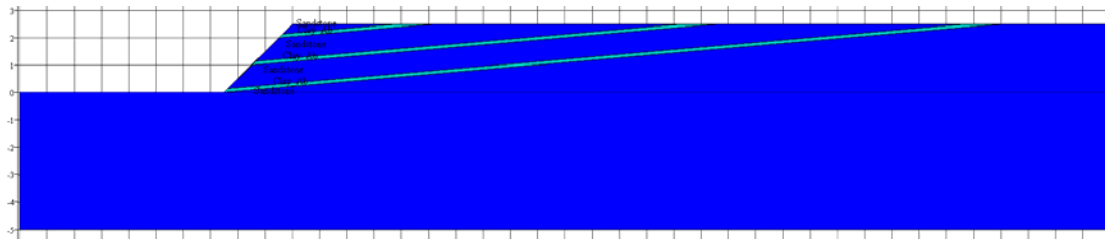
Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι επιλύσεις του σύνθετου προτύπου και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα μοντέλα Clay_Aa και Clay_Ab της παραμετρικής ανάλυσης, που πραγματοποιήθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, τα οποία αποτελούνται από μία στρώση αργίλου με κλίση αυτής στις 5° , καθώς και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από Καλογήρου (2003).

Επίσης, στη συγκεκριμένη διερεύνηση, ορίζεται υδροφόρος ορίζοντας έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στην επίλυση και η πίεση του νερού των πόρων. Η θέση του υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη παραμετρική ανάλυση. Δηλαδή, ο υδροφόρος ορίζοντας διέρχεται από τον πόδα του πρανούς, οριζόμενος στα σημεία (0,0) έως και (400,0) της γεωμετρίας του πρανούς, και το ειδικό βάρος του (*water density*) είναι ίσο με 1000kg/m^3 .

5.6.1 Εδαφικά σύνθετα πρότυπα με πολλαπλά λεπτά στρώματα αργίλου

Στην ενότητα αυτή, διερευνώνται δύο περιπτώσεις εδαφικών πρανών, στα οποία εισάγονται τρεις παράλληλες στρώσεις αργίλου.

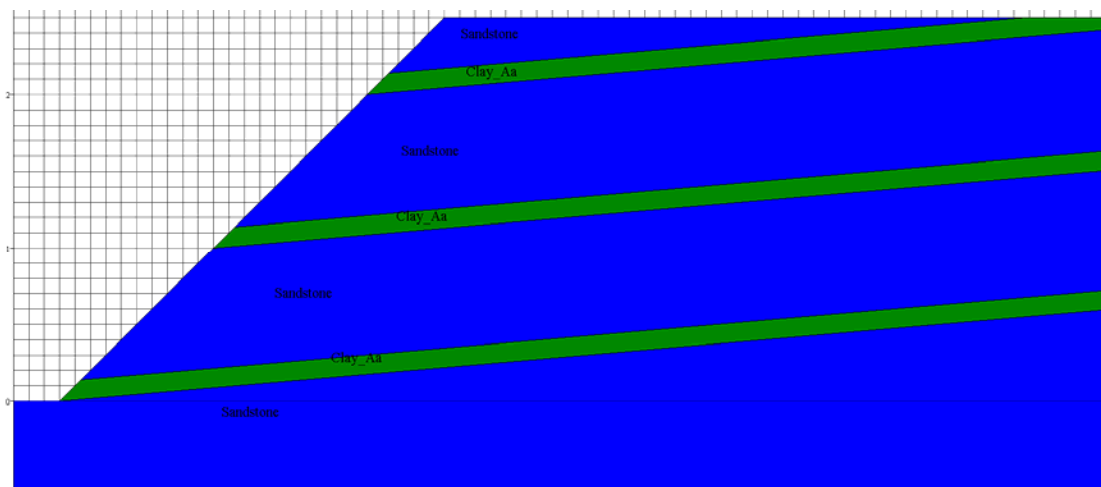
Η γεωμετρία των μοντέλων προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 5.17. Η κλίση των στρώσεων της αργίλου είναι 5° και το πάχος τους 1,25m. Οι στρώσεις έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε και σε αυτές τις περιπτώσεις το κατώτερο στρώμα της αργίλου να καταλήγει στο πόδι του πρανού.



Εικόνα 5.17: Απεικόνιση γεωμετρίας σύνθετου προτύπου διερεύνησης.

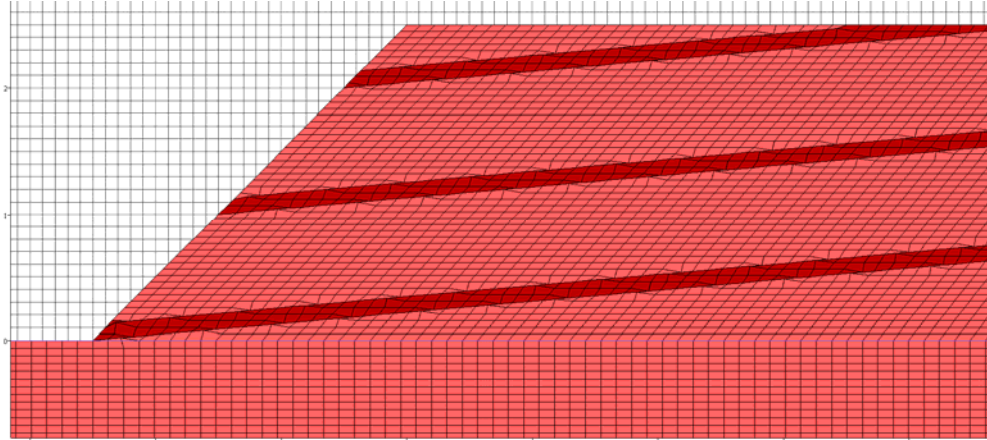
1^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στην περίπτωση του προτύπου, κατά το οποίο οι παράλληλες στρώσεις αποτελούνται από τις ιδιότητες του μοντέλου Clay_Aa (Εικόνα 5.18) με συνοχή $c=150\text{kN/m}^2$.



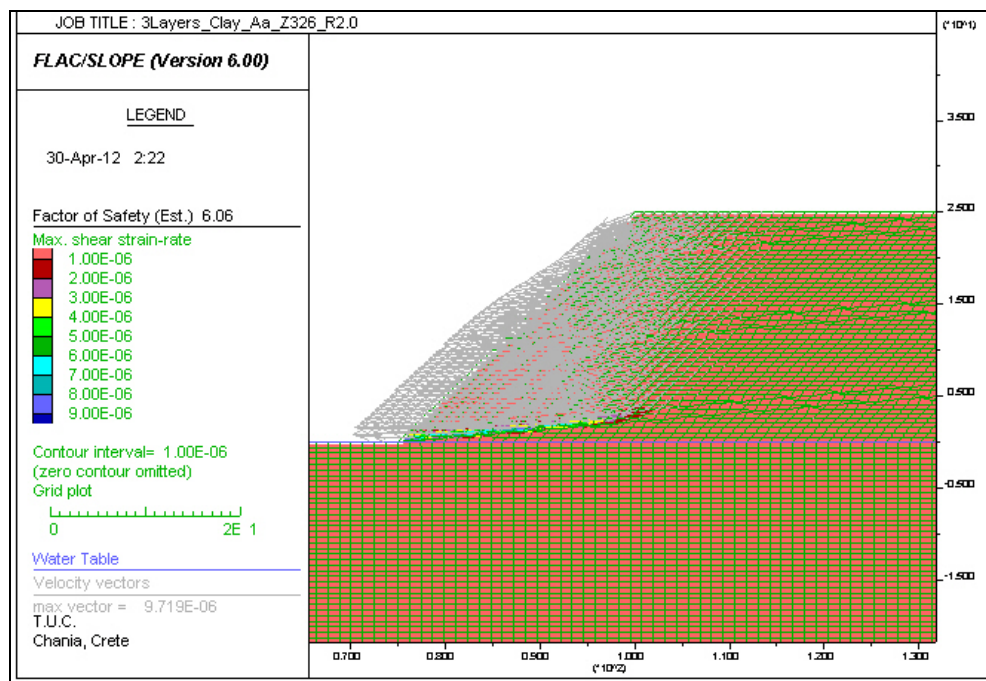
Εικόνα 5.18: Απεικόνιση διάταξης παράλληλων στρωμάτων αργίλου Clay_Aa, πάχους 1,25m και συνοχής 150kN/m^2

Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=326$ και ο λόγος των διαστάσεων τους κατά τον άξονα y , είναι 2:1 (εικόνα 5.19).



Εικόνα 5.19: Διακριτοποίηση σύνθετου προτύπου 1^{ης} περίπτωσης

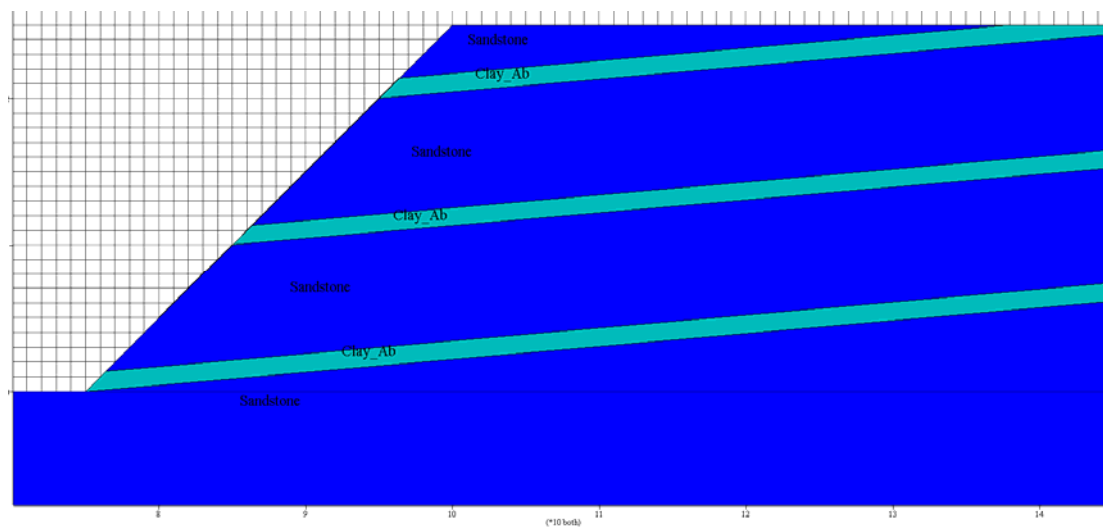
Η επίλυση αυτής της περίπτωσης δίνει συντελεστή ασφαλείας: $FS= 6,06$. Το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα των αργιλικών στρώσεων, απεικονίζεται στην εικόνα 5.20.



Εικόνα 5.20: Απεικόνιση αποτελεσμάτων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας για την πρώτη περίπτωση σύνθετου προτύπου και της κατανομής των διατμητικών τάσεων μέσα στη μάζα των παράλληλων στρώσεων της αργίλου.

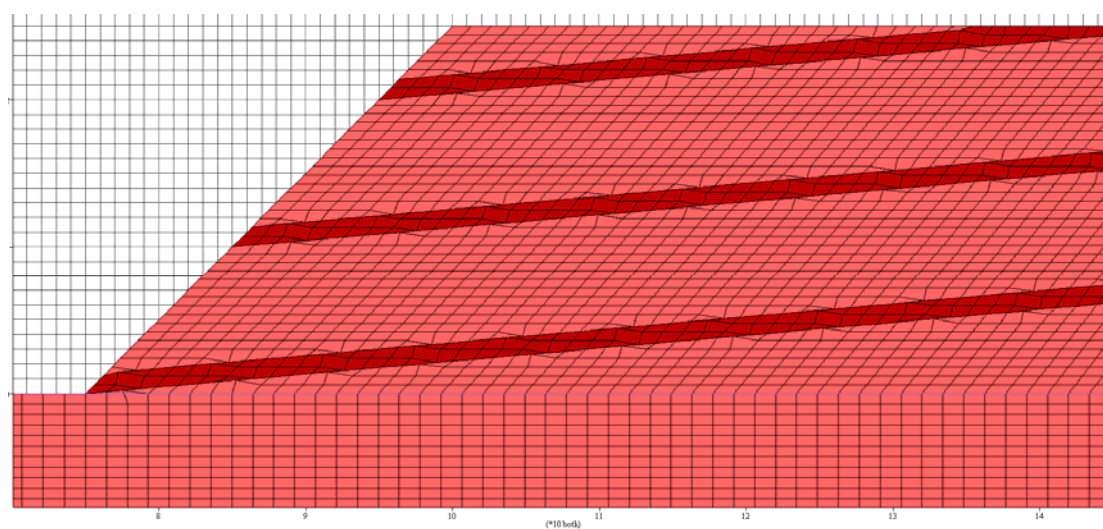
2^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Η δεύτερη περίπτωση αφορά το σύνθετο πρότυπο, κατά το οποίο οι παράλληλες στρώσεις αποτελούνται από τις ιδιότητες του μοντέλου Clay_Ab (Εικόνα 5.21) με συνοχή $c=50\text{kN/m}^2$.



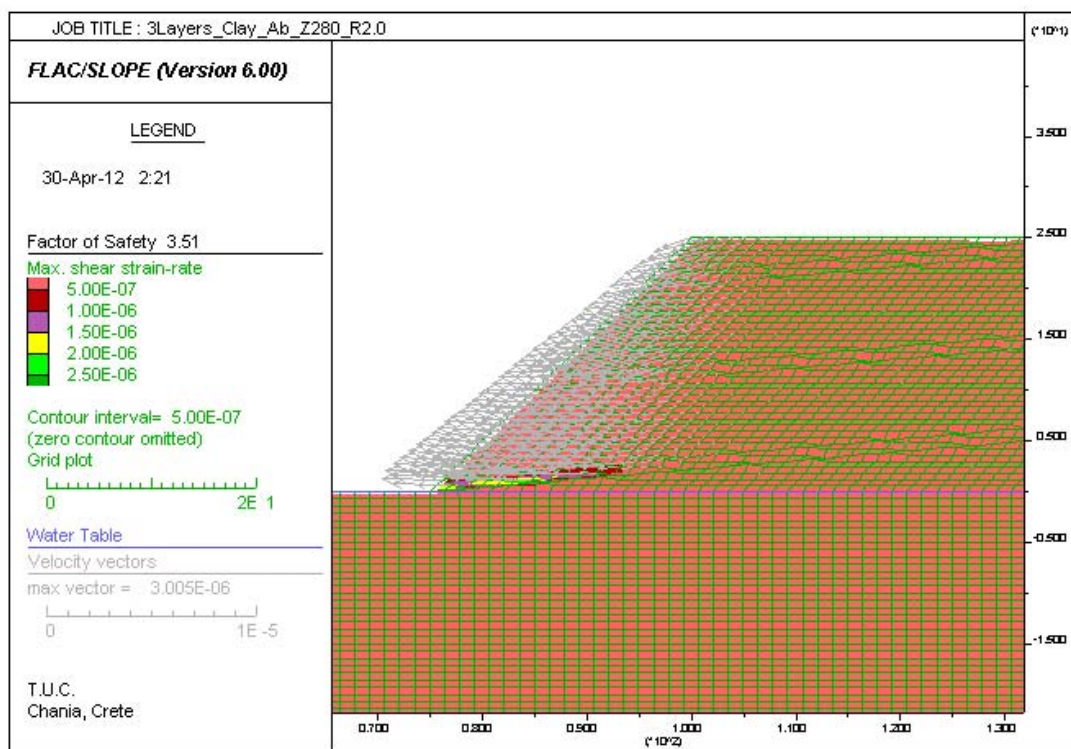
Εικόνα 5.21: Διάταξη παράλληλων στρωμάτων αργίλου Clay_Ab, πάχους 1,25m και συνοχής 50kN/m^2 .

Ο αριθμός των ζωνών που εισήχθησαν για τη διακριτοποίηση της δεύτερης περίπτωσης του σύνθετου προτύπου, είναι $Z=280$ και ο λόγος των διαστάσεων αυτών κατά y , είναι 2:1 (εικόνα 5.22).



Εικόνα 5.22: Διακριτοποίηση σύνθετου προτύπου 2^{ης} περίπτωσης.

Η επίλυση της δεύτερης περίπτωσης του σύνθετου προτύπου, δίνει συντελεστή ασφαλείας: $FS=3,51$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα των αργιλικών στρώσεων, απεικονίζεται στην εικόνα 5.23.



Εικόνα 5.23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας για τη δεύτερη περίπτωση σύνθετου προτύπου και της κατανομής των διατμητικών τάσεων μέσα στη μάζα των παράλληλων στρώσεων της αργίλου.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των επιλύσεων των δύο περιπτώσεων σύνθετου προτύπου στο πρόγραμμα FLAC/Slope, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα της αρχικής διερεύνησης με μία στρώση αργίλου στις 5° , παρατίθενται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επίλυσης σύνθετου και αρχικού προτύπου.

				Συντελεστής Ασφαλείας F.S.	
(α/α)	Μοντέλο	Συνοχή c (kN/m ²)	Πάχος στρώσης (m)	FLAC/Slope (3 στρώσεις αργίλου)	FLAC/Slope (1 στρώση)
1η	Clay_Aa	150	1.25	6.06	6.59
2η	Clay_Ab	50	1.25	3.51	4.34

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, παρουσιάζεται μείωση του συντελεστή ασφαλείας στην περίπτωση της επίλυσης με πολλαπλά στρώματα αργίλου στο εδαφικό πρανές. Μεγαλύτερη μείωση παρουσιάζεται στην περίπτωση της ασθενέστερης στρώσης αργίλου, της οποίας η συνοχή είναι 50kN/m^2 , κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς το συγκεκριμένο πρανές περιλαμβάνει επιπλέον στρώσεις μειωμένης συνοχής. Παρ' όλα αυτά, το πρανές θεωρείται ευσταθές, αφού ο συντελεστής ασφαλείας υπερβαίνει κατά πολύ τη τιμή 1,4.

Στον ακόλουθο πίνακα 5.8 παρατίθενται τα αποτελέσματα προς σύγκριση του σύνθετου μοντέλου με τις δύο αριθμητικές μεθόδους επίλυσης.

Πίνακας 5.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων επίλυσης σύνθετου προτύπου με τις δύο αριθμητικές μεθόδους.

				Συντελεστής Ασφαλείας F.S.	
(α/α)	Μοντέλο	Συνοχή c (kN/m^2)	Πάχος στρώσης (m)	FLAC/Slope (3 στρώσεις αργίλου)	Plaxis (3 στρώσεις αργίλου)
1η	Clay_Aa	150	1.25	6.06	5.568
2η	Clay_Ab	50	1.25	3.51	3.545

Από τα αποτελέσματα, διακρίνεται και πάλι η καλή ταύτιση τιμών του συντελεστή ασφαλείας στην περίπτωση του σύνθετου προτύπου, με μέγιστη απόκλιση τιμής κάτω της μισής μονάδας, για την πρώτη περίπτωση.

Ενδέχεται αυτή η απόκλιση να μην οφείλεται τόσο στο βαθμό διακριτοποίησης του προτύπου, καθώς η πύκνωση πλέγματος για την πρώτη περίπτωση, είναι η μέγιστη που επιδέχεται το πρότυπο, με αριθμό ζωνών 326 και αναλογία διαστάσεων αυτών κατά y , $R=2:1$. Ίσως να οφείλεται, είτε στα συσσωρευμένα υπολογιστικά σφάλματα της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (στρογγυλοποίησης και αποκοπής) κατά τα στάδια της επίλυσης, είτε σε κάποια από τις παραμέτρους επίλυσης (π.χ., συνηρητημένη πλαστική ροή).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ****6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 24 μοντέλων, της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Πίνακας 6.1), με την μέθοδο:

1. των Πεπερασμένων Διαφορών μέσω του προγράμματος FLAC/Slope
2. των Πεπερασμένων Στοιχείων, με το πρόγραμμα Plaxis
3. και τη μέθοδο της Οριακής Ισορροπίας, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του σφηνοειδούς τεμάχους.

Επαναλαμβάνεται, πως σε αυτή την εργασία, πραγματοποιήθηκε μόνο η διερεύνηση με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC/Slope, τα αποτελέσματα από τις άλλες δύο μεθόδους, ανακτήθηκαν αυτούσια από προγενέστερη εργασία (Καλογήρου, 2003).

Πίνακας 6.1: Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων παραμετρικής ανάλυσης.

				Συντελεστής Ασφαλείας F.S.		
α/α	Πάχος στρώματος αργίλου (m)	Συνοχή αργίλου(kN/m ²)	Κλίση στρώματος αργίλου (°)	FLAC/Slope	Plaxis	M.O.I.
1	1,25	150	5	6,59	6,74	12,60
2	1,25	150	10	4,94	5,04	6,77
3	1,25	150	15	3,94	3,98	4,95
4	1,25	150	20	3,49	3,50	4,19
5	1,25	150	25	3,43	3,38	3,97
6	1,25	150	30	3,68	3,73	4,22
7	1,25	50	5	4,34	7,25	7,59
8	1,25	50	10	3,17	3,33	3,94
9	1,25	50	15	2,32	2,42	2,76
10	1,25	50	20	1,93	1,93	2,21
11	1,25	50	25	1,77	1,78	1,96
12	1,25	50	30	1,74	1,73	1,92
13	2,50	150	5	6,10	6,01	12,91
14	2,50	150	10	4,27	4,14	6,96
15	2,50	150	15	3,85	3,70	5,12
16	2,50	150	20	3,36	3,26	4,38
17	2,50	150	25	3,41	3,38	4,21
18	2,50	150	30	3,67	3,65	4,61
19	2,50	50	5	3,24	3,42	7,70
20	2,50	50	10	2,42	2,67	4,00
21	2,50	50	15	2,16	2,16	2,82
22	2,50	50	20	1,82	1,84	2,28
23	2,50	50	25	1,71	1,73	2,04
24	2,50	50	30	1,69	1,70	2,05

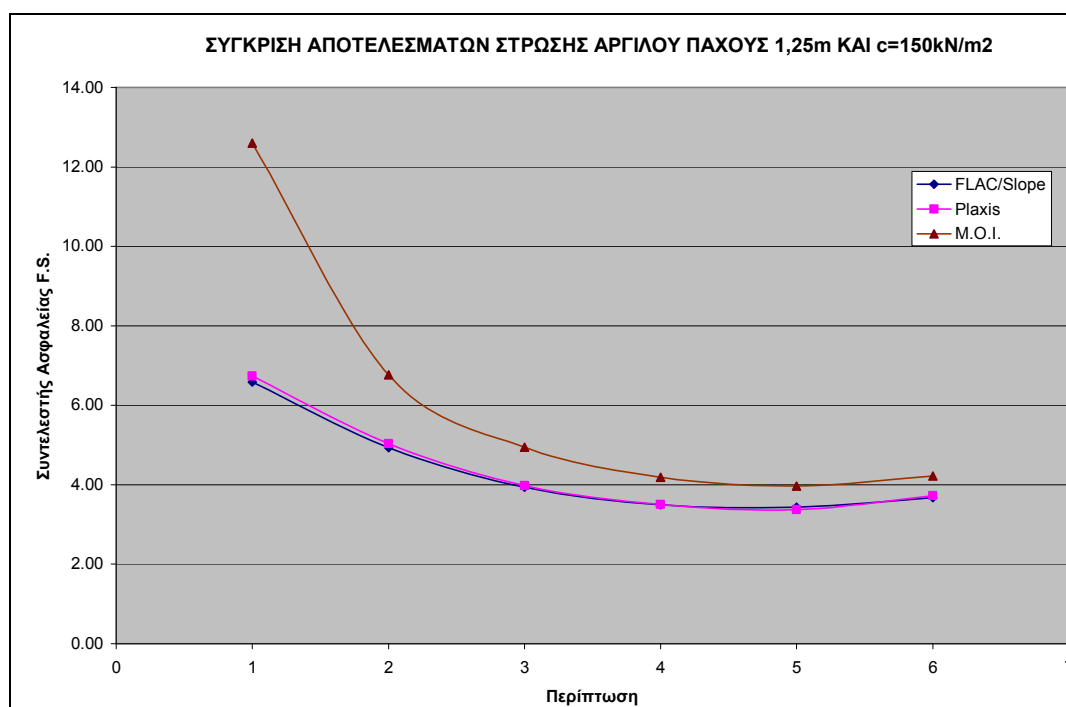
Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων διαφορών, καθώς και το πόσο καλή ταύτιση παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της, με αυτά των Πεπερασμένων στοιχείων και της Οριακής ισορροπίας.

Συγκεκριμένα:

- ✓ Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1, φαίνεται πως και οι τρεις μέθοδοι παρέχουν τιμές με καλή προσέγγιση μέχρι ταύτισης, για τις μεγάλες κλίσεις του στρώματος αργίλου, από 20° έως 30°.

- ✓ Οι επιλύσεις που προέκυψαν από το FLAC/Slope εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το Plaxis, φαίνεται να έχουν πολύ καλή ταύτιση σε όλες τις περιπτώσεις, με απόκλιση τιμών μικρότερης του 0,3 εκτός από μία περίπτωση που η διαφορά υπερβαίνει τις δύο μονάδες.

Στα σχήματα που ακολουθούν, (6.1 έως και 6.2), αναπαρίστανται οι γραφικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων ανά ομάδα μοντέλων, για πάχος αργιλικής στρώσης 1.25m.

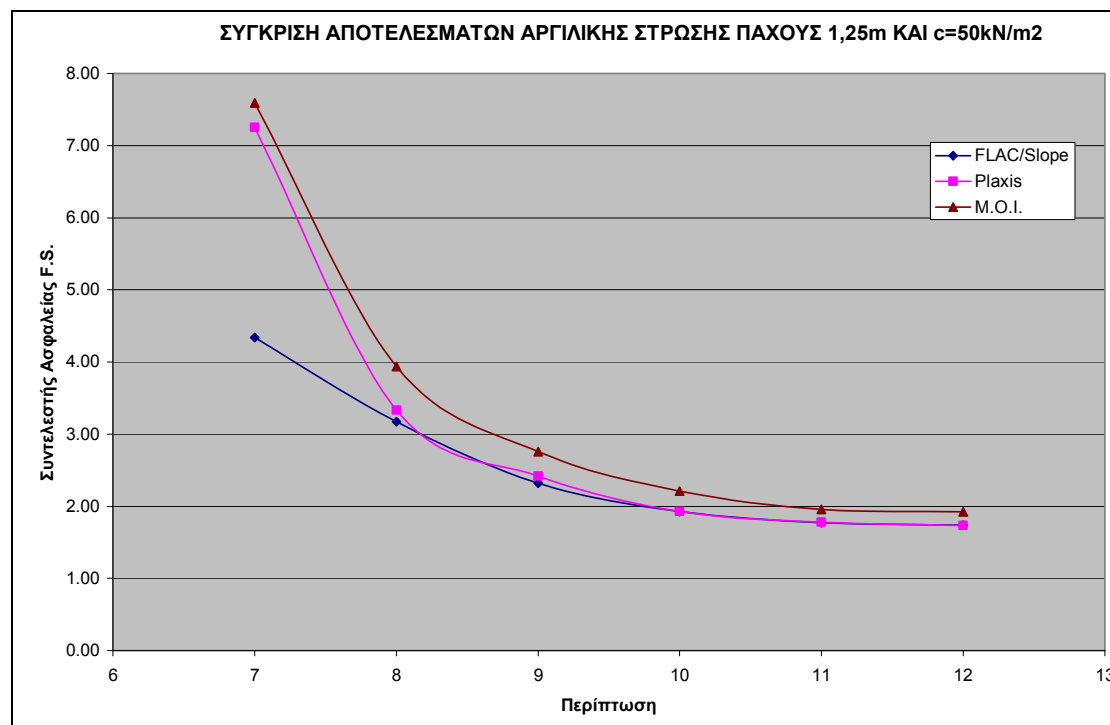


Σχήμα 6.1: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων Μ.Π.Δ. – Μ.Π.Σ. – Μ.Ο.Ι. για την ομάδα περιπτώσεων από 1 έως 6, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1.

Ειδικότερα, από το διάγραμμα του σχήματος 6.1 για τα πρώτα έξι μοντέλα προσομοίωσης, (με πάχος στρώσης αργίλου 1.25m και συνοχή αυτής 150kN/m²), φαίνεται η σχεδόν πλήρης ταύτιση αποτελεσμάτων των αριθμητικών μεθόδων. Και στις τρεις μεθόδους ο συντελεστής ασφαλείας ξεπερνά κατά πολύ την μονάδα (>3.38), επομένως τα εδαφικά πρηνή με τις συγκεκριμένες γεωτεχνικές παραμέτρους και μορφολογία, είναι σταθερά και δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας τους.

Στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 6.2), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις αργιλικής στρώσης πάχους 1.25m, και συνοχής 50kN/m². Σε αυτή την ομάδα επιλύσεων (από Νο 7 έως και Νο 12), και πάλι οι τρεις μέθοδοι δίνουν

ταυτόσημα αποτελέσματα για μεγάλες κλίσεις της αργιλικής στρώσεως. Η μεγαλύτερη διαφορά που σημειώνεται είναι για κλίση της αργίλου ίση με 5° . Σε αυτή την περίπτωση η απόκλιση της μεθόδου του FLAC/Slope, έναντι του Plaxis, ξεπερνά την μονάδα.



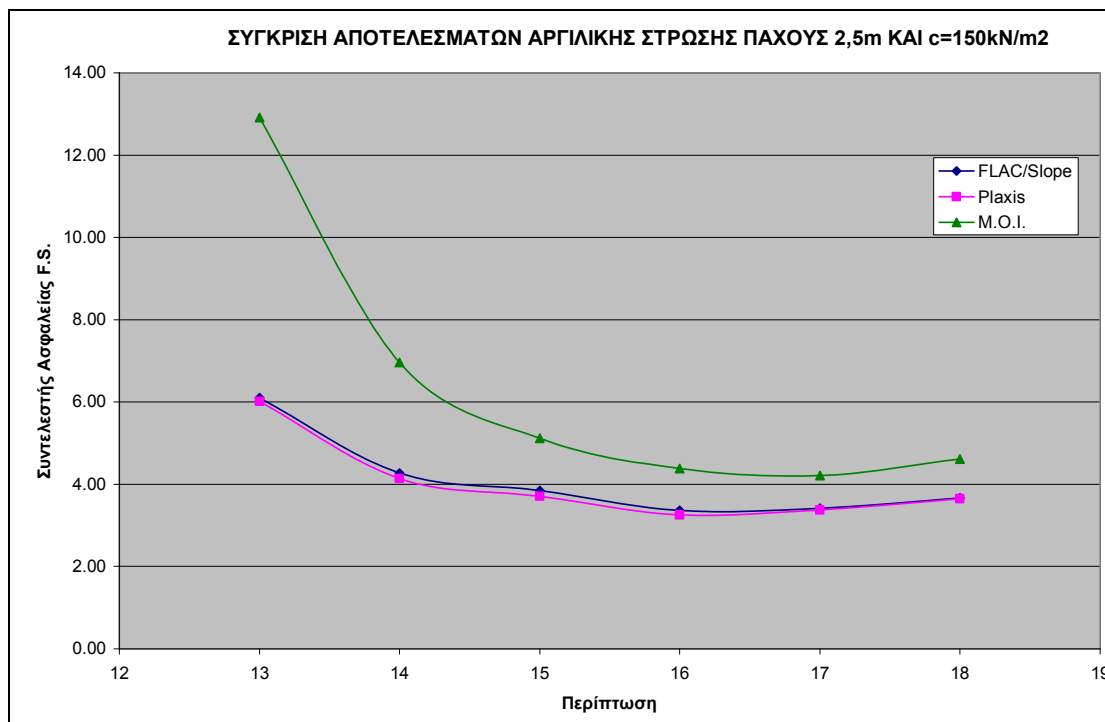
Σχήμα 6.2: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων M.Π.Δ. – M.Π.Σ. – M.O.I. για την ομάδα περιπτώσεων από 7 έως 12, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1.

Στο σχήμα 6.3, παρατίθεται το διάγραμμα σύγκρισης των μεθόδων, για την περίπτωση της αργίλου, με πάχος 2.5m και συνοχή 150kN/m^2 . Στην προκειμένη περίπτωση, διακρίνεται η σχεδόν πλήρης ταύτιση αποτελεσμάτων, όσον αφορά τις αριθμητικές μεθόδους. Η σύγκριση και των τριών μεθόδων, δείχνει πως οι αριθμητικές αναλύσεις αποκλίνουν κατά πολύ από την μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Ειδικότερα, ανά κλίση στρώματος, τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Στις μεγάλες κλίσεις του στρώματος της αργίλου 25° και 30° , η απόκλιση είναι λίγο μικρότερη της μονάδας. Όταν η γωνία κλίσης της αργιλικής στρώσης είναι 20° , η διαφορά ανέρχεται στην μονάδα και συγκεκριμένα για το Flac/Slope ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε 3.36, από το Plaxis 3.26 και από την M.O.I. 4.38.

Για κλίση της αργίλου 15° (Περίπτωση 15), η επίλυση του FLAC/Slope δίνει συντελεστή ασφαλείας 3.85, το Plaxis δίνει τιμή 3.70 και η M.O.I. δίνει τιμή 5.12.

Παρατηρείται πως η διαφορά μεταξύ των αριθμητικών μεθόδων και της Μ.Ο.Ι., ανήλθε στις 2.69 μονάδες.



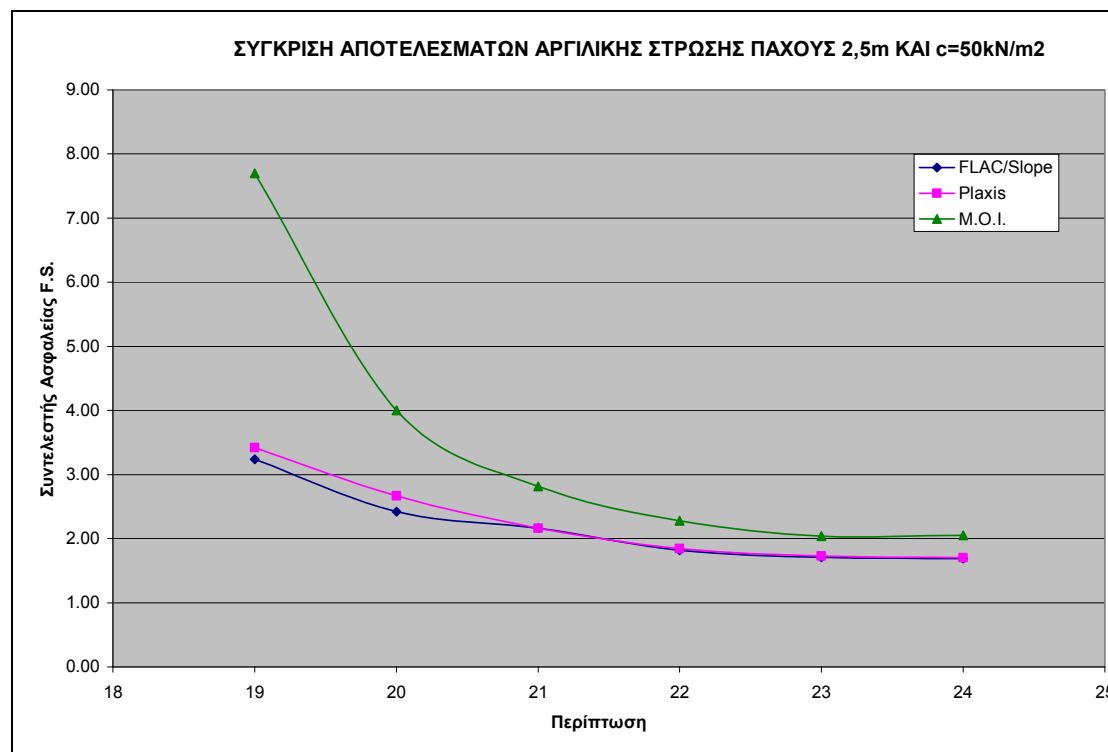
Σχήμα 6.3: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων Μ.Π.Δ. – Μ.Π.Σ. – Μ.Ο.Ι. για την ομάδα περιπτώσεων από 13 έως 18, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1.

Στην περίπτωση που η κλίση της αργιλικής στρώσης είναι 5° , η αναλυτική μέθοδος έχει σχεδόν διπλάσια τιμή για το συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τις αριθμητικές, αλλά αυτό ισχύει σε όλες τις κατηγορίες στρώσης κλίσης αργίλου 5° . Αυτό συμβαίνει διότι η κλίση της αργιλικής στρώσης είναι πολύ μικρή, οπότε το μήκος της δεν εκτείνεται κοντά στο μέτωπο του πρανούς για να επηρεάσει την ευστάθειά του.

Τέλος, ακολουθεί η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της ομάδας αργίλου πάχους 2,5m και συνοχής 50kN/m^2 (Σχήμα 6.4). Σε αυτή την ομάδα επιλύσεων (No 19 έως και No 24), η σύγκριση των αποτελεσμάτων δίνει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της δεύτερης ομάδας (No 7 έως και No 12) που προαναφέρθηκε. Δηλαδή, οι τιμές των αριθμητικών μεθόδων και πάλι συγκλίνουν με μικρή διαφορά, (η μεγαλύτερη διαφορά είναι 0,25).

Σε σύγκριση με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, η απόκλιση των αποτελεσμάτων της με αυτά των αριθμητικών μεθόδων, είναι σχετικά μικρή (περίπου μισή μονάδα) για τις μεγάλες κλίσεις του στρώματος αργίλου (από 15° έως και 30°).

Στη στρώση αργίλου με κλίση 10° (Περίπτωση 20), το FLAC/Slope δίνει τιμή F.S.=2.42 και το Plaxis δίνει F.S.=2.67 (η διαφορά είναι 0,25). Σε αυτή την περίπτωση η Μ.Ο.Ι. δίνει τιμή συντελεστή ασφαλείας 4,00 (η διαφορά από το Flac/Slope στο 1.58).



Σχήμα 6.4: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων Μ.Π.Δ. – Μ.Π.Σ. – Μ.Ο.Ι. για την ομάδα περιπτώσεων από 19 έως 24, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1.

Στην περίπτωση Νο19 με κλίση στρώσης αργίλου 5° , το FLAC/Slope δίνει αποτέλεσμα F.S.=3.24 και το Plaxis δίνει F.S.=3.42 (η διαφορά είναι 0,18) και η απόκλιση αυτών από τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας είναι επίσης υψηλή. Όπως και στις προηγούμενες ομάδες για τη συγκεκριμένη κλίση στρώσης αργίλου, φτάνει τις 4.46 μονάδες.

Από τη γενική σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι:

- ✓ για τις μικρές κλίσεις της ενδιάμεσης ασθενούς αργιλικής στρώσης από 5° έως 15° (και για τις δύο τιμές συνοχής), ο συντελεστής ασφαλείας διατηρείται υψηλός και πάνω από τις δύο μονάδες.

Συνοπτικά για τις μεγάλες κλίσεις της στρώσης της αργίλου (20° , 25° και 30°), παρατηρούνται τα εξής:

- ✓ Όταν η συνοχή της αργίλου είναι 150kN/m^2 , και για τις δύο περιπτώσεις πάχους της αργιλικής στρώσης, ο συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε από τις τρεις μεθόδους ανάλυσης είναι υψηλός και άνω των τριών μονάδων και.
- ✓ Στην περίπτωση της μικρής συνοχής της αργίλου (50kN/m^2) ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος με βάση τα αποτελέσματα και των τριών μεθόδων ανάλυσης, κάτι που είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η ασθενής στρώση βρίσκεται πιο κοντά στο μέτωπο του πρανούς.
- ✓ Για τον ίδιο λόγο, παρατηρείται η γενικότερη μείωση του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε ομάδα ανάλυσης από τη μικρή κλίση των 5° τοποθέτησης της στρώσης αργίλου προς την μεγάλη κλίση των 30° .

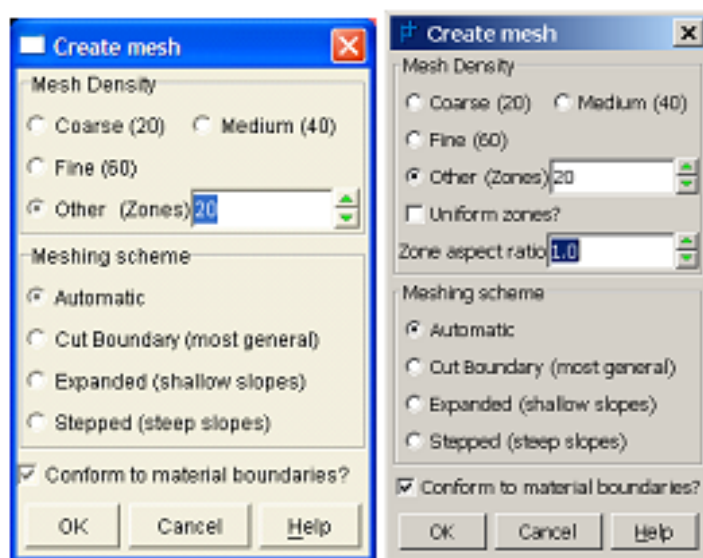
Συνολικά για όλες τις περιπτώσεις επίλυσης που πραγματοποιήθηκαν και με τις τρεις μεθόδους:

- ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση πολύ πάνω από το όριο ευστάθειας 1.0, επομένως, στο σύνολό τους και τα 24 εδαφικά πρανή, θεωρούνται ευσταθή.
- Η ταύτιση των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίστηκαν ανά μέθοδο, είναι αρκετά ικανοποιητική, αν και στην μέθοδο οριακής ισορροπίας, υπεισέρχονται πολλές παραδοχές και απλοποιήσεις, σε σχέση με τις αριθμητικές μεθόδους, στις οποίες οφείλεται η απόκλιση τιμών. Η διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των αριθμητικών μεθόδων και της οριακής ισορροπίας στην παρούσα παραμετρική ανάλυση, δεν έχει αρνητικό αντίκτυπο μιας και όλες οι περιπτώσεις που επιλύθηκαν έδωσαν υψηλή τιμή για το συντελεστή ασφαλείας, ενδέχεται όμως σε άλλη περίπτωση εφαρμογής, η διαφορά αυτή να κρίνει την ευστάθεια του πρανούς.
- Από την πλευρά του προγράμματος FLAC/Slope, οι τιμές των συντελεστών ασφάλειας που υπολογίστηκαν, σε σύγκριση με αυτές που προέκυψαν από το Plaxis, σχεδόν ταυτίζονται, παρ' όλο που το FLAC/Slope, αποτελεί μία εξειδικευμένη και αρκετά απλοποιημένη, εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

6.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΚΔΟΣΕΩΝ v.4 & v.6 ΤΟΥ FLAC/SLOPE

Η έκδοση 4 του προγράμματος FLAC/Slope, αποτελεί την πιο απλή έκδοση του προγράμματος ευστάθειας πρανών στο συγκεκριμένο κώδικα πεπερασμένων διαφορών, στο οποίο είχαν επιλυθεί αρχικά τα 24 μοντέλα της παρούσας εργασίας. Έπειτα από την τελική επίλυση των μοντέλων στην τελευταία έκδοση του λογισμικού v.6.0, οι διαφορές οι οποίες εντοπίστηκαν, μεταξύ των δύο εκδόσεων, είναι:

- ✓ Η βασικότερη διαφορά μεταξύ των εκδόσεων, είναι η βελτιστοποίηση της διακριτοποίησης ενός προτύπου, με την επιπρόσθετη επιλογή εισαγωγής αριθμού ζωνών με παράλληλη αλλαγή και στην αναλογία των διαστάσεων αυτών, κατά τον άξονα y. Με αυτό τον τρόπο, γίνεται πλέον δυνατή η βέλτιστη διακριτοποίηση προτύπων περίπλοκης γεωμετρίας. Στην εικόνα 6.1 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι διαφορές των παραθύρων διαλόγου εισαγωγής παραμέτρων διακριτοποίησης, για την εκάστοτε έκδοση του λογισμικού.



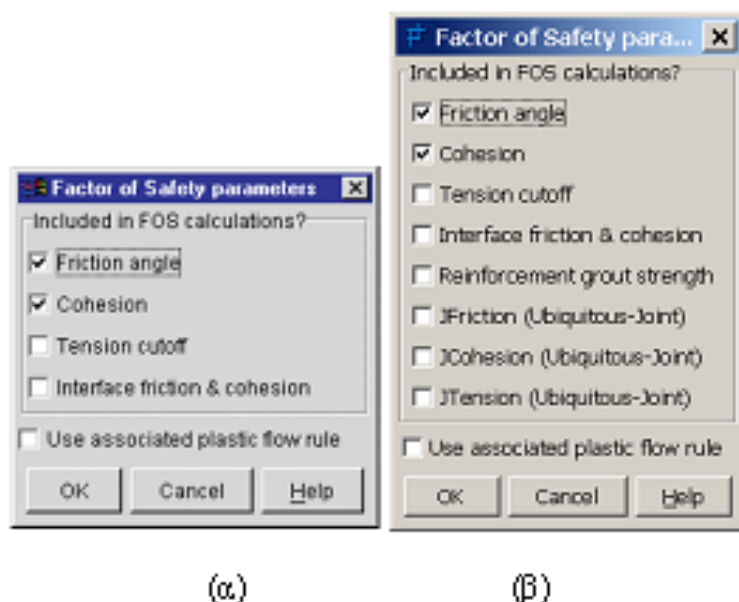
(α)

(β)

Εικόνα 6.1 Παράθυρα διαλόγου επιλογής παραμέτρων διακριτοποίησης προτύπου: (α) έκδοση 4.00 και (β) έκδοση 6.00 του προγράμματος FLAC/Slope (Itasca, 2002 & 2008).

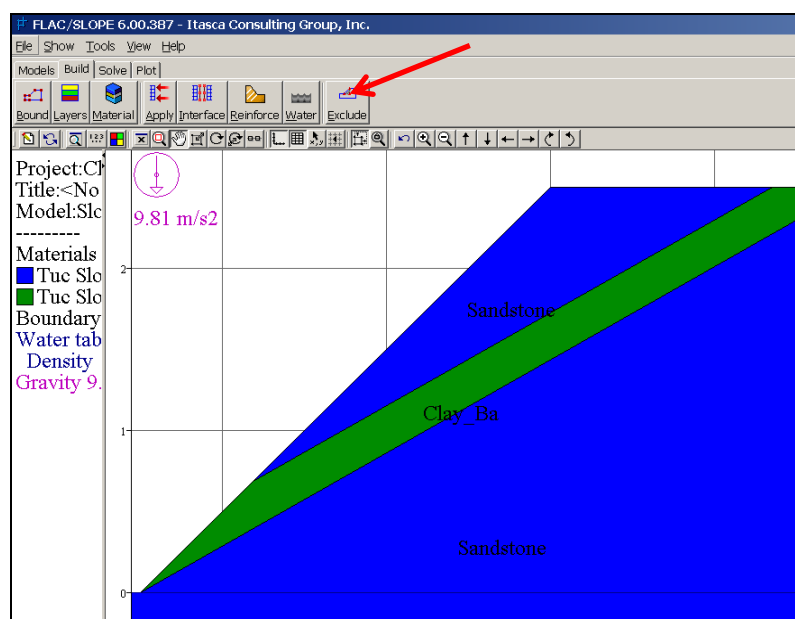
- ✓ Η επόμενη βασική διαφορά μεταξύ των δύο εκδόσεων του προγράμματος, είναι στο στάδιο εισαγωγής των παραμέτρων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας. Στην νεότερη έκδοση του FLAC/Slope v.6, ο χρήστης, έχει στη διάθεσή του περισσότερες επιλογές, για τον υπολογισμό του FS, καθώς μπορούν να

συμπεριληφθούν επιπλέον, η αντοχή των κατασκευών ενίσχυσης, καθώς στην προηγούμενη έκδοση αυτό δεν ήταν εφικτό. Η επιλογή αυτή, «φέρνει» την εν λόγω αριθμητική μέθοδο, ακόμα πιο κοντά στην προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών πεδίου.



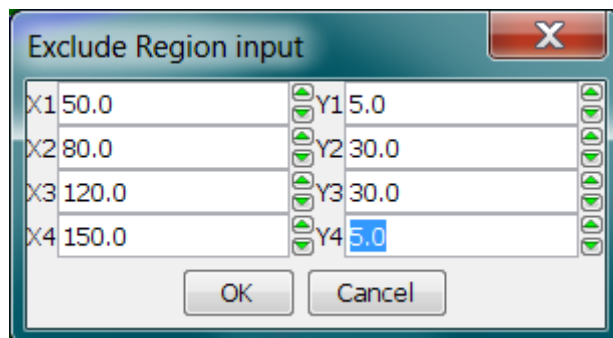
Εικόνα 6.2: Παράθυρα διαλόγου εισαγωγής παραμέτρων επίλυσης προτύπων: (α) έκδοση 4 και (β) έκδοση 6, προγράμματος FLAC/Slope.

- ✓ Στο FLAC/Slope v.6, ο χρήστης έχει την επιπρόσθετη επιλογή αποκλεισμού μιας περιοχής κατά την κατασκευή ενός μοντέλου, που ο ίδιος ορίζει με την εντολή Exclude (εικόνα 6.3).

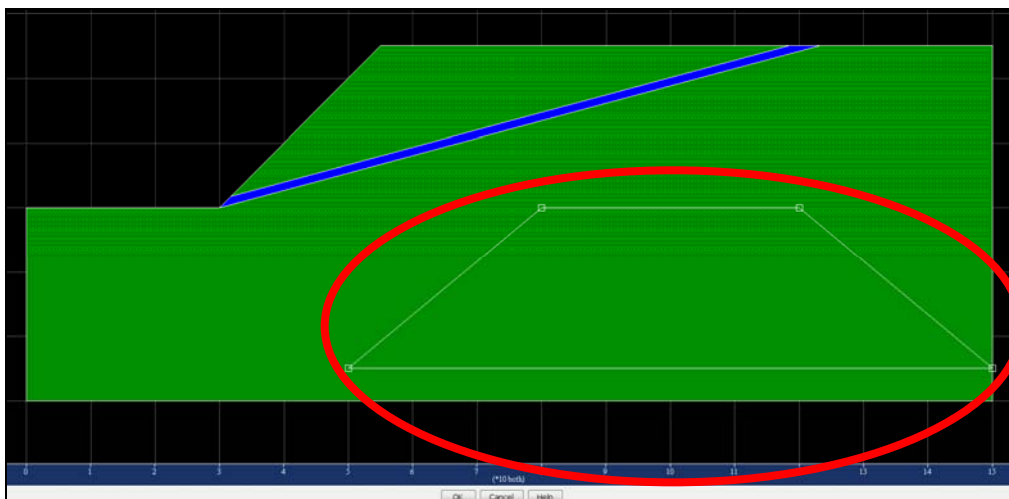


Εικόνα 6.3: Πρόσθετη εντολή «exclude» στην γραμμή εργαλείων κατασκευής των μοντέλων, στην έκδοση 6.00 του προγράμματος.

Εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου για επιλογή των σημείων της περιοχής προς εξαίρεση (εικόνες 6.4 και 6.5).

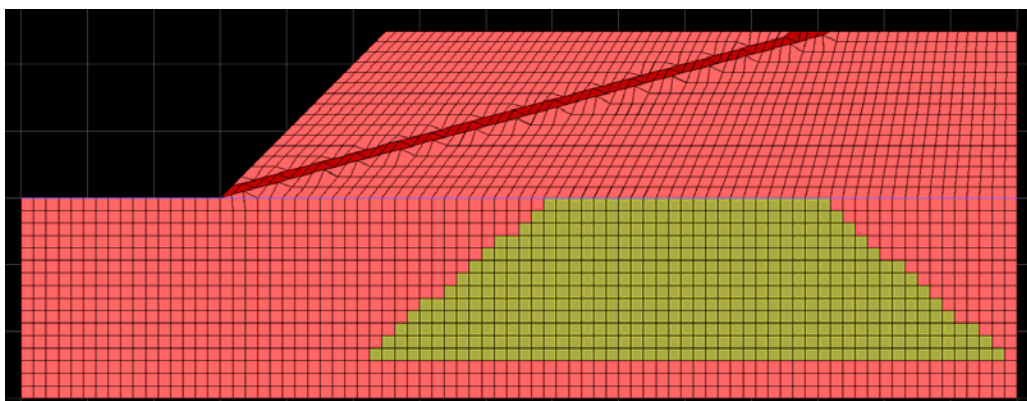


Εικόνα 6.4: Παράθυρο εισαγωγής συντεταγμένων ορισμού της περιοχής του προτύπου, προς εξαίρεση από τη διαδικασία της επίλυσης.



Εικόνα 6.5: Απεικόνιση της εξαιρούμενης περιοχής από τη διαδικασία υπολογισμού, έπειτα από την εισαγωγή των συντεταγμένων που την ορίζουν.

Στην εικόνα 6.6, παρουσιάζεται με υποκίτρινο χρώμα, η περιοχή που επιλέχθηκε προς εξαίρεση από τη διαδικασία της επίλυσης.

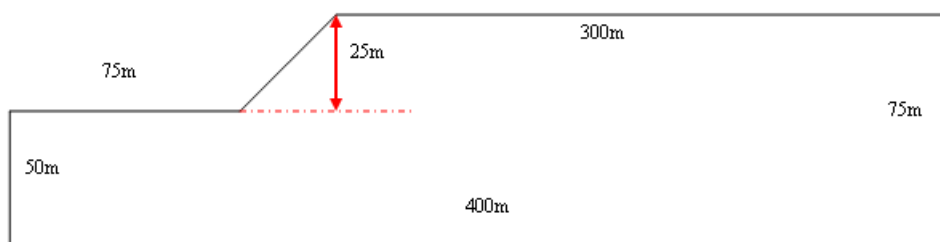


Εικόνα 6.6: Με το κίτρινο χρώμα χαρακτηρίζεται η εξαιρούμενη περιοχή από τη διαδικασία επίλυσης.

6.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ

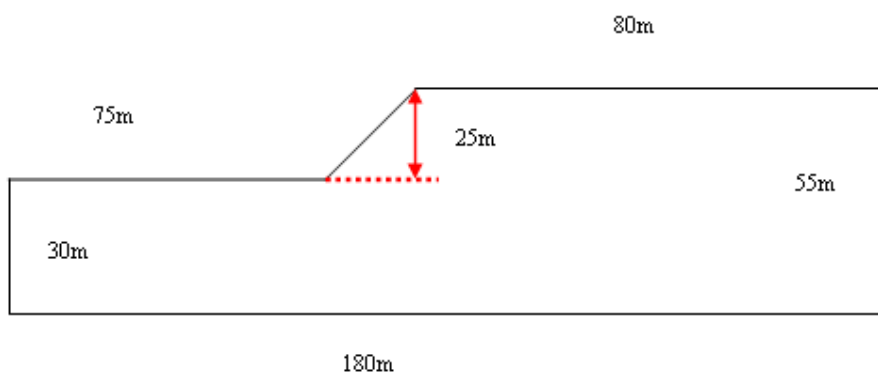
Στην συγκεκριμένη ενότητα διερευνάται η επίδραση της γεωμετρίας του αρχικού προτύπου στα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για το μοντέλο με ενδιάμεση στρώση αργίλου υπό κλίση 20° , και για τις τέσσερις περιπτώσεις (με διαφορές πάχους και συνοχής της αργλικής στρώσης) σύμφωνα με την αρχική παραμετρική ανάλυση, έτσι ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Η διερεύνηση αφορά τη διαφοροποίηση των γεωμετρικών στοιχείων του αρχικού προτύπου και ειδικότερα την μείωση των διαστάσεων της εξωτερικής γεωμετρίας του προτύπου. Τα γεωμετρικά στοιχεία της γεωμετρίας του αρχικού προτύπου, υπενθυμίζονται στο σχήμα 6.5



Σχήμα 6.5: Εξωτερικά γεωμετρικά στοιχεία πρανούς, αρχικού προτύπου.

Η νέα διερευνώμενη γεωμετρία του μοντέλου, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6: Διαφοροποιημένη εξωτερική γεωμετρία πρανούς, προς διερεύνηση.

Οι υπόλοιπες ιδιότητες υλικών του αρχικού προτύπου, παραμένουν ως έχουν (Πίνακας 6.2). Δηλαδή:

Πίνακας 6.2: Ιδιότητες υλικών αρχικού προτύπου πρανούς διερεύνησης.

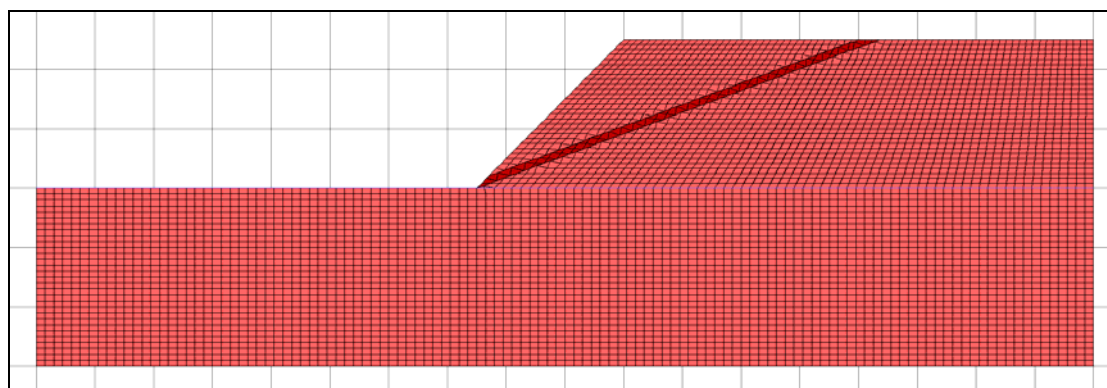
	Ψαμμίτης Ι	Αργίλος	Ψαμμίτης ΙΙ
Καταστατικό Μοντέλο	Mohr-Coulomb		
γ_{dry} (kg/m ³)	2.142	1.632	2.142
γ_{wet} (kg/m ³)	2.244	1.836	2.244
c (kN/m ²)	1.000	150 ή 50	1.000
ϕ (°)	37	24	37
Tension cutoff	NAI		
Associated plastic flow rule	NAI		

6.3.1 1^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Η πρώτη περίπτωση διερεύνησης αφορά το μοντέλο Clay_Aa, με ενδιάμεση στρώση αργίλου πάχους 1,25m και συνοχής $c=150\text{kN/m}^2$.

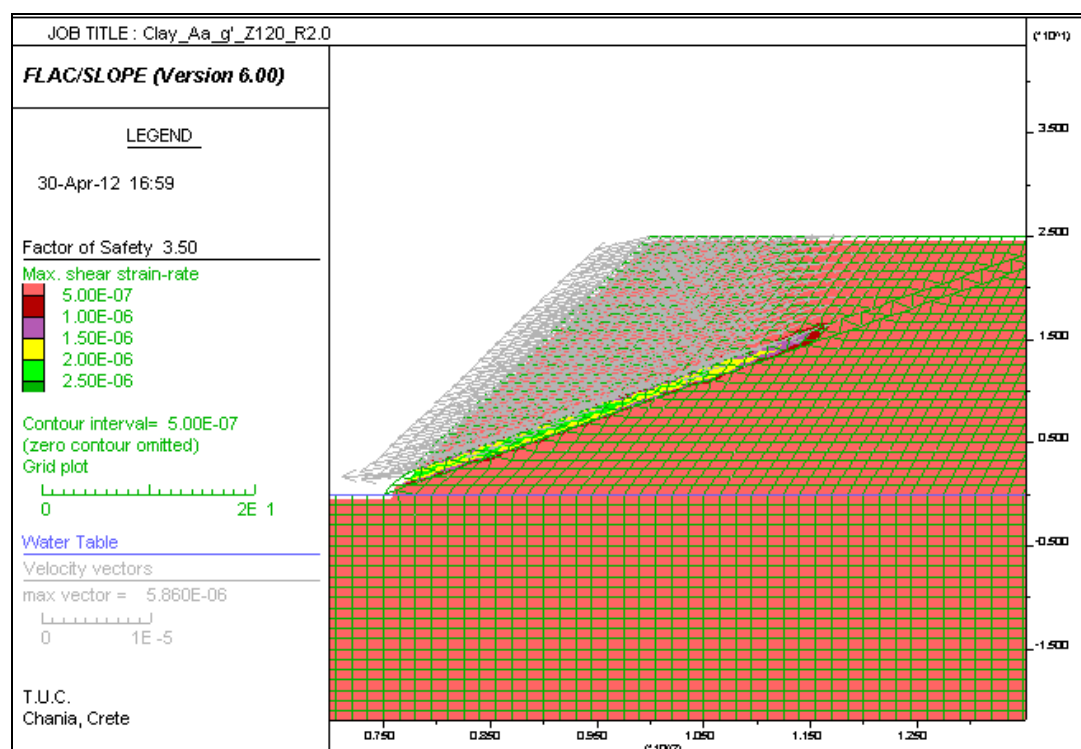
Εφόσον, η γεωμετρία του προτύπου έχει διαφοροποιηθεί και συγκεκριμένα έχει μειωθεί το μήκος έκτασης του πρανούς κατά τον άξονα x, όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται και ο αριθμός των ζωνών που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση του προτύπου. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο γίνεται η συγκεκριμένη διερεύνηση, διότι με την ελάττωση της γεωμετρίας, μειώνεται και ο βαθμός ζωνοποίησης, άρα και διακριτοποίησης του μοντέλου, έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, η διακριτοποίηση ορίστηκε σε πλήθος ζωνών κατά τον άξονα x, $Z=120$ με αναλογία διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος κατά τον άξονα y, $R=2:1$ (Εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.7: Απεικόνιση διακριτοποίησης μοντέλου Clay_Aa με μειωμένη γεωμετρία πρανούς.

Η διαδικασία της επίλυσης, δίνει ως αποτέλεσμα για το συντελεστή ασφάλειας τη τιμή 3.50 και το γράφημα της κατανομής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της στρώσης αργίλου, φαίνεται στην εικόνα 6.8.

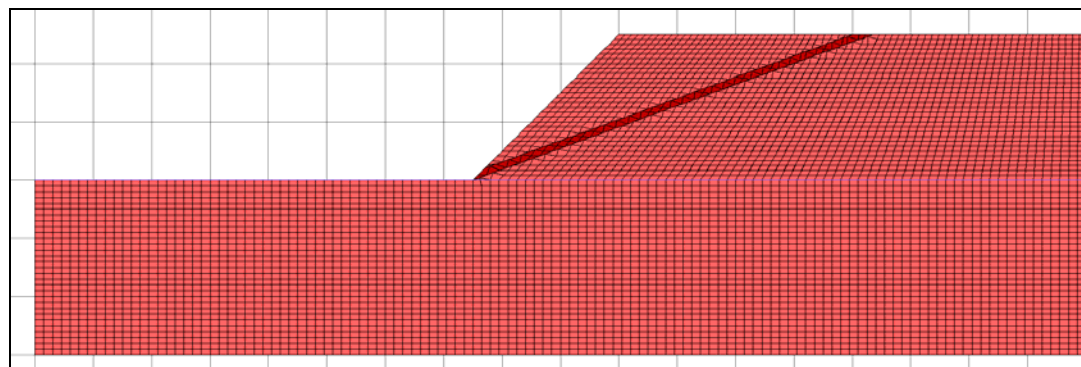


Εικόνα 6.8: Αποτελέσματα επίλυσης μοντέλου Clay_Aa με μειωμένη γεωμετρία πρανούς.

6.3.2 2^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

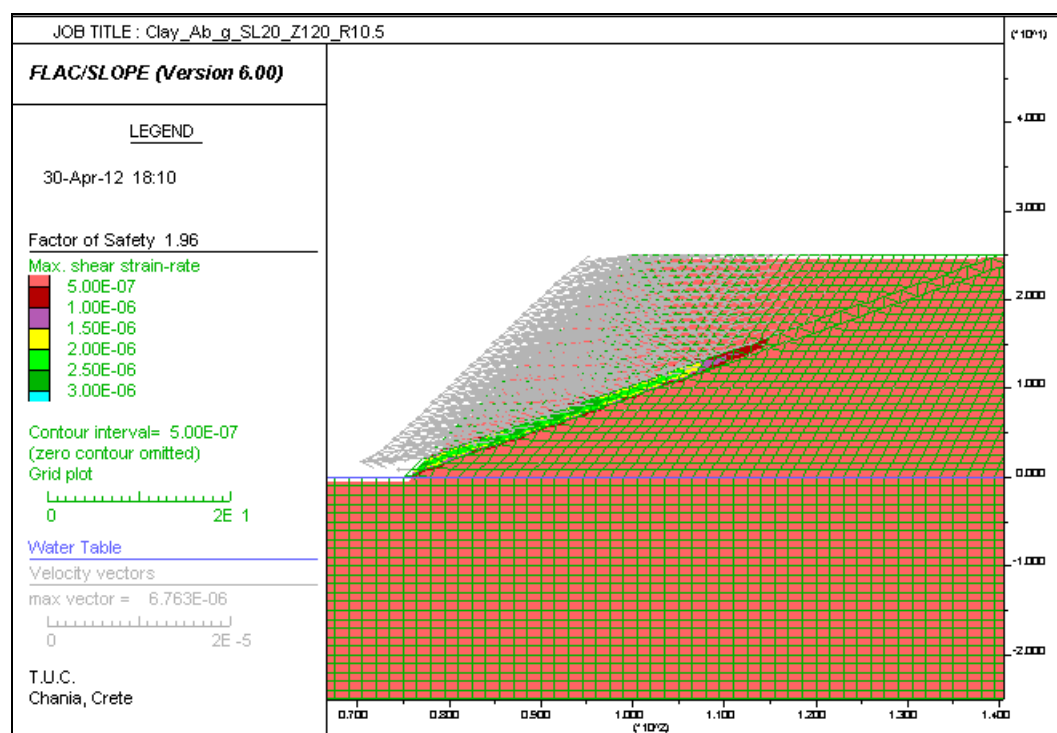
Η δεύτερη περίπτωση διερεύνησης αναφέρεται στο μοντέλο Clay_Ab, με ενδιάμεση στρώση αργίλου πάχους 1,25m και συνοχή 50kN/m².

Η διακριτοποίηση της 2^{ης} περίπτωσης, πραγματοποιήθηκε με αριθμό ζωνών Z=120 και αναλογία διαστάσεων κυψέλης R=1.5:1 (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9: Απεικόνιση διακριτοποίησης 2^{ης} περίπτωσης προτύπου μειωμένης ελαττωμένης γεωμετρίας, για ιδιότητες μοντέλου Clay_Ab.

Η επίλυση στη 2^η περίπτωση, δίνει τιμή για το συντελεστή ασφάλειας ίση με $FS=1.96$, και το γράφημα της κατανομής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της στρώσης αργίλου, φαίνεται στην εικόνα 6.10.

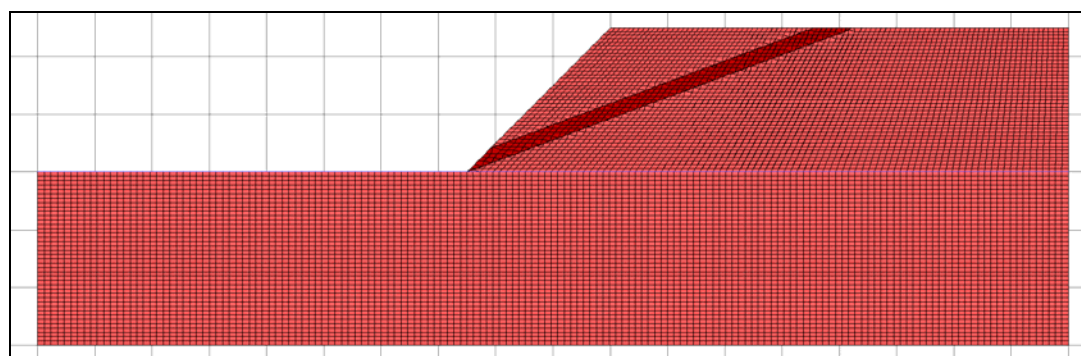


Εικόνα 6.10: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης για τη 2^η περίπτωση διερεύνησης μειωμένης γεωμετρίας πρανούς, για το μοντέλο Clay_Ab

6.3.3 3^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

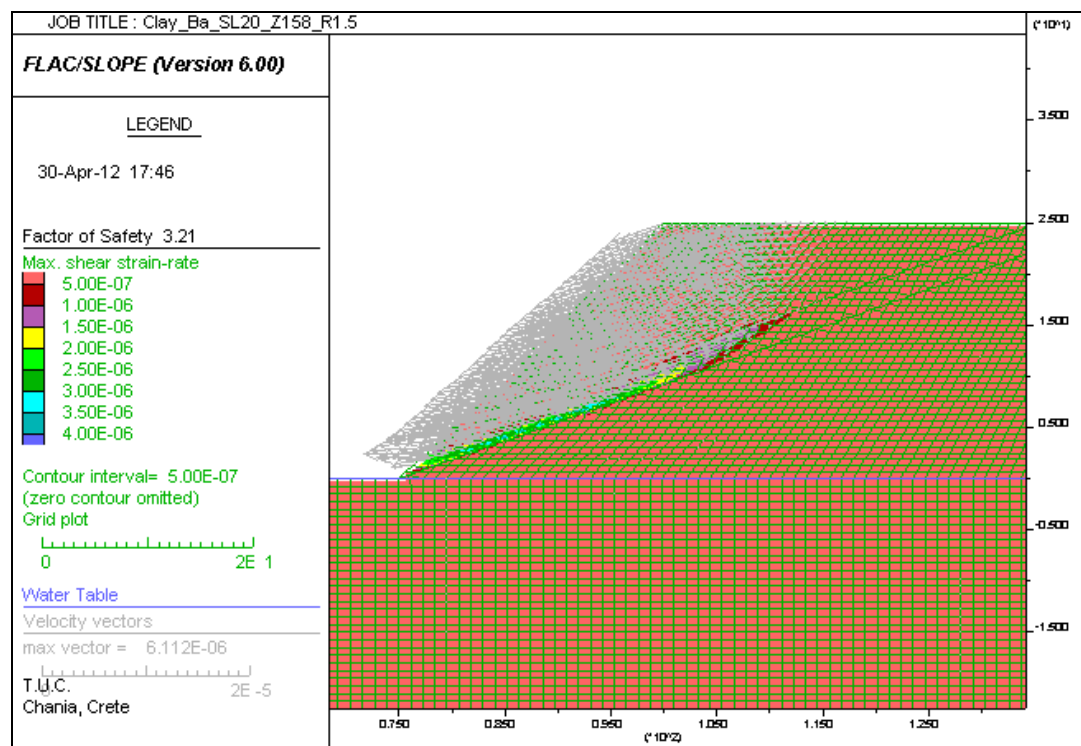
Στη τρίτη περίπτωση γίνεται διερεύνηση στο μοντέλο Clay_Ba, με ενδιάμεση στρώση αργίλου πάχους 2,50m και συνοχή 150kN/m^2 .

Η διακριτοποίηση της 3^{ης} περίπτωσης, πραγματοποιήθηκε με αριθμό ζωνών $Z=158$ και αναλογία διαστάσεων κυψέλης $R=1.5:1$ (Εικόνα 6.11).



Εικόνα 6.11: Διακριτοποίηση 3^{ης} περίπτωσης προτύπου μειωμένης ελαττωμένης γεωμετρίας, για ιδιότητες μοντέλου Clay_Ba.

Η επίλυση της 3^{ης} περίπτωσης, δίνει τιμή για το συντελεστή ασφάλειας ίση με $FS=3.21$, και το γράφημα της κατανομής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της στρώσης αργίλου, φαίνεται στην εικόνα 6.12.

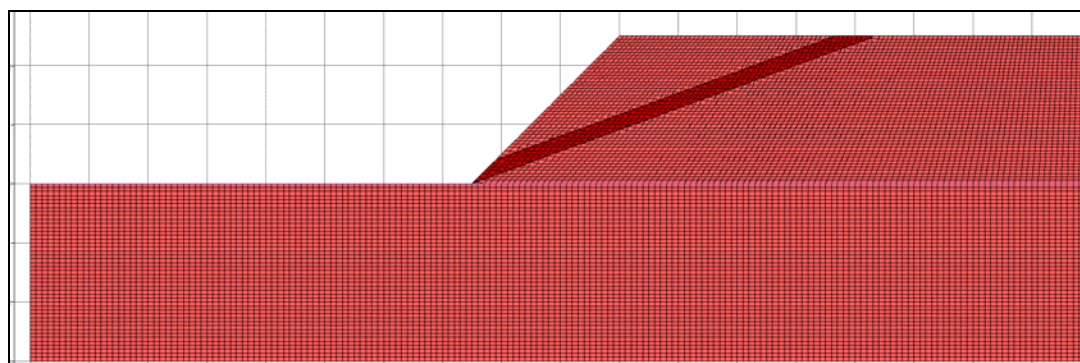


Εικόνα 6.12: Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης για τη 3^η περίπτωση διερεύνησης μειωμένης γεωμετρίας πρανούς, για το μοντέλο Clay_Ba.

6.3.4 4^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

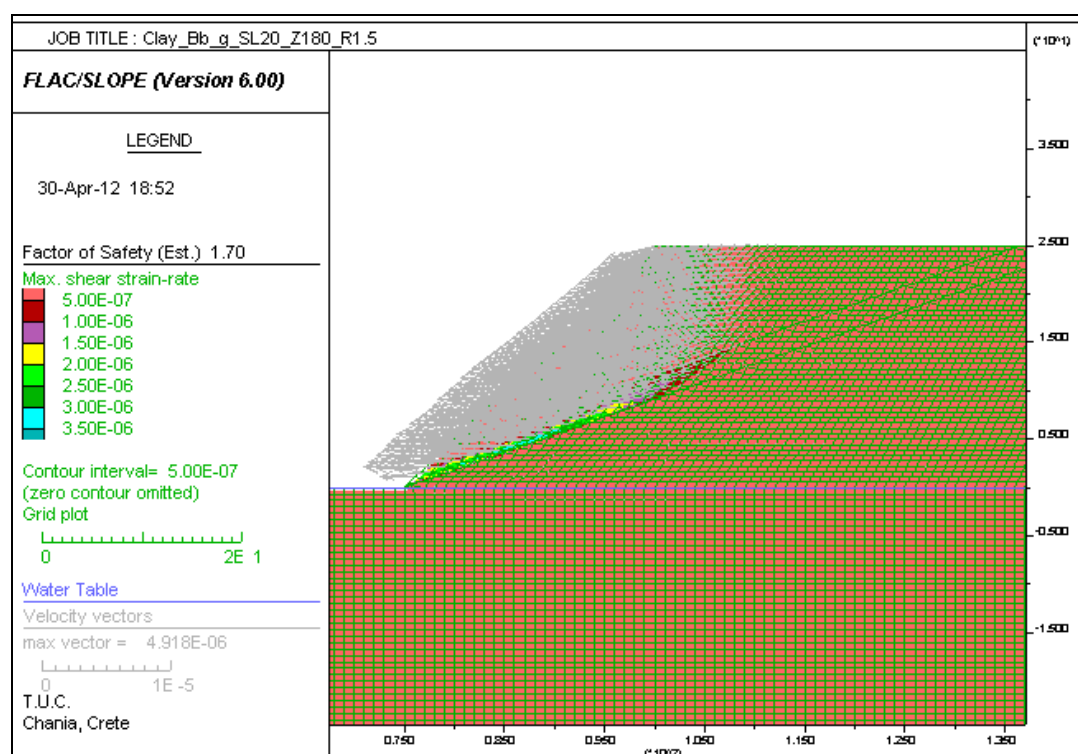
Η τέταρτη και τελευταία περίπτωση της διερεύνησης αφορά το μοντέλο Clay_Bb, με ενδιάμεση στρώση αργίλου πάχους 2,50m και συνοχή 50kN/m^2 .

Η διακριτοποίηση της 4^{ης} περίπτωσης, πραγματοποιήθηκε με αριθμό ζωνών $Z=180$ και αναλογία διαστάσεων κυψέλης πλέγματος $R=1.5:1$ (Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13: Διακριτοποίηση 4^{ης} περίπτωσης προτύπου μειωμένης ελαττωμένης γεωμετρίας, για ιδιότητες μοντέλου Clay_Bb.

Η επίλυση της 4^{ης} περίπτωσης, δίνει τιμή για το συντελεστή ασφάλειας ίση με $FS=1.70$ και το γράφημα της κατανομής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της στρώσης αργίλου, φαίνεται στην εικόνα 6.14.



Εικόνα 6.14: Απεικόνιση αποτελεσμάτων διερεύνησης για τη 4^η περίπτωση ελαττωμένης γεωμετρίας αρχικού προτύπου, για ιδιότητες μοντέλου Clay_Bb.

Στον Πίνακα 6.3 που ακολουθεί παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της διερεύνησης των προαναφερθέντων τεσσάρων περιπτώσεων, μαζί με τα αποτελέσματα της κύριας παραμετρικής ανάλυσης, της παρούσας εργασίας, και για

τις δύο αριθμητικές μεθόδους, έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 6.3: Πίνακας αποτελεσμάτων διερεύνησης μεταβολής της γεωμετρίας του πρανού προς ανάλυση και αποτελέσματα των αντίστοιχων μοντέλων της κύριας παραμετρικής ανάλυσης του αρχικού προτύπου, προς σύγκριση.

				Συντελεστής ασφαλείας FS		
(α/α) Περίπτωση	Μοντέλο	Συνοχή c (kN/m ²)	Πάχος στρώσης (m)	FLAC/Slope με διαφοροποίηση γεωμετρίας πρανού	FLAC/Slope	Plaxis
1η	Clay_Aa	150	1,25	3.5	3.49	3.5
2η	Clay_Ab	50	1,25	1.96	1.93	1.93
3η	Clay_Ba	150	2,50	3.21	3.36	3.26
4η	Clay_Bb	50	2,50	1.7	1.82	1.84

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3 και με τη σύγκριση των τιμών FS της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5, για τα αντίστοιχα μοντέλα, διαπιστώνεται πως οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας, που προκύπτουν από το πρότυπο της διαφοροποιημένης γεωμετρίας πρανού, με τις τιμές του προτύπου αρχικής γεωμετρίας, που προκύπτουν από το FLAC/Slope και το Plaxis, έχουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα, η απόκλιση κυμαίνεται από 0.01 έως 0.12 για το FLAC/Slope και από 0.00 έως 0,14 σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από το Plaxis, διαφορά η οποία είναι μικρή.

Επομένως, επιβεβαιώνεται η διαδικασία και συνιστάται, στις περιπτώσεις μεγάλου μήκους πρανού, η γεωμετρία του να ελαττώνεται, όσο αυτό είναι εφικτό, καθώς εξαρτάται από τη διάταξη των στρωμάτων του προς ανάλυση πρανού, για την επιτάχυνση της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας.

6.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ FLAC/SLOPE

Το πρόγραμμα FLAC/Slope, διαθέτει ένα ιδιαίτερα φιλικό περιβάλλον προς κάθε χρήστη και διαπιστώνεται από τα πρώτα λεπτά ενασχόλησης με αυτό. Ιδιαίτερα, η τελευταία έκδοση του με την οποία πραγματοποιήθηκε η επίλυση των μοντέλων της παρούσας εργασίας, και για την οποία γίνεται αναφορά στη συγκεκριμένη ενότητα.

- ✓ Το πρόγραμμα είναι εύκολα κατανοητό και δύναται να περιηγηθεί κάποιος σε αυτό, και χωρίς την χρήση του εγχειριδίου. Το γραφικό του περιβάλλον είναι φιλικό, απλό κι εύκολα κατανοητό, όπως και τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προς επίλυση της διαδικασίας.
- ✓ Δεν απαιτεί την εισαγωγή πολλών δεδομένων των υλικών, καθώς λόγω των καταστατικών μοντέλων που διαθέτει, η επιλογή τους, αυτόματα εισάγει τις περισσότερες σταθερές των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν το προς επίλυση μοντέλο (μέτρο μεταβολής όγκου K και το μέτρο διάτμησης G , οι οποίοι ορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα με τις τιμές 100MPa και 30MPa αντίστοιχα), ή εφαρμόζει παραδοχές, όπως στην παρούσα διερεύνηση, όπου το πρόγραμμα έχει ως παραδοχή ότι οι ελαστικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας E και λόγος Poisson ν), έχουν ασήμαντη επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας, και επομένως, αυτές οι ιδιότητες δεν απαιτούνται ως εισαγωγή.
- ✓ Αποτελεί μια ιδιαίτερα γρήγορη μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών, κι έχει πολλές δυνατότητες καθώς περιλαμβάνει κι άλλες παραμέτρους, οι οποίες δεν εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε προσομοίωση προτύπου απλής γεωμετρίας, αλλά το πρόγραμμα παρέχει και δυνατότητα γεωμετρίας πρανούς έως και τριών αναβαθμών.

Βέβαια, λόγω της απλότητας, ευκολίας και ταχύτητας επίλυσης του προγράμματος, αυτό παράλληλα σηματοδοτεί και την ύπαρξη κάποιων περιορισμών, αρχικά στο σχεδιασμό και κατ' επέκταση κυρίως στο χρόνο επίλυσης. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιοι περιορισμοί στο σχεδιασμό του προγράμματος, που εντοπίστηκαν κατά την ενασχόληση με αυτό.

- ✓ Στην προσπάθεια εισαγωγής διεπιφανειών, υπάρχει περιορισμός στο σχεδιασμό. Ο κύριος περιορισμός είναι, ότι το πρόγραμμα επιτρέπει την εισαγωγή μίας μόνο διεπιφάνειας. Ο δεύτερος και εξίσου σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας

σχεδιασμού στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι η αδυναμία γραφικής απόδοσης της διεπιφάνειας. Έγινε προσπάθεια αντικατάστασης της αργιλικής στρώσης με διεπιφάνεια της οποίας οι ιδιότητες ήταν ίδιες με αυτές του στρώματος της αργίλου. Όμως, το πρόγραμμα καθιστούσε αδύνατο την γραφική τοποθέτηση της διεπιφάνειας, υπό την κλίση της εκάστοτε αργιλικής στρώσης. Τα δύο άκρα της γραμμής που ορίζει την διεπιφάνεια στο πρόγραμμα, πρέπει να τέμνουν τα δύο κατακόρυφα γεωμετρικά όρια του πρανούς, με αποτέλεσμα αυτό να περιορίζει την μορφή της ασυνέχειας. Επίσης, τα άκρα της γραμμής δεν πρέπει να βρίσκονται κοντά στα πάνω όρια των κατακόρυφων γεωμετρικών ορίων, διότι τότε δεν αποδίδεται σωστά η γεωμετρική μορφή της διεπιφάνειας και το μοντέλο δεν επιλύεται.

- ✓ Ο αριθμός των αναβαθμών που δύναται να οριστούν σε ένα πρανές, περιορίζεται στους τρεις.
- ✓ Η διακριτοποίηση των προς ανάλυση πρανών, αφορά όλο το μοντέλο, χωρίς δυνατότητα πύκνωσης σε συγκεκριμένα τμήματα, όπου απαιτείται και αραίωση στο υπόλοιπο. Επομένως, και στην πιο απλή περίπτωση γεωμετρίας πρανούς με μία ενδιάμεση στρώση, όπως και στην παρούσα εργασία, για το μοντέλο με την ενδιάμεση στρώση της αργίλου στις 5°, η οποία διασχίζει σχεδόν σε όλο το μήκος το πρανές, για την επιτυχή διακριτοποίηση απαιτείται μεγάλου βαθμού πύκνωση, με αποτέλεσμα το μεγάλο υπολογιστικό κόστος της μεθόδου (διάρκεια επίλυσης 3,5 ώρες).
- ✓ Η εισαγωγή της συνηρτημένης πλαστικής ροής, ως παράμετρος επίλυσης, οδηγεί σε υπερεκτίμηση του FoS, καθώς $\phi = \psi$.
- ✓ Εν κατακλείδι, το πρόγραμμα FLAC/Slope, αποτελεί μια άμεση και γρήγορη επιλογή για την ανάλυση ευστάθειας πρανών, απλής γεωμετρίας, καθώς σε πιο σύνθετα προβλήματα αυξάνεται το υπολογιστικό σφάλμα επηρεάζοντας το τελικό αποτέλεσμα. Για πιο σύνθετα προβλήματα, προτείνεται ο μητρικός κώδικας του προγράμματος, το FLAC.

6.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για την περαιτέρω διερεύνηση του προγράμματος, αλλά και τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών εν συγκρίσει με αυτές των πεπερασμένων στοιχείων και της οριακής ισορροπίας, παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις:

- ✓ Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος της οριακής ισορροπίας που χρησιμοποιήθηκε και αφορά την ανάλυση του σφηνοειδούς τεμάχους, έγινε η υπόθεση πως η μάζα που ολισθαίνει αποτελείται από έναν όγκο μόνο, πάνω στην οποία εφαρμόζονται οι παραδοχές και συνθήκες ισορροπίας. Ένας τρόπος βέλτιστων αποτελεσμάτων, αποτελεί η επίλυση της μεθόδου με περισσότερους όγκους σφήνας.
- ✓ Σύγκριση παρούσας διερεύνησης, με άλλες μεθόδους οριακής ισορροπίας (π.χ., Spencer, Janbu κλπ).
- ✓ Διερεύνηση του προγράμματος με διαφορετικής γεωμετρίας μοντέλα (π.χ., 3 αναβαθμοί) και εισαγωγή υπολοίπων παραμέτρων ή μεθοδολογίας επίλυσης.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγιουτάντης Γ. Ζαχαρίας: «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανικής Πετρωμάτων», 2002.
2. Εξαδάκτυλος Ε. Γεώργιος, «Ανάλυση ευστάθειας υπαίθριων και υπογείων έργων», Χανιά 2002
3. Καλογήρου Ειρήνη: «Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Π.Κ., Χανιά 2003.
4. Ξειδάκης Γ. Σ.: «Αστοχίες θαλάσσιων πρανών σε ημι-λιθοποιημένα εδάφη των ακτών της Θράκης. Μέρος Α: Μηχανισμοί διάβρωσης και μορφές αστοχιών», 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τ.Ε.Ε., Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
5. Παπαχρήστος Χ. Ευθ.: «Τρισδιάστατη αριθμητική διερεύνηση εντατικοπαραμορφωσιακού πεδίου σήραγγας σε ημίσκληρα πετρώματα», Π.Κ., Χανιά, 2011.
6. Πιτιλάκης Δ. Κυριαζής: «Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική», 2010, (<http://www.ziti.gr/docs/pdf/1401.pdf>)
7. Ρόζος Δ., «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Ι – Κατολισθήσεις-Εδαφικές Υποχωρήσεις-Καθιζήσεις», Κεφάλαιο 6, Αθήνα 2007.
8. Σταματόπουλος Α. Κ., Σταματόπουλος Κ. Α., Πετρίδης Π. Μ.: «Απώλεια ευστάθειας πρανούς υπό την επίδραση ισχυρής βροχής», 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
9. Στειακάκης Εμμ., «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας – εδαφομηχανικής», Χανιά 2004.
10. Τσολάκης Ε. Δημ.: «Παραμετρική διερεύνηση ευστάθειας πρανών φραγμάτων τελμάτων», Π.Κ., Χανιά 2011.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abramson W. Lee, Thomas S. Lee, Sunil Sharma, Glenn M. Boyce: ‘Slope Stability and Stabilization Methods’, 2nd edition, 2002.
2. Brady B. H. & Brown E. T., ‘Rock mechanics for Underground mining’, 3rd edition, 2004 Ch. 6.
3. Carter J.P., Desai C.S., Potts D.M., Schweiger H.F. & Sloan S.W.: ‘Computing and Computer Modelling in Geotechnical Engineering’, Proceedings, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, Vol.1, p. 1157 – 1252.
4. Dawson E. M., Roth W. H. & Drescher A.: “Slope stability analysis by strength reduction”, 1999, Geotechnique 49, No 6, p. 835-840.
5. Girty H. G., ‘Understanding Processes Behind Natural Disasters’, Department of Geological Sciences, San Diego State University, Ch. 8, June 2009.
6. Itasca Consulting Group, Inc.: “FLAC 2D Fast Lagrangian Analysis of Continua – FLAC/Slope User’s guide”, 2nd edition, Minneapolis, Minnesota, 2002.
7. Itasca Consulting Group, Inc.: “FLAC 2D Fast Lagrangian Analysis of Continua – FLAC/Slope User’s guide”, 4th edition, Minneapolis, Minnesota, 2008.
8. Itasca Consulting Group, Inc.: “FLAC 2D Fast Lagrangian Analysis of Continua – Theory and Background”, 4th edition, Minneapolis, Minnesota, 2008.
9. McCarthy F. David, ‘Essentials of soil mechanics and foundations’, 1998.
10. Mohammadi S. & Taiebat H. A.: “Update lagrangian analysis of soils slopes in FEM”, Pan-Am CGS Geotechnical Conference, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2011.
11. Moraes R.: “Numerical codes used to model failure in large fractured scale and jointed rock slopes in hydropower projects”, 6th International Conference on dam engineering, Lisbon, Portugal, Feb. 2011.
12. Rocha M.C. Katia, Guimarães Marco Antonio: “Numerical Techniques for Real Options”, 1999, (<http://www.puc-rio.br/marco.ind/katia-num.html#finite-differences>)

13. Sankar U. Siva: “Slope stability and dump stability”, 6 May, 2011 (<http://www.slideshare.net/sankarsulimella/slopestability>)
14. Terzaghi, K.: “Theoretical Soil Mechanics”, John Wiley & Son, 1943
15. U.S. Army Corps of Engineers: “Engineering and Design Rock Foundations”, Engineer Manual 1110-1-2908, Department of the U.S. Army, Washington, 30 Nov., 1994.
16. U.S. Army Corps of Engineers: “Engineering and Design Slope Stability”, Engineer Manual 1110-2-1902, Department of the U.S. Army, Washington, 31 Oct., 2003.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. <http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Soil%20Mechanics/ch12.pdf>
2. http://media.wiley.com/product_data/excerpt/33/04713849/0471384933.pdf
3. http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410/FM5-410_Ch6.pdf
4. http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410/FM5-410_Ch10.pdf
5. http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410/FM5-410_Ch4.pdf
6. http://www.itc.nl/~rossiter/docs/fm5-410/fm5-410_ch8.pdf
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Slope_stability_analysis
8. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/result.cfm>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MOHR-COULOMB, ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLAC

Η ενότητα αυτή, έχει γραφτεί σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο που συνοδεύει το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος FLAC (Itasca, 2008).

Αναλυτικά για το μοντέλο Mohr-Coulomb που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία, το κριτήριο αστοχίας αντιστοιχεί στο κριτήριο Mohr-Coulomb (λειτουργία διατμητικής διαρροής) με αποκοπή εφελκυστικών τάσεων (λειτουργία εφελκυστικής διαρροής). Ο κανόνας διατμητικής ροής δεν είναι συνηρτημένος, ενώ ο κανόνας εφελκυστικής ροής είναι.

Στοιχειώδης νόμος ελαστικότητας

Στην εφαρμογή του FLAC, χρησιμοποιούνται οι κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ και η εκτός επιπέδου τάση σ_{zz} , αναγνωρίζεται ως μία εξ αυτών. Οι κύριες τάσεις και κατευθύνσεις, αξιολογούνται από τις συνιστώσες του τανυστή τάσης και είναι:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (\text{A.1})$$

Οι αντίστοιχες στοιχειώδεις κύριες παραμορφώσεις, ορίζονται ως εξής:

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p, i = 1, 3 \quad (\text{A.2})$$

όπου οι εκθέτες e και p αναφέρονται στα ελαστικά και πλαστικά μέρη αντίστοιχα, και τα πλαστικά μέρη είναι μη μηδενικά κατά τη διάρκεια της πλαστικής ροής. Η στοιχειώδης έκφραση του νόμου του Hooke για τις κύριες τάσεις και παραμορφώσεις, έχει την μορφή:

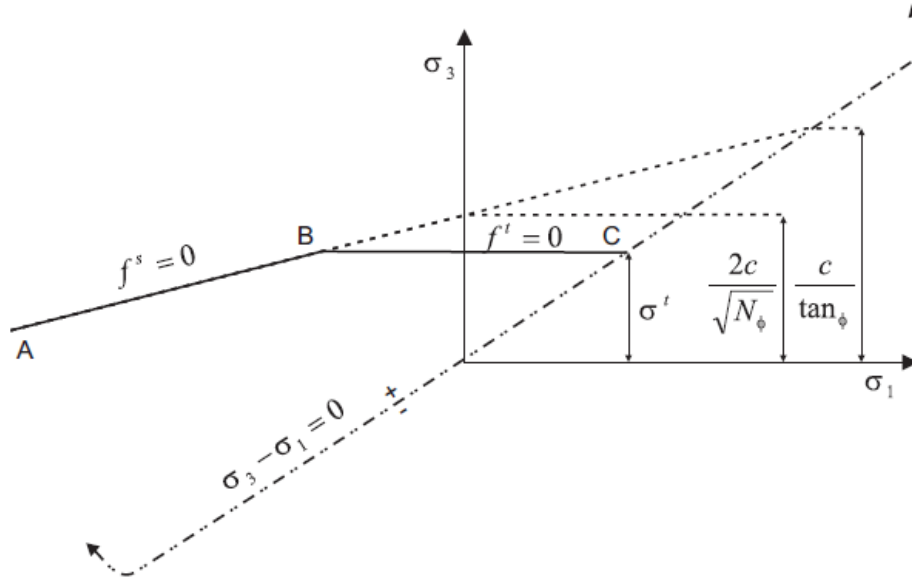
$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta e_1^e + \alpha_2 (\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta e_2^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta e_3^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_2^e) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

όπου:

$\alpha_1 = K + 4G/3$, $\alpha_2 = K - 2G/3$, K: μέτρο μεταβολής όγκου και G: μέτρο διάτμησης (όπου στο πρόγραμμα για την επίλυση, μπαίνουν αυτόματα οι τιμές $K=100\text{MPa}$ και $G=30\text{MPa}$).

Διαρροή και Ενδεχόμενες λειτουργίες

Με τη χρήση της εξίσωσης Α.1, το κριτήριο αστοχίας μπορεί να παρουσιαστεί στο επίπεδο (σ_1, σ_3) όπως στο σχήμα Α.1 που ακολουθεί:



Σχήμα Π.1: Κριτήριο Mohr-Coulomb στο FLAC (Itasca, 2008)

Το κριτήριο αστοχίας καθορίζεται από το σημείο Α έως το σημείο Β με τη λειτουργία διαρροής του Mohr-Coulomb:

$$f^t = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (\text{A.4})$$

και από το σημείο Β στο C, από τη λειτουργία διαρροής εφελκυσμού της μορφής:

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (\text{A.5})$$

όπου, ϕ είναι η γωνία τριβής και c η συνοχή, σ^t είναι η εφελκυστική αντοχή και

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{A.6})$$

Πρέπει να σημειωθεί, πως μόνο οι μέγιστες και ελάχιστες κύριες τάσεις είναι ενεργές στη διαμόρφωση της διατμητικής διαρροής και η ενδιάμεση κύρια τάση δεν έχει καμία επίδραση.

Για υλικό με γωνία τριβής $\phi \neq 0$ και η εφελκυστική αντοχή του υλικού να μην μπορεί να υπερβεί την τιμή της μέγιστης διατμητικής, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \phi} \quad (\text{A.7})$$

η ενδεχόμενη λειτουργία διάτμησης, g^s , αντιστοιχεί σε μη συνηρτημένο κανόνα ροής και έχει την μορφή:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (\text{A.8})$$

όπου ψ η γωνία διασταλτικότητας και

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (\text{A.9})$$

Ο συνηρτημένος κανόνας ροής για την αστοχία εφελκυσμού, προκύπτει από την ενδεχόμενη λειτουργία g^t , με

$$g^t = -\sigma_3 \quad (\text{A.10})$$

Οι κανόνες ροής για το μοντέλο του Mohr-Coulomb, αποδίδουν έναν μοναδικό ορισμό πλησίον του ορίου της σύνθετης λειτουργίας διαρροής στις τρεις διαστάσεις, με την εφαρμογή μιας τεχνικής η οποία περιγράφεται στη συνέχεια, για την περίπτωση ορίου του διατμητικού εφελκυσμού. Μια συνάρτηση, $h(\sigma_1, \sigma_3)=0$, καθορίζεται από τη διαγώνιο μεταξύ της οριοθέτησης των $f^s = 0$ και $f^t = 0$ στο επίπεδο των $\sigma_1 - \sigma_3$ (σχήμα Α.2). Η εξίσωση έχει την μορφή:

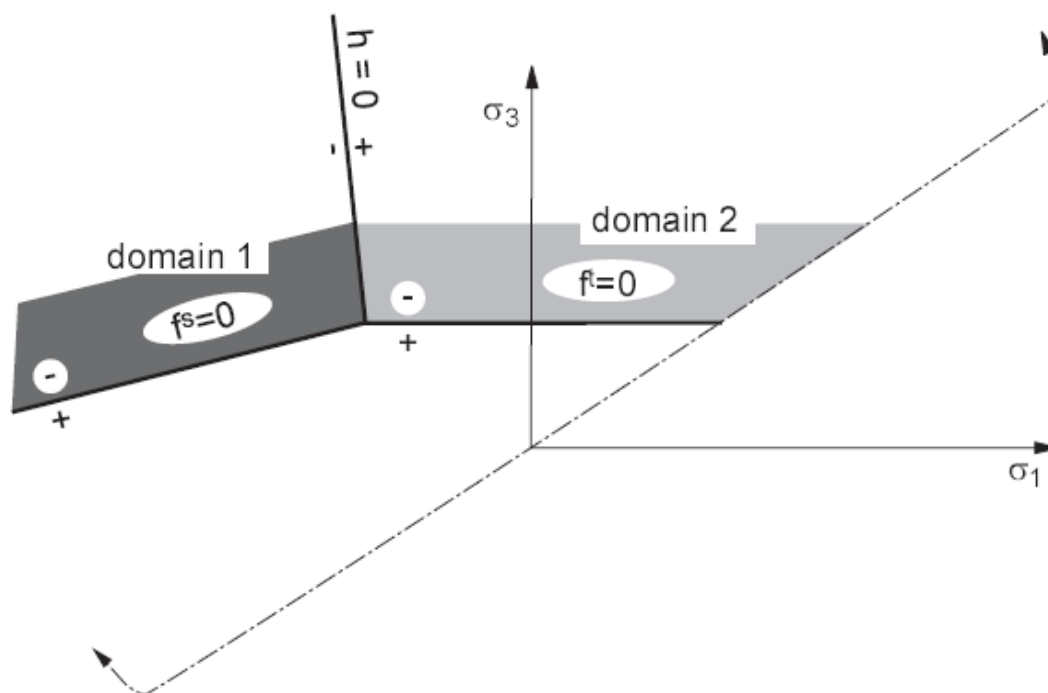
$$h = \sigma_3 - \sigma^t + \alpha^P (\sigma_1 - \sigma^P) \quad (\text{A.11})$$

όπου: α^P και σ^P είναι σταθερές οι οποίες ορίζονται ως:

$$\alpha^P = \sqrt{1 + N_\phi^2} + N_\phi \quad (\text{A.12})$$

και

$$\sigma^P = \sigma^t N_\phi - 2c \sqrt{N_\phi} \quad (\text{A.13})$$



Σχήμα Α.2: Μοντέλο Mohr-Coulomb: περιοχές που χρησιμοποιούνται στον καθορισμό του κανόνα ροής (Itasca, 2008).

Η ελαστική υπόθεση/παραδοχή η οποία παραβιάζει το κριτήριο αστοχίας, εκπροσωπείται από ένα σημείο στο επίπεδο των $\sigma_1 - \sigma_3$ και εντοπίζεται είτε στην περιοχή 1 ή 2, που αντιστοιχεί σε αρνητική ή θετική περιοχή, για $h=0$.

Εάν στην περιοχή 1, η διατμητική αστοχία έχει εκδηλωθεί, το σημείο τάσης επανέρχεται στη καμπύλη $f^s=0$, χρησιμοποιώντας έναν κανόνα ροής ο οποίος προέρχεται από τη χρήση της εν δυνάμει λειτουργίας g^s . Εάν στην περιοχή 2, η αστοχία εφελκυσμού λαμβάνει χώρα, το σημείο τάσης επανέρχεται στο $f^t=0$ με τη χρήση του κανόνα ροής από τη λειτουργία g^t .

Πρέπει να τονιστεί, πως από τον υπολογισμό των τάσεων της σχέσης Α.1, η περίπτωση του ορίου διατμητικής διάτμησης (*shear-shear edge*) πραγματοποιείται αυτόματα από μία παραλλαγή αυτής της τεχνικής. Η τεχνική αυτή, που ισχύει για επαυξήσεις μικρής καταπόνησης, είναι απλή στην εφαρμογή: σε κάθε βήμα, μόνο ένας κανόνας ροής και η αντίστοιχη διόρθωση τάσης υπεισέρχονται στον υπολογισμό της πλαστικής ροής. Συγκεκριμένα, όταν το σημείο τάσης ακολουθεί ένα όριο, αυτό λαμβάνει διορθώσεις τάσης με εναλλαγή μεταξύ δύο κριτηρίων. Σε αυτή τη διαδικασία, τα δύο κριτήρια διαρροής πληρούνται με ακρίβεια, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της αύξησης της καταπόνησης.

Πλαστικές διορθώσεις

Αρχικά θεωρείται διατμητική αστοχία. Ο κανόνας ροής έχει την μορφή:

$$\Delta e_i^p = \lambda^s \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i}, \quad i=1, 3 \quad (\text{A.14})$$

όπου λ^s είναι η παράμετρος του άγνωστου μεγέθους. Από την εξίσωση A.8 για g^s , αυτές οι εξισώσεις έπειτα από μερική διαφοροποίηση, γίνονται:

$$\begin{aligned} \Delta e_1^p &= \lambda^s \\ \Delta e_2^p &= 0 \\ \Delta e_3^p &= -\lambda^s N_\psi \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Οι επαυξήσεις της ελαστικής καταπόνησης εκφράζονται από την εξίσωση A.2 ως το σύνολο των αυξήσεων μείον των πλαστικών αυξήσεων. Κατά την περαιτέρω χρήση του κανόνα ροής (εξ. A.15), οι ελαστικοί κανόνες γίνονται:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta e_1 + \alpha_2 (\Delta e_2 + \Delta e_3) - \lambda^s (\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta e_2 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_3) - \lambda^s \alpha_2 (1 - N_\psi) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta e_3 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_2) - \lambda^s (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Οι νέες και παλιές καταστάσεις τάσης περιγράφονται από τους εκθέτες N και O , αντίστοιχα. Επομένως, εξ ορισμού:

$$\sigma_i^N = \sigma_i^O + \Delta \sigma_i, \quad i=1, 3 \quad (\text{A.17})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση A.16 για $\Delta \sigma_i$, $i=1,3$ τότε γίνεται:

$$\begin{aligned} \sigma_1^N &= \sigma_1^I - \lambda^s (\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) \\ \sigma_2^N &= \sigma_2^I - \lambda^s \alpha_2 (1 - N_\psi) \\ \sigma_3^N &= \sigma_3^I - \lambda^s (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

όπου ο εκθέτης I , χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ελαστική παραδοχή, η οποία λαμβάνεται από την προσθήκη στις παλιές ελαστικές αυξήσεις τάσεων οι οποίες υπολογίζονται με τη χρήση των συνολικών αυξήσεων καταπόνησης, δηλαδή:

$$\begin{aligned} \sigma_1^I &= \sigma_1^O + \alpha_1 \Delta e_1 + \alpha_2 (\Delta e_2 + \Delta e_3) \\ \sigma_2^I &= \sigma_2^O + \alpha_1 \Delta e_2 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_3) \\ \sigma_3^I &= \sigma_3^O + \alpha_1 \Delta e_3 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_2) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Ο συντελεστής λ^s μπορεί τώρα να προσδιοριστεί επιβάλλοντας το νέο σημείο τάσης να εντοπίζεται στην επιφάνεια διατμητικής διαρροής. Αντικαθιστώντας τα σ_1^N και σ_3^N για σ_1 και σ_3 στην $f^s=0$, μετά από μερικούς χειρισμούς στις Α.4 και Α.18, δίνει:

$$\lambda^s = \frac{f^s(\sigma_1^I, \sigma_3^I)}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (\alpha_2 - \alpha_1 N_\psi) N_\phi} \quad (A.20)$$

Στην περίπτωση της εφελκυστικής αστοχίας, ο κανόνας ροής, έχει την μορφή:

$$\Delta e_i^P = \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma_i}, \quad i=1, 3 \quad (A.21)$$

όπου το μέγεθος της παραμέτρου λ^t δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Α.10 για g^t , αυτή η έκφραση μετά από μερική διαφοροποίηση, δίνει:

$$\begin{aligned} \Delta e_1^P &= 0 \\ \Delta e_2^P &= 0 \\ \Delta e_3^P &= -\lambda^t \end{aligned} \quad (A.22)$$

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, όπως προηγουμένως, προκύπτουν:

$$\begin{aligned} \sigma_1^N &= \sigma_1^I + \lambda^t \alpha_2 \\ \sigma_2^N &= \sigma_2^I + \lambda^t \alpha_2 \\ \sigma_3^N &= \sigma_3^I + \lambda^t \alpha_1 \end{aligned} \quad (A.23)$$

και

$$\lambda^t = \frac{f^t(\sigma_3^I)}{\alpha_1} \quad (A.24)$$

Διαδικασία εφαρμογής

Στην εφαρμογή του Mohr-Coulomb στο FLAC, αρχικά υπολογίζεται μια ελαστική υπόθεση $\sigma_{i,j}^I$, με πρόσθεση των παλιών στοιχείων τάσης, στη συνολική αύξηση καταπόνησης ανά βήμα. Οι κύριες τάσεις $\sigma_1^I, \sigma_2^I, \sigma_3^I$ και οι αντίστοιχες διευθύνσεις τους, υπολογίζονται. Εάν αυτές οι τάσεις παραβιάζουν τη σύνθεση του κριτηρίου διαρροής, τότε εφαρμόζεται διόρθωση στην ελαστική υπόθεση για να δώσει νέα συνθήκη τάσης. Σε αυτή την περίπτωση τότε ισχύει $h(\sigma_1^I, \sigma_3^I) \leq 0$ ή $h(\sigma_1^I, \sigma_3^I) > 0$

(εξ. Α.11). Στην πρώτη περίπτωση εκδηλώνεται η διατμητική αστοχία. Οι νέες τάσεις υπολογίζονται από την εξίσωση Α.18 συναρτήσει της εξίσωσης Α.20 για λ^s .

Στη δεύτερη περίπτωση, λαμβάνει χώρα η εφελκυστική αστοχία, και οι νέες τάσεις υπολογίζονται από την εξίσωση Α.23 συναρτήσει της εξίσωσης Α.24. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες του τανυστή τάσης από το σύστημα αξόνων αναφοράς, από τις κύριες τιμές υποθέτοντας ότι οι κύριες κατευθύνσεις δεν επηρεάζονται από την πλαστική διόρθωση.

Στο πρόγραμμα FLAC, η τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι προεπιλεγμένα μηδενική. Αυτή η τιμή ορίζεται στο $\sigma'_{\max}$ όταν η τιμή που αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή υπερβεί το $\sigma'_{\max}$. Αν η υπολογισμένη τιμή της σ_3 υπερβεί τη σ' σε μία ζώνη, η αντοχή εφελκυσμού ορίζεται στο μηδέν σε αυτή τη ζώνη. Αυτό προσομοιώνει τη στιγμιαία την εφελκυστική χαλάρωση.

Η πλαστική καταπόνηση δεν υπολογίζεται απευθείας σε αυτό το μοντέλο, για την επιτάχυνση των υπολογισμών. Το μοντέλο κράτυνσης - χαλάρωσης (*strain-softening model*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εάν απαιτούνται πλαστικές καταπονήσεις ή/και εάν επιθυμείται βαθμιαία ή μη, εφελκυστική χαλάρωση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLAC/SLOPE

Στην ενότητα αυτή δίνονται οι παράμετροι της επίλυσης, οι ιδιότητες των υλικών, καθώς και τα αποτελέσματα για κάθε επίλυση που πραγματοποιήθηκε κατά την παραμετρική ανάλυση του Κεφαλαίου 5. Επίσης, παρατίθενται τα γραφήματα των αποτελεσμάτων, στα οποία απεικονίζεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων, που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της μάζας της αργίλου.

Οι δώδεκα πρώτες επιλύσεις, αφορούν το μοντέλο με πάχος αργίλου 1,25 και οι ιδιότητες των υλικών για αυτές τις επιλύσεις, παρουσιάζονται στον Πίνακα Β1.

Πίνακας Β1: Πίνακας παραμέτρων επίλυσης και ιδιοτήτων των υλικών του μοντέλου για τις 12 πρώτες επιλύσεις.

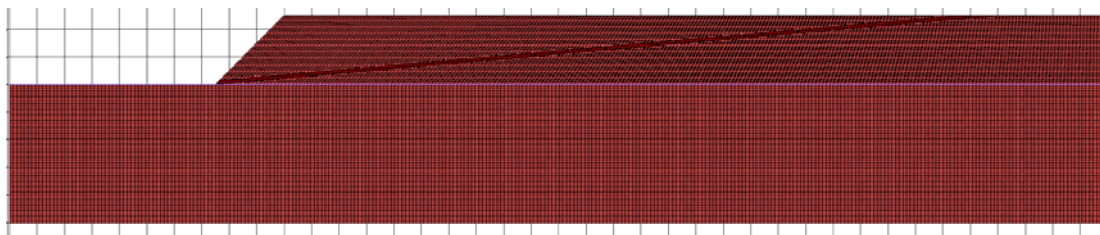
	Ψαμμίτης Ι	Άργιλος	Ψαμμίτης ΙΙ
Καταστατικό Μοντέλο	Mohr-Coulomb		
γ_{dry} (kg/m ³)	2.142	1.632,00	2.142,00
γ_{wet} (kg/m ³)	2.244	1.836,00	2.244,00
c (kN/m ²)	1.000	150 & 50	1.000,00
ϕ (°)	37	24,00	37,00
Tension cutoff	NAI		
Associated plastic flow rule	NAI		

1^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

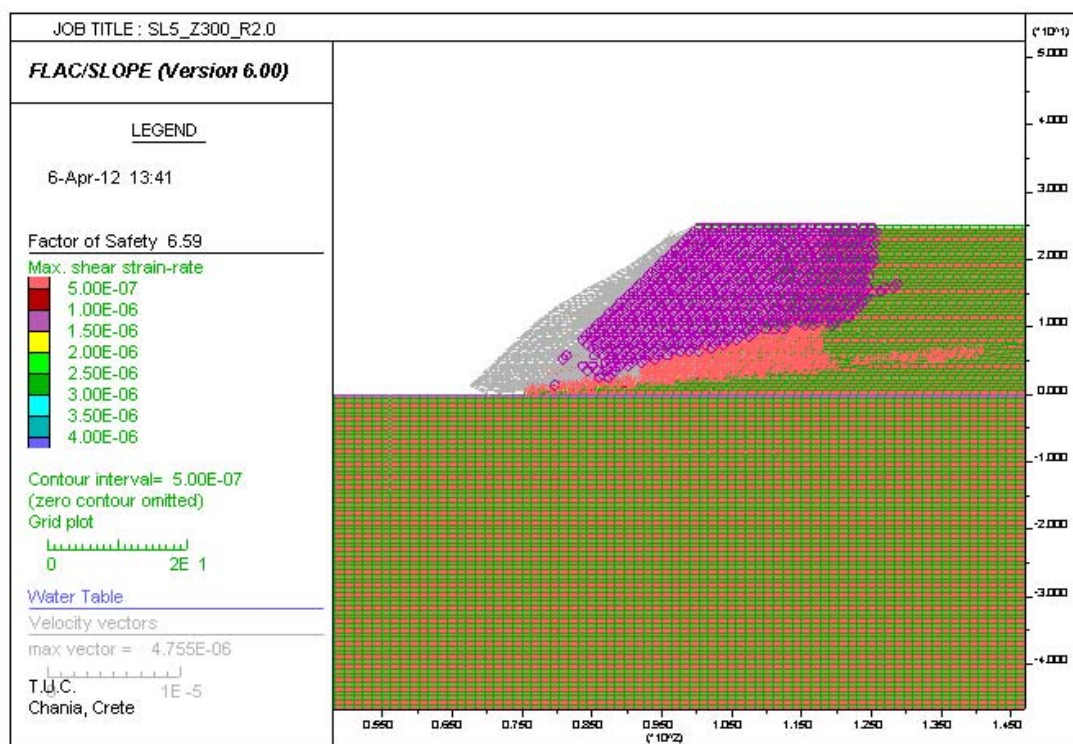
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	5°	150

Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=300$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι $R=2:1$ (εικόνα Β.1).



Εικόνα Β.1: Διακριτοποίηση 1^{ης} επίλυσης.

Η επίλυση αυτής της περίπτωσης δίνει τιμή για το συντελεστή ασφαλείας: $FS= 6,59$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.2.



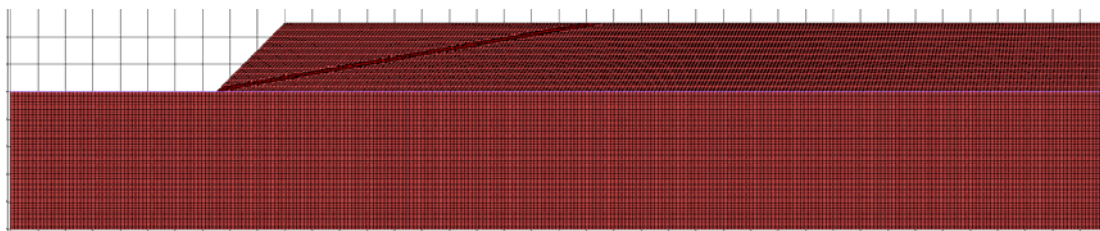
Εικόνα 2: Γράφημα αποτελεσμάτων 1^{ης} επίλυσης και κατανομή των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του στρώματος της αργίλου. Οι ροζ κύκλοι αναπαριστούν τις ενδείξεις πιθανών περιοχών εμφάνισης πλαστικότητας.

2^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

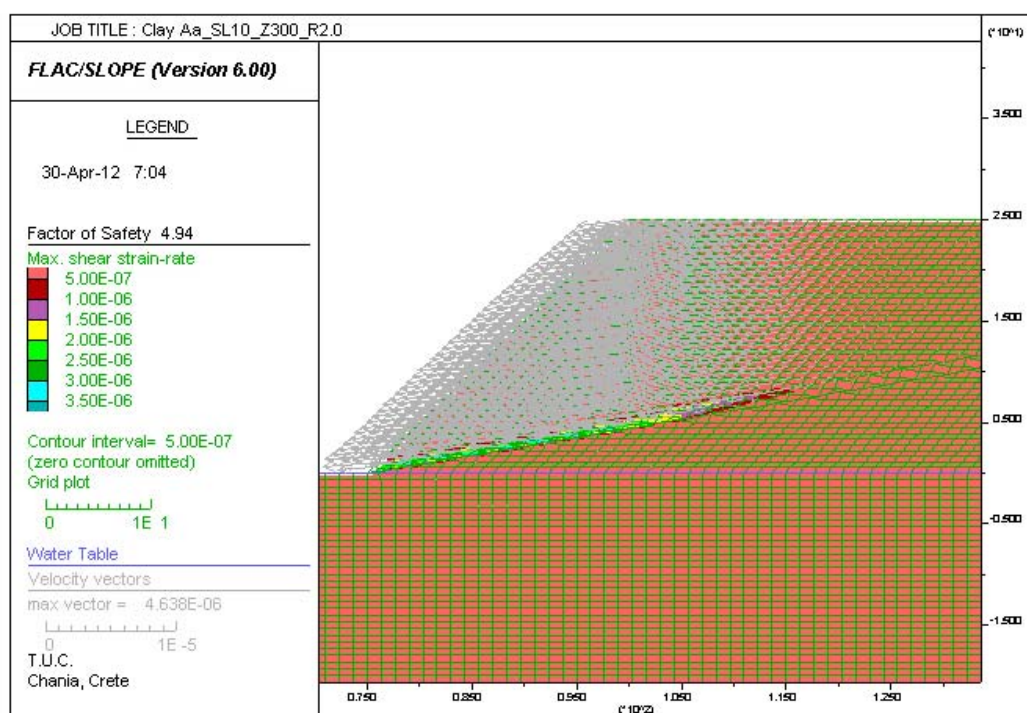
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	10°	150

Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=300$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1 (εικόνα Β.3).



Εικόνα Β.3: Διακριτοποίηση μοντέλου δεύτερης επίλυσης.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη δεύτερη επίλυση είναι: $FS= 4.94$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.4.



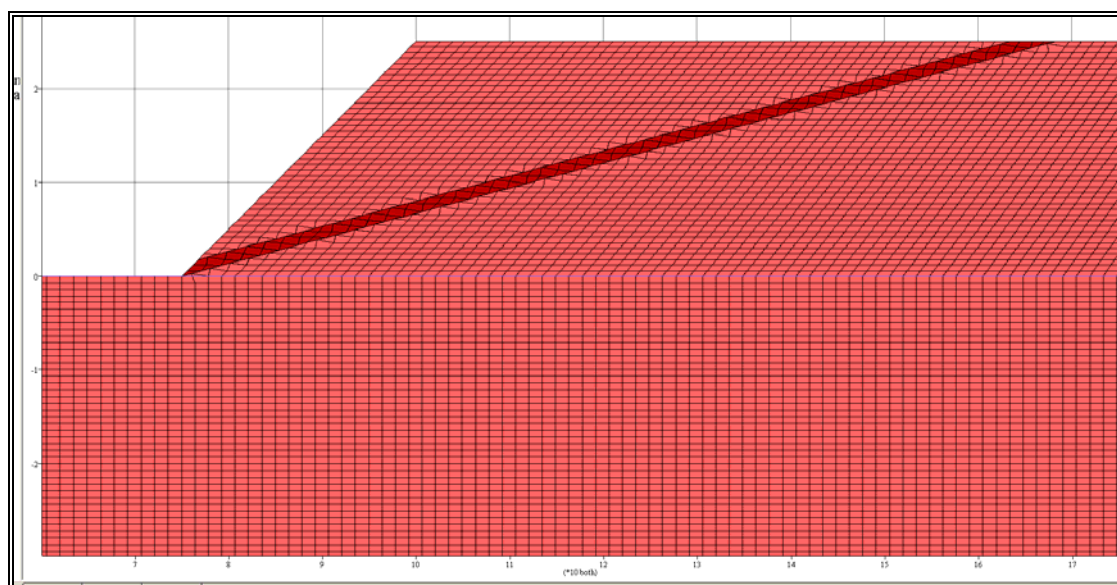
Εικόνα Β.4: Αποτέλεσμα 2^{ης} επίλυσης και κατανομή διατμητικών τάσεων.

3^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

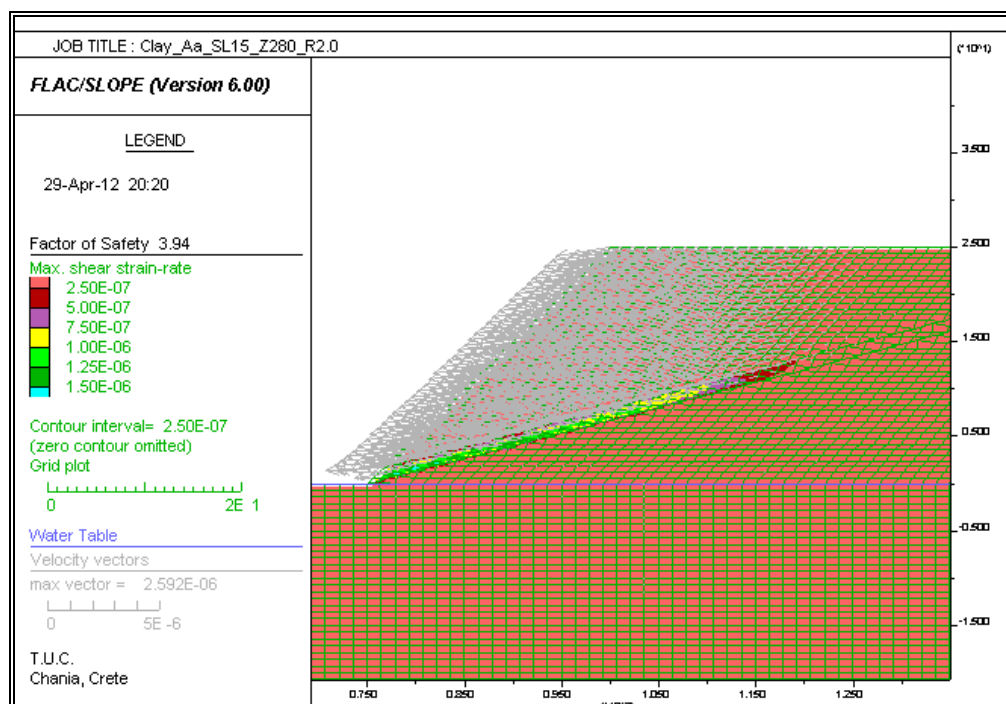
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m^2)
25,00	45°	15°	150

Για τη τρίτη επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=280$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1 (εικόνα Β.5).



Εικόνα Β.5: Διακριτοποίηση προτύπου τρίτης επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη τρίτη επίλυση είναι: $FS= 3.94$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.6.



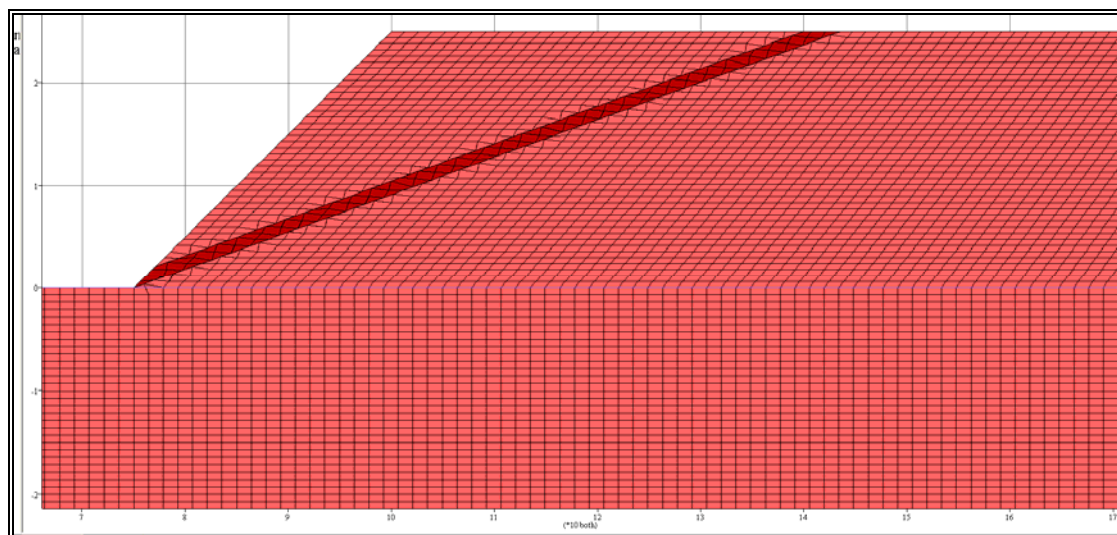
Εικόνα Β.6: Αποτελέσματα τρίτης επίλυσης και κατανομή διατμητικών τάσεων

4^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

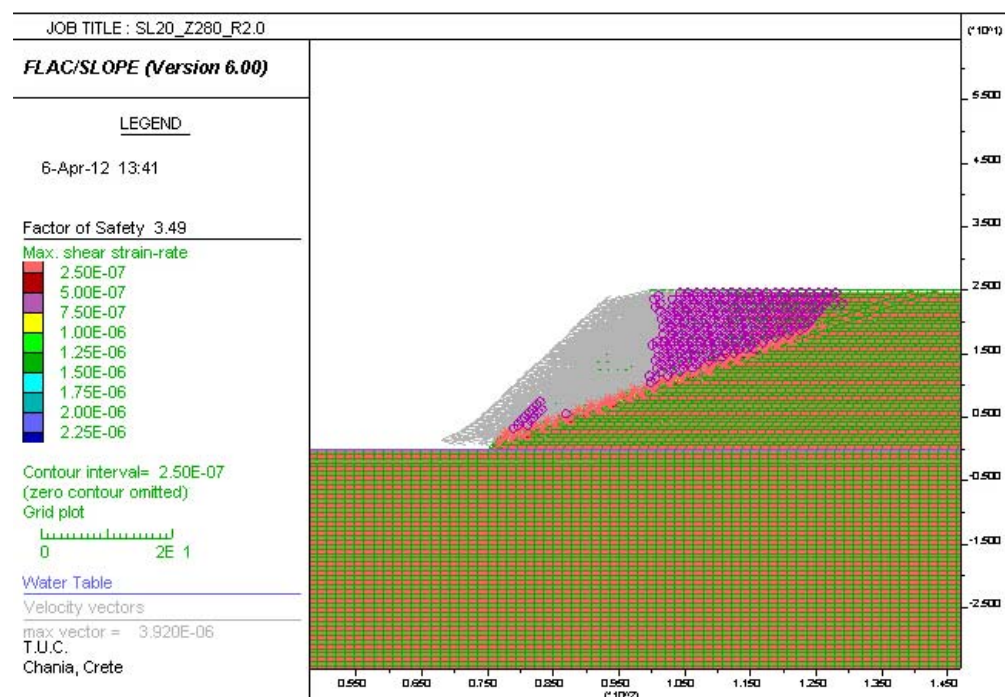
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	20°	150

Για τη τέταρτη επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=280$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1 (εικόνα Β.7).



Εικόνα Β.7: Διακριτοποίηση προτύπου τέταρτης επίλυσης.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη τέταρτη επίλυση είναι: $FS = 3.49$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.8.



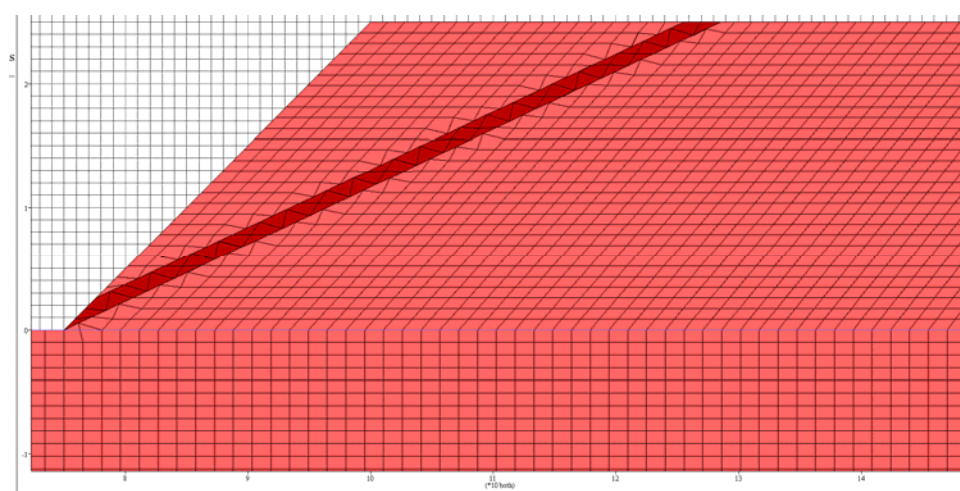
Εικόνα Β.8: Αποτελέσματα 4^{ης} επίλυσης και κατανομή διατμητικών τάσεων.

5^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

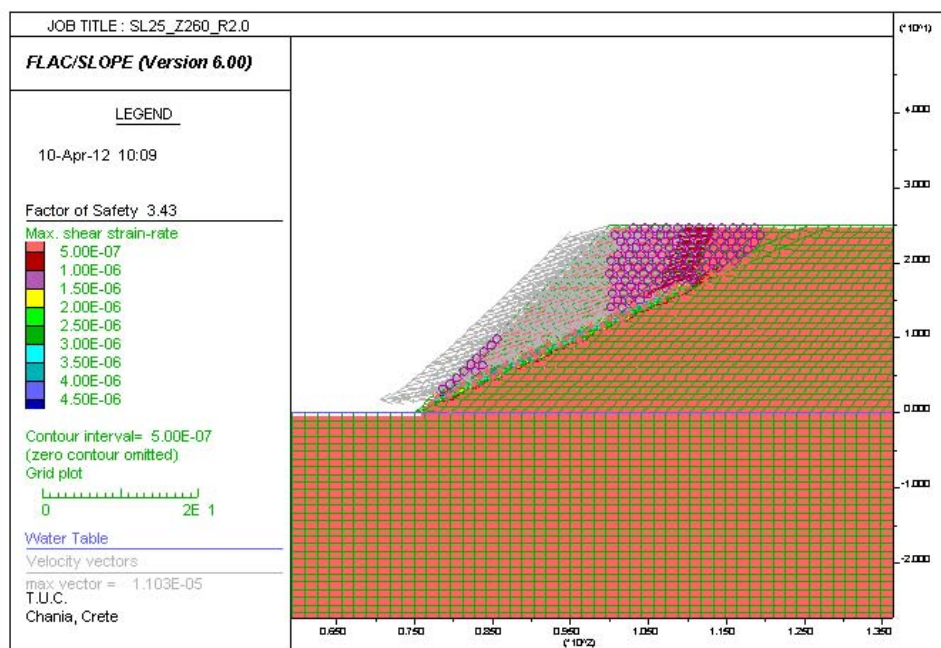
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m^2)
25,00	45°	25°	150

Για τη 5^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=260$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα Β.9).



Εικόνα Β.9: Διακριτοποίηση 5^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη 5^η επίλυση είναι: $FS= 3.43$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.10.



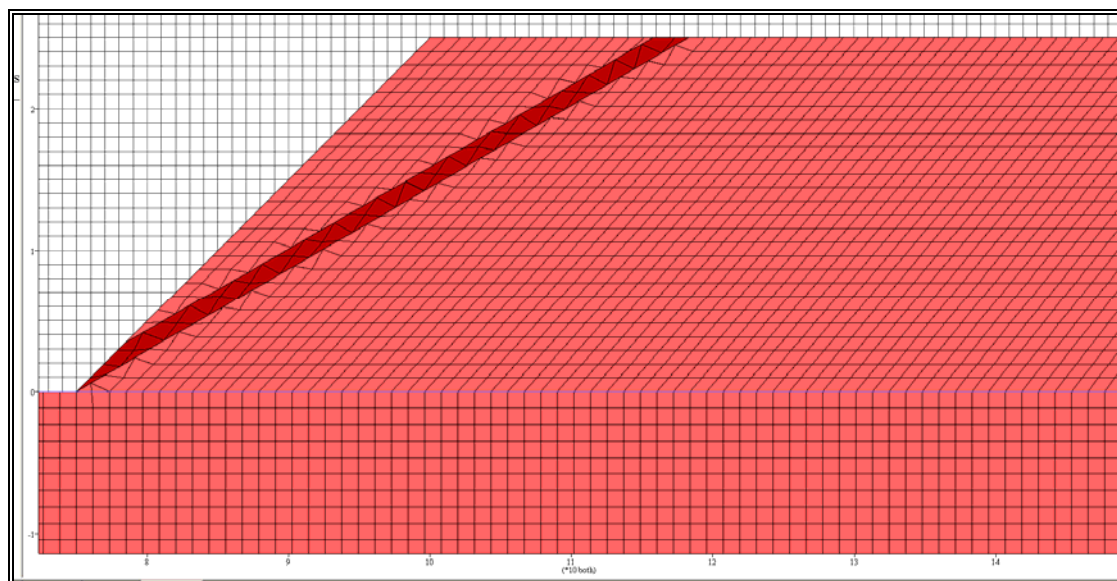
Εικόνα Β.10: Αποτελέσματα 5^{ης} επίλυσης

6^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

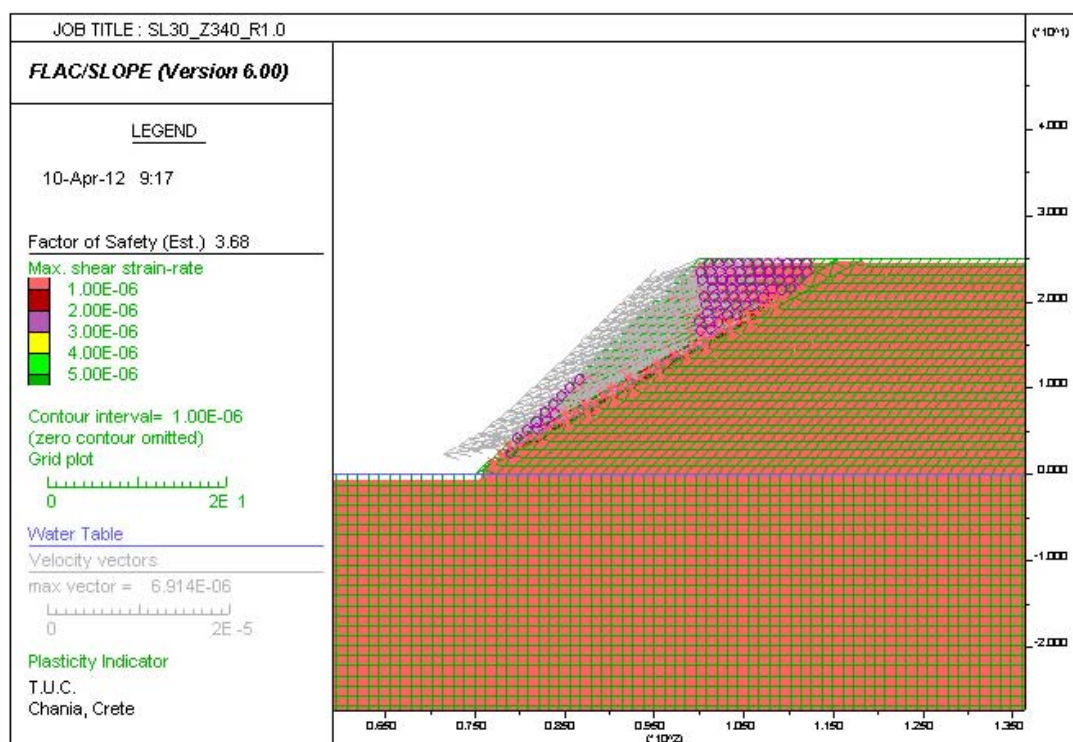
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	30°	150

Για τη 6^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=340 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1 (εικόνα Β.11).



Εικόνα B.11: Διακριτοποίηση 6^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη 6^η επίλυση είναι: $FS = 3.68$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.12.



Εικόνα 12: Αποτελέσματα 6^{ης} επίλυσης

7^η ΕΠΙΛΥΣΗ

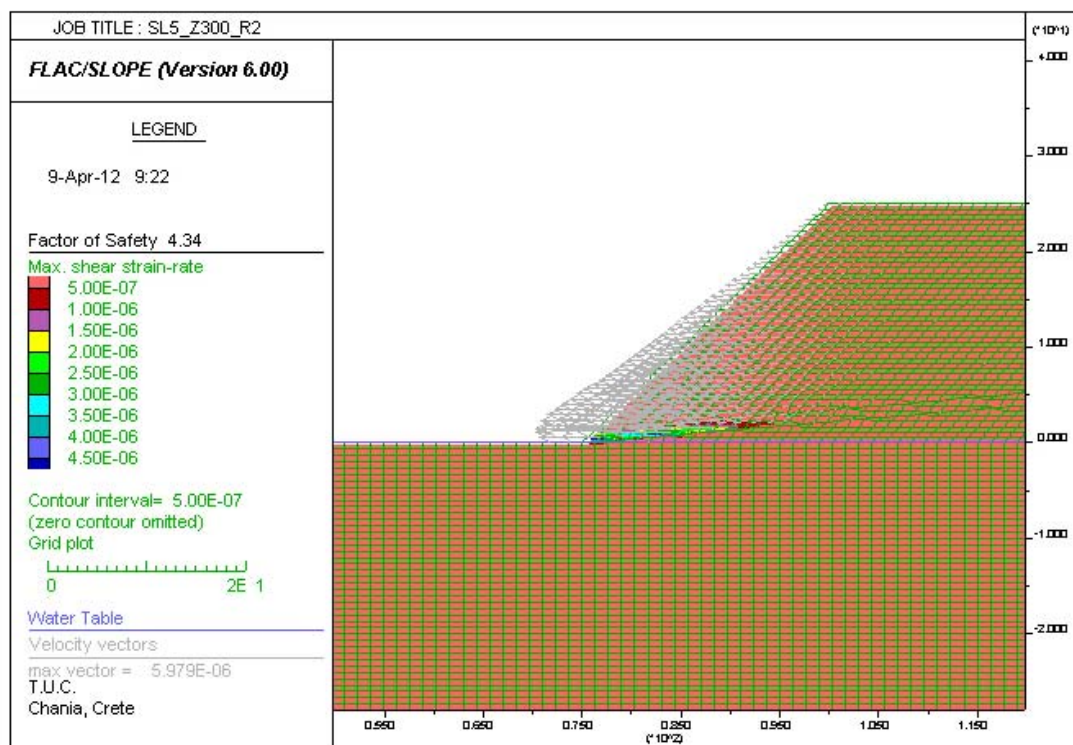
Σε αυτή την ομάδα επιλύσεων (7^η έως και 12^η), μειώνεται η συνοχή της αργίλου από 150kN/m³ σε 50kN/m³.

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργίλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	5°	50

Για την 7^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=300 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι και είναι ίδια με την εικόνα B.1.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη 7^η επίλυση είναι: FS= 4.34 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργίλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.13.



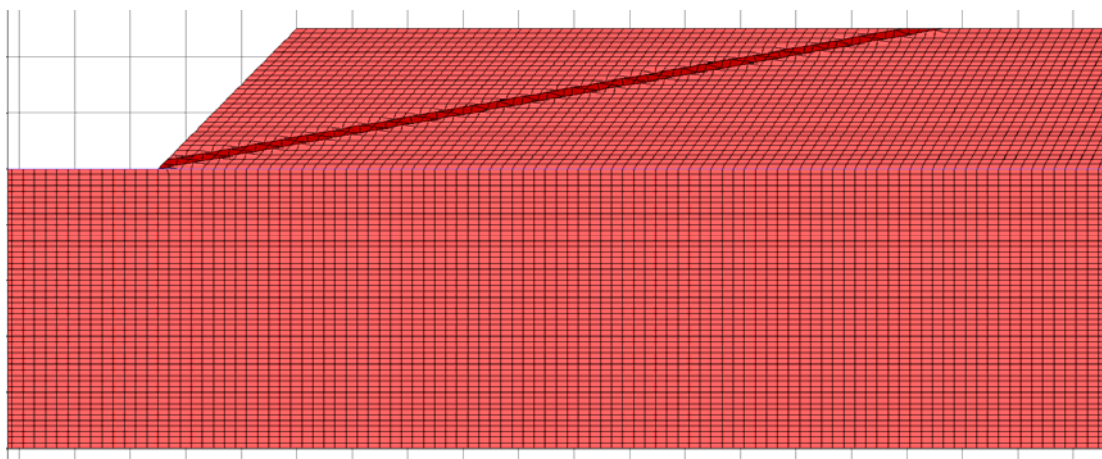
Εικόνα B.13: Αποτελέσματα 7^{ης} επίλυσης

8^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

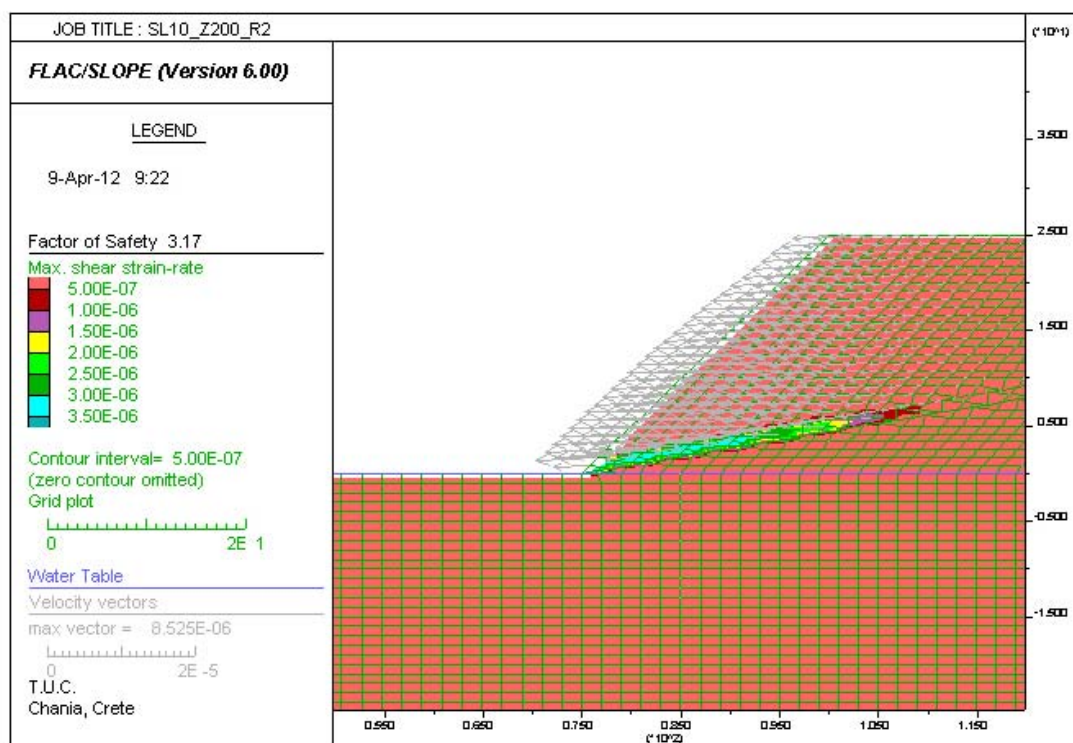
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m^2)
25,00	45°	10°	50

Για την 8^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=200$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1 (εικόνα B.14).



Εικόνα B.14: Διακριτοποίηση 8^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 8^η επίλυση είναι: $FS= 3.17$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.15.



Εικόνα Β.15: Αποτελέσματα 8^{ης} επίλυσης.

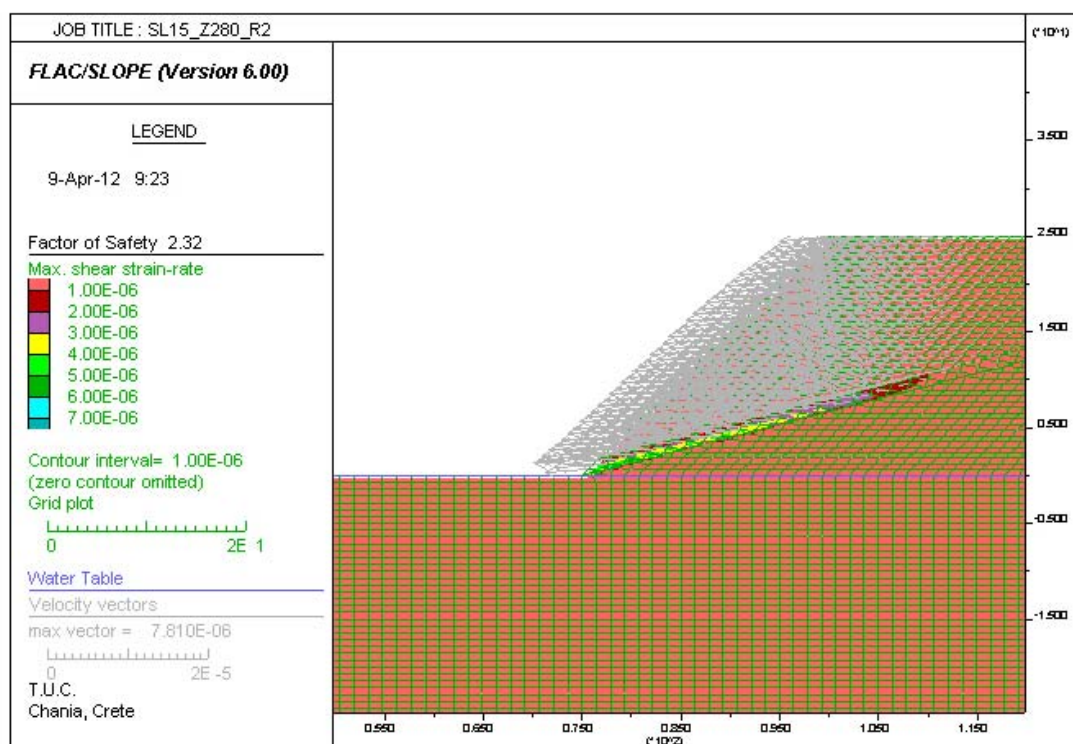
9^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	15°	50

Για την 9^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=280 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.5.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 9^η επίλυση είναι: FS= 2.32 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.16.

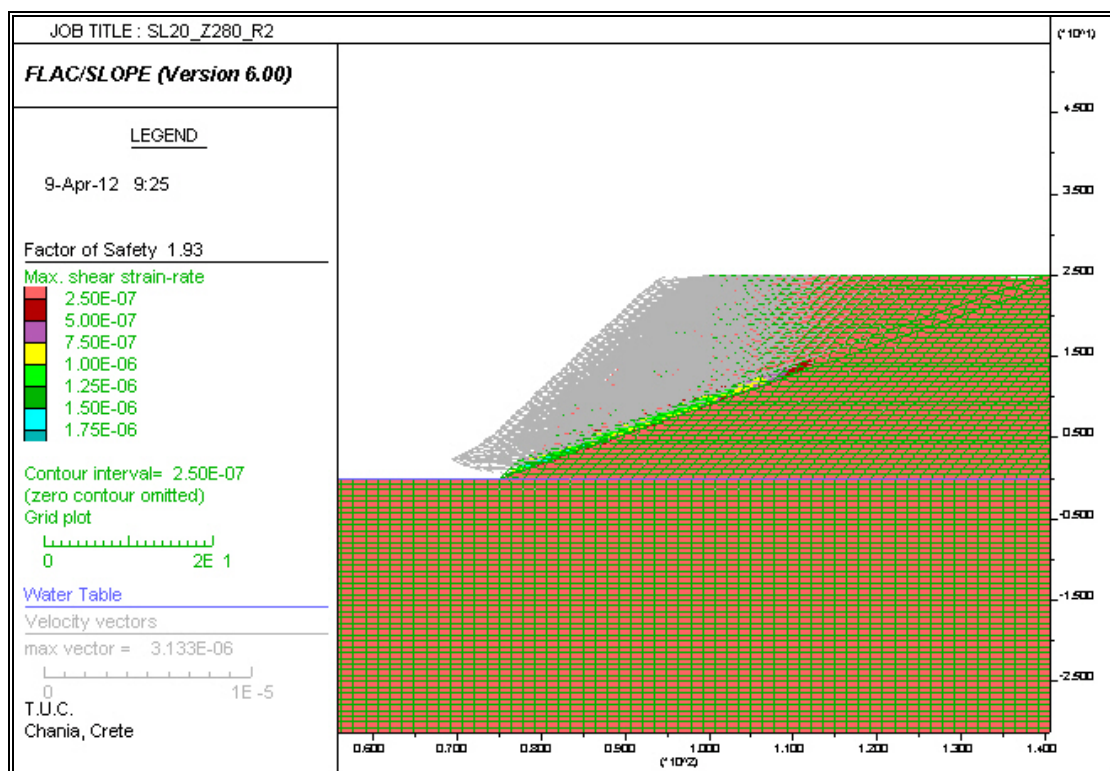
Εικόνα Β.16: Αποτελέσματα 9^{ης} επίλυσης**10^η ΕΠΙΛΥΣΗ**

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	20°	50

Για τη 10^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=280 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 2:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.7.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τη 10^η επίλυση είναι: FS= 1.93 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.17.



Εικόνα Β.17: Αποτελέσματα 10^{ης} επίλυσης

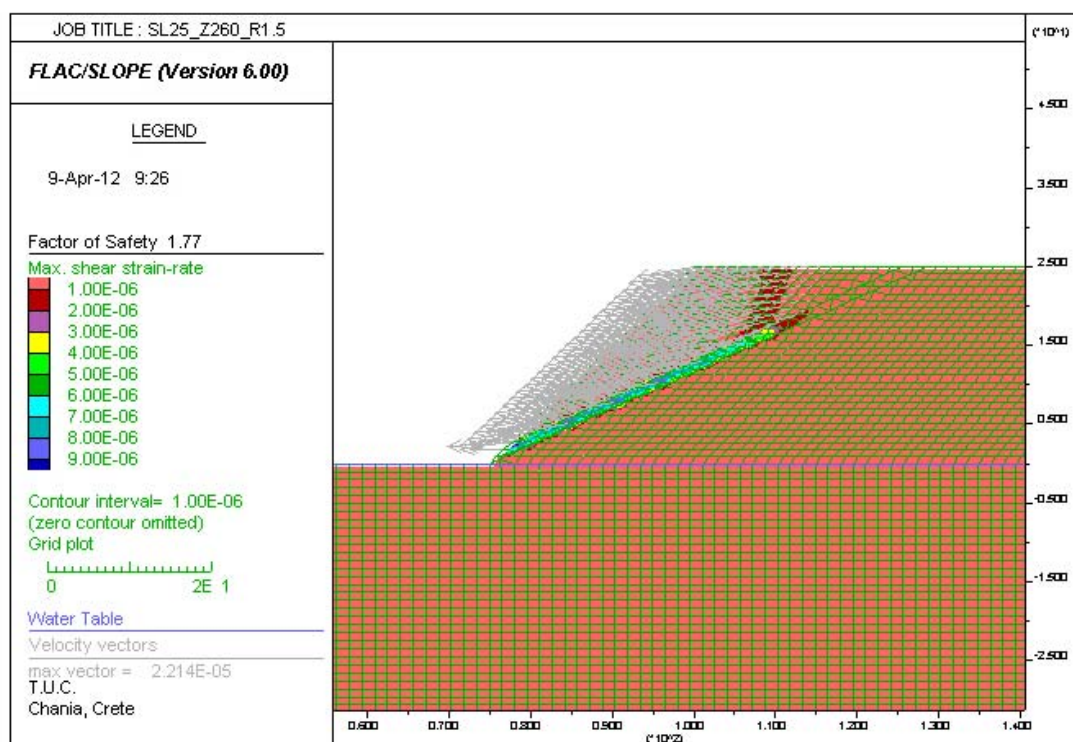
11^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	25°	50

Για την 11^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=260 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.9.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 11^η επίλυση είναι: FS= 1.77 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.18.



Εικόνα Β.18: Αποτελέσματα 11^{ης} επίλυσης

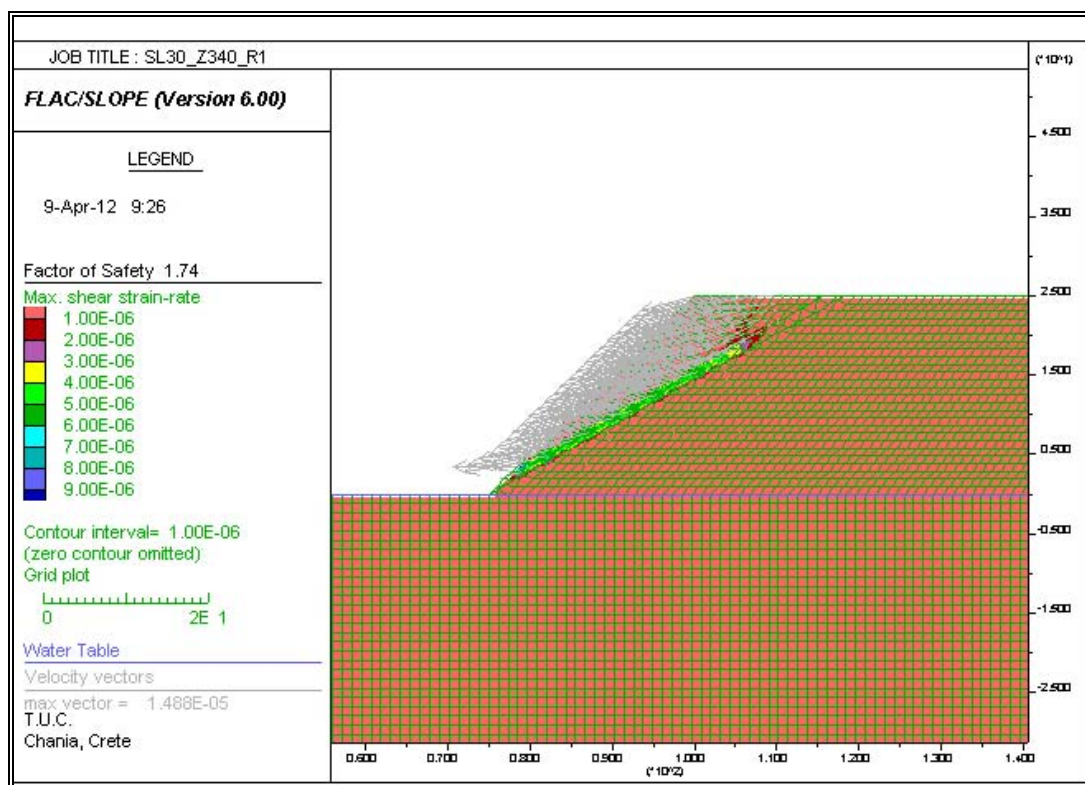
12^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	30°	50

Για τη 12^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=340 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.11.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 12^η επίλυση είναι: FS= 1.74 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.19.



Εικόνα 19: Αποτελέσματα 12^{ης} επίλυσης.

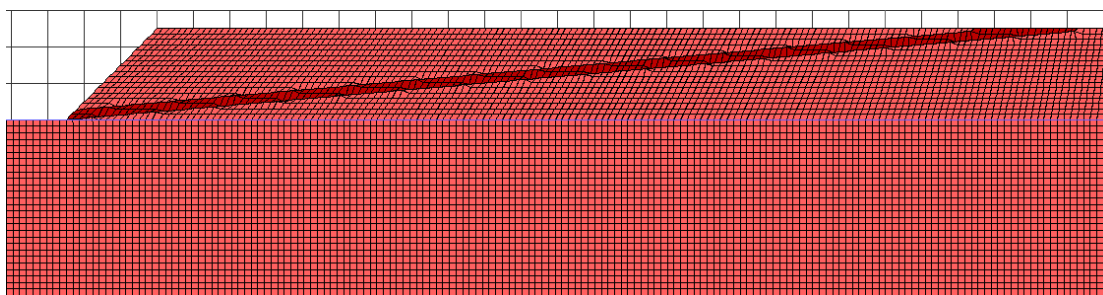
Οι επιλύσεις που ακολουθούν, αφορούν τα επόμενα 12 μοντέλα, κατά τα οποία το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης της αργίλου αυξάνεται και είναι ίσο με 2.5m. Οι ιδιότητες των υλικών για αυτή την ομάδα επιλύσεων, παρατίθενται στον Πίνακα Β1 στην αρχή αυτής της ενότητας.

13^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

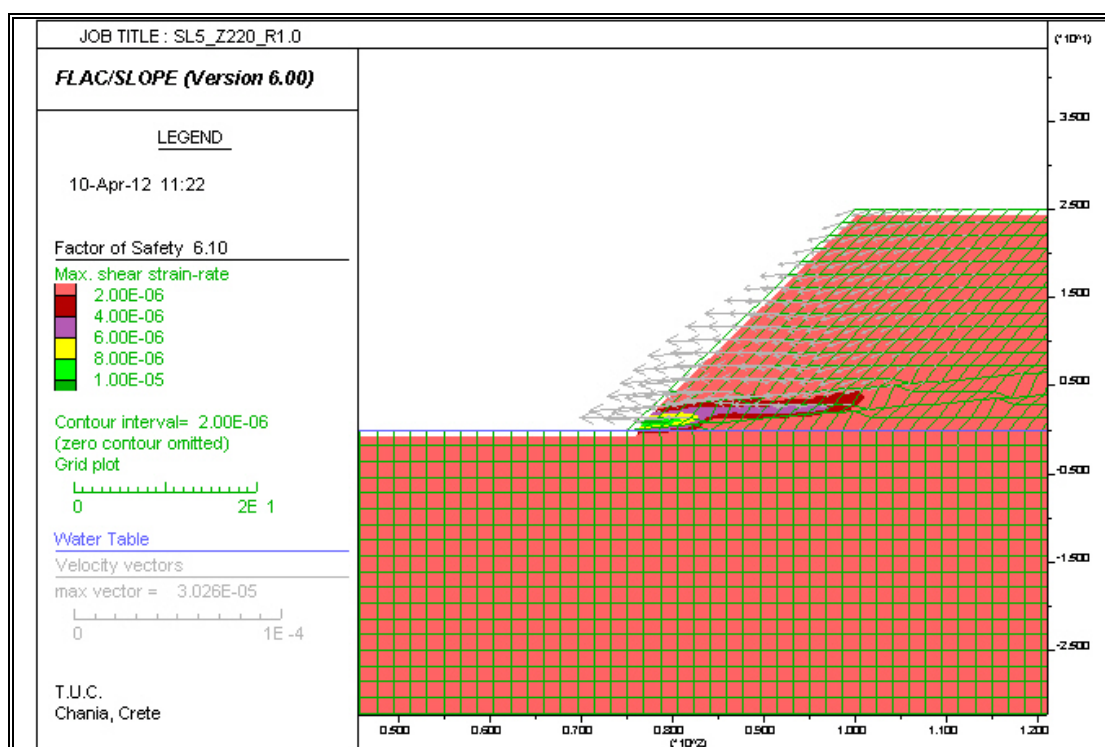
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	5°	150

Για τη 13^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=220 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.20.



Εικόνα B.20: Διακριτοποίηση 13^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 13^η επίλυση είναι: FS= 6.10 και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.21.



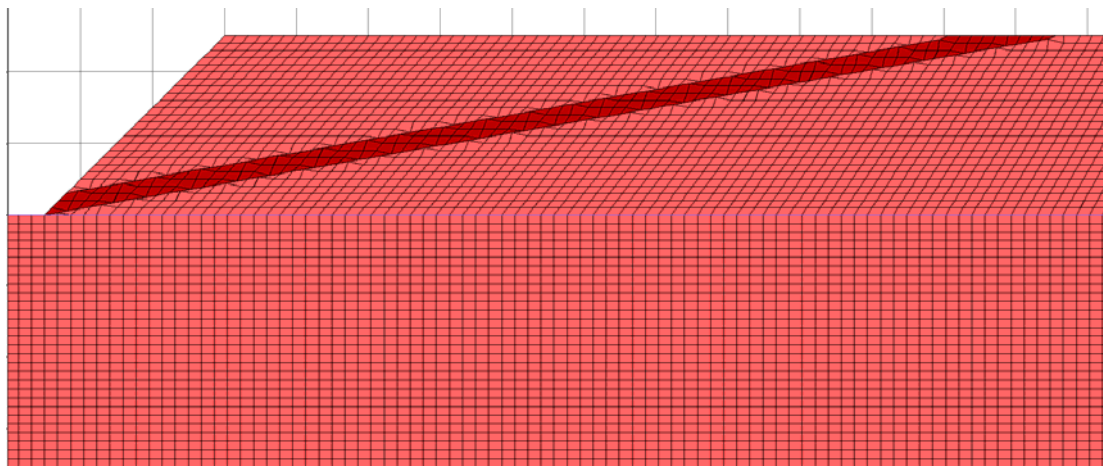
Εικόνα B.21: Αποτελέσματα 13^{ης} επίλυσης

14^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

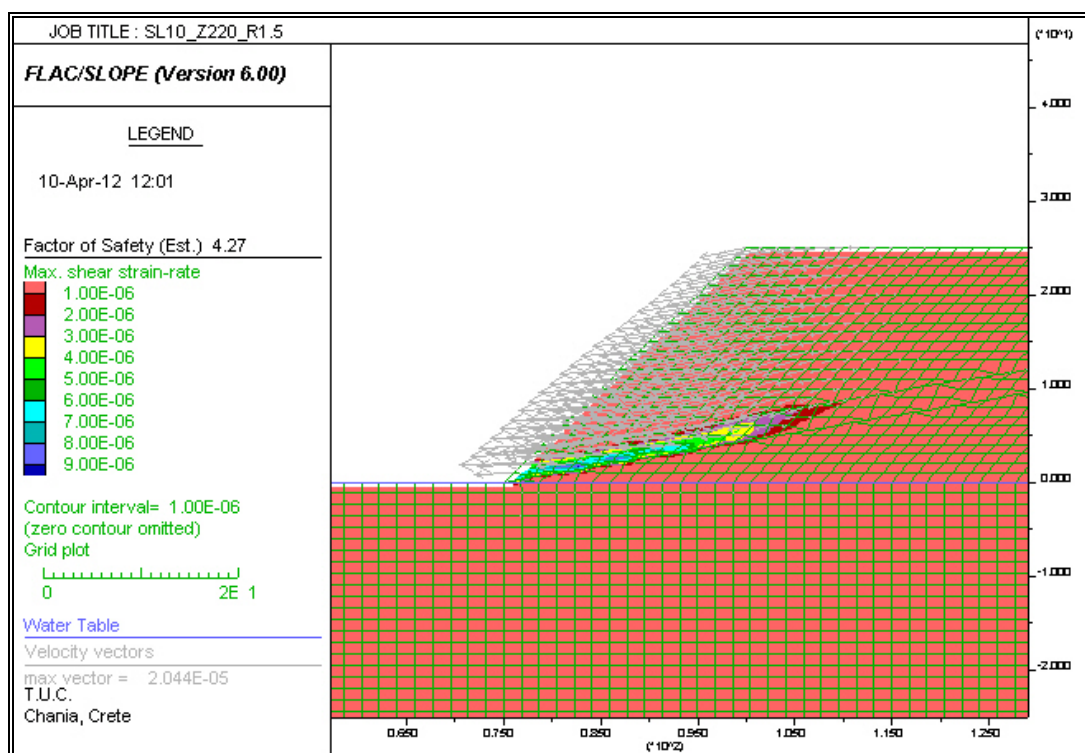
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	10°	150

Για τη 14^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=220$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα B.22).



Εικόνα B.22: Διακριτοποίηση 14^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 14^η επίλυση είναι: $FS= 4.27$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.23.



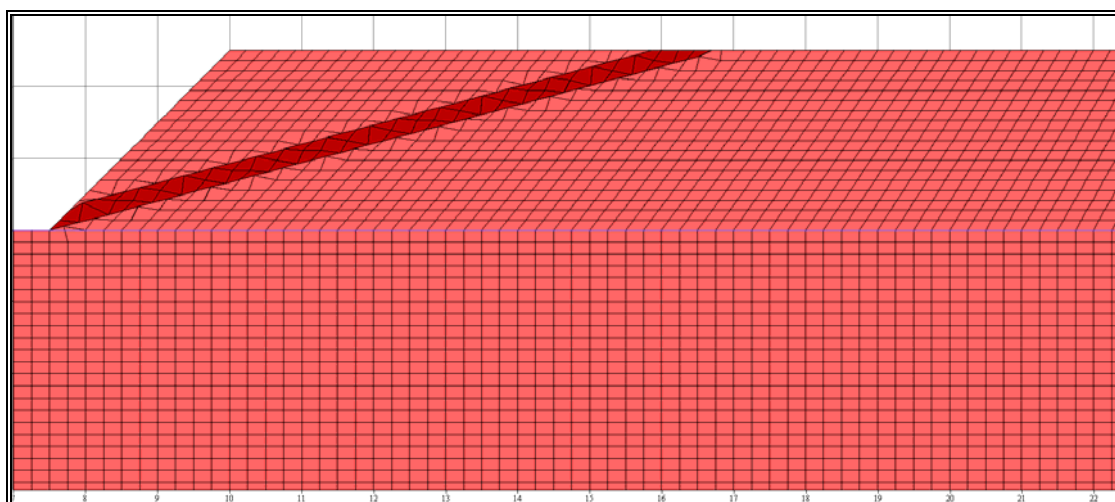
Εικόνα B.23: Αποτελέσματα 14^{ης} επίλυσης.

15^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

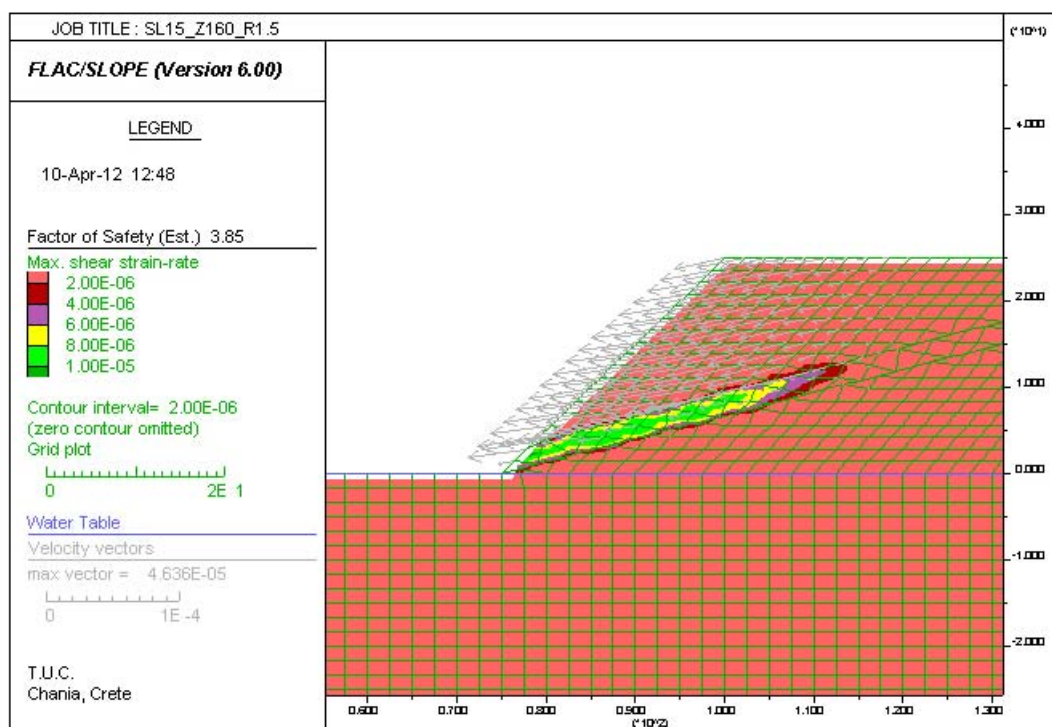
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	15°	150

Για τη 15^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=160$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα B.24).



Εικόνα B.24: Διακριτοποίηση 15^{ης} επίλυσης.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 15^η επίλυση είναι: $FS= 3.85$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.25.



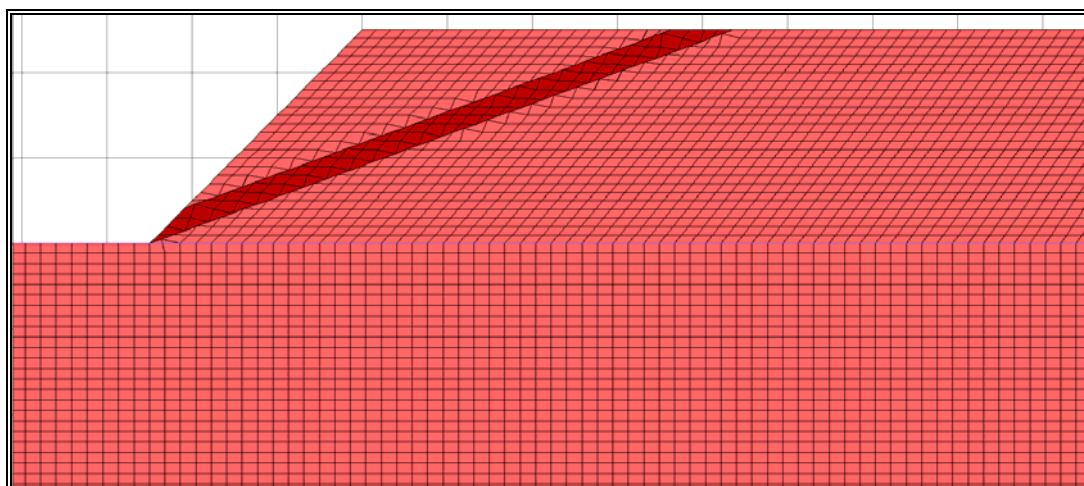
Εικόνα B.25: Αποτελέσματα 15^{ης} επίλυσης

16^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

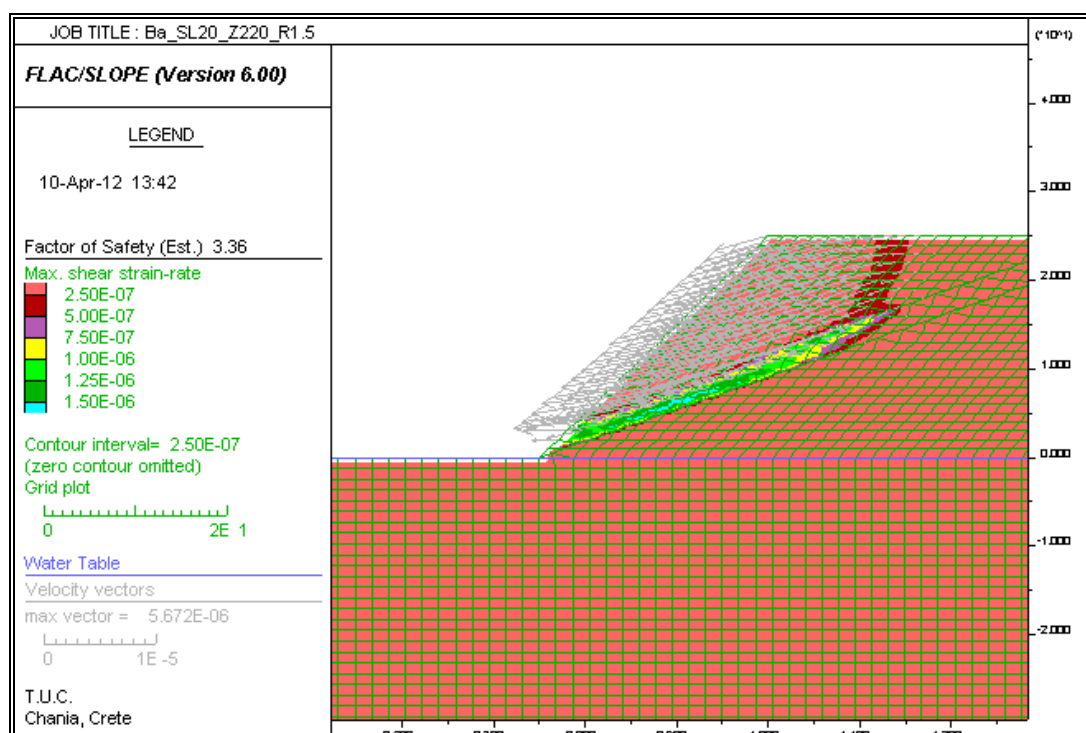
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	20°	150

Για τη 16^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=220 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα B.26).



Εικόνα B.26: Διακριτοποίηση 16^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 16^η επίλυση είναι: $FS = 3.36$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.27.



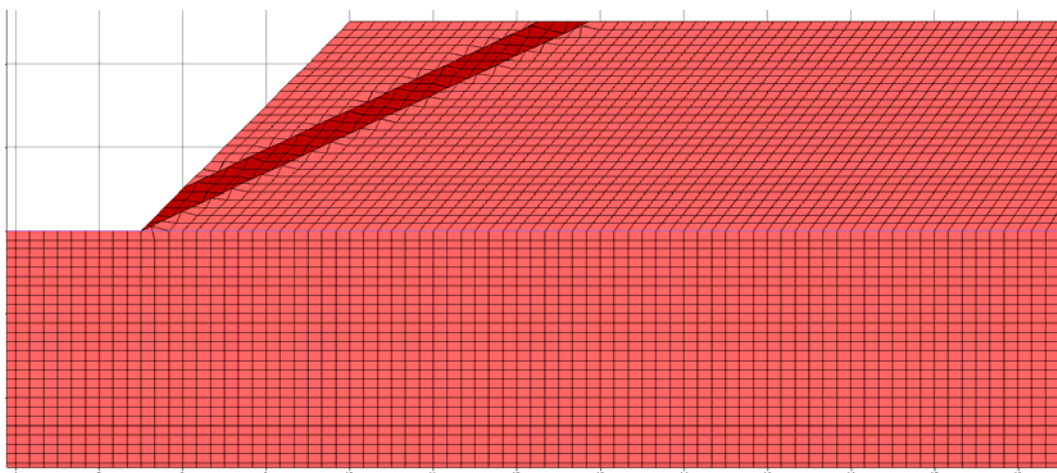
Εικόνα B.27: Αποτελέσματα 16^{ης} επίλυσης

17^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

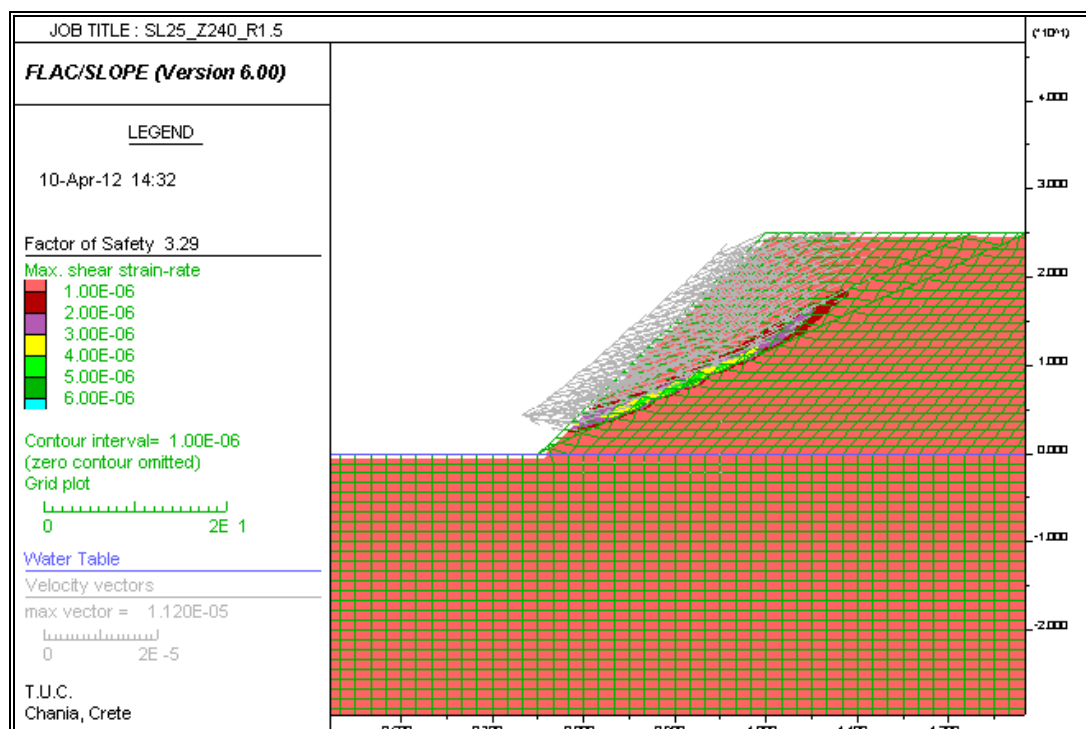
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m^2)
25,00	45°	25°	150

Για τη 17^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=240$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα B.28).



Εικόνα B.28: Διακριτοποίηση 17^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 17^η επίλυση είναι: $FS= 3.41$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.29.



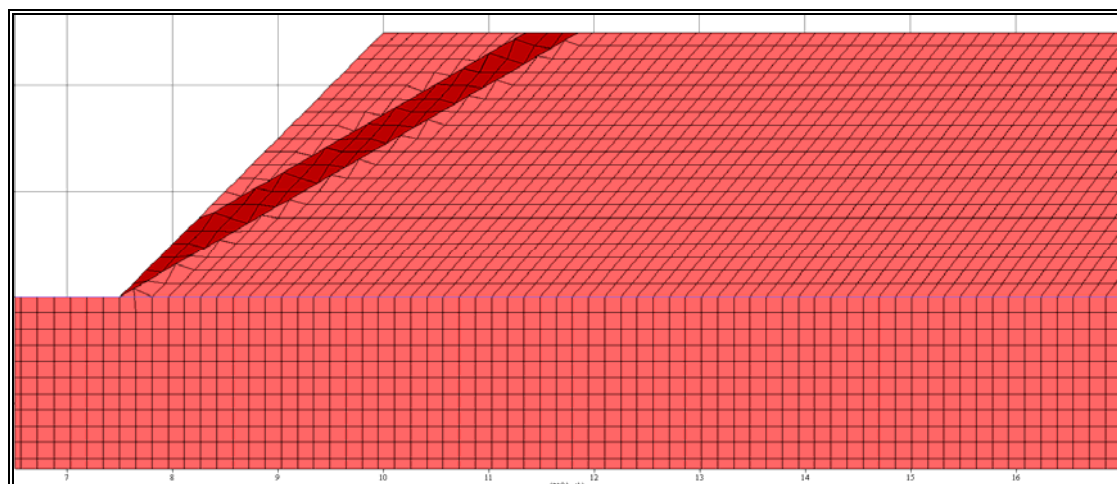
Εικόνα Β.29: Αποτελέσματα 17^{ης} επίλυσης

18^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

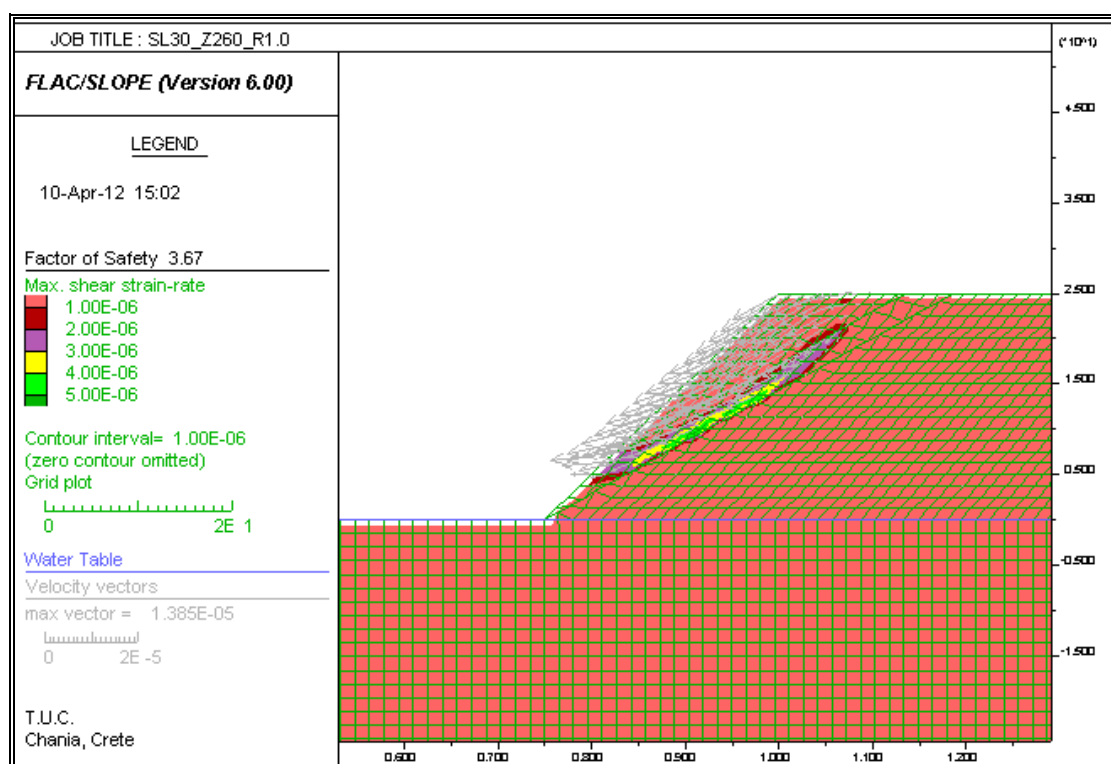
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	30°	150

Για τη 18^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι Z=260 και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1 (εικόνα Β.30).



Εικόνα B.30: Διακριτοποίηση 18^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 18^η επίλυση είναι: $FS = 3.67$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.31.



Εικόνα B.31: Αποτελέσματα 18^{ης} επίλυσης

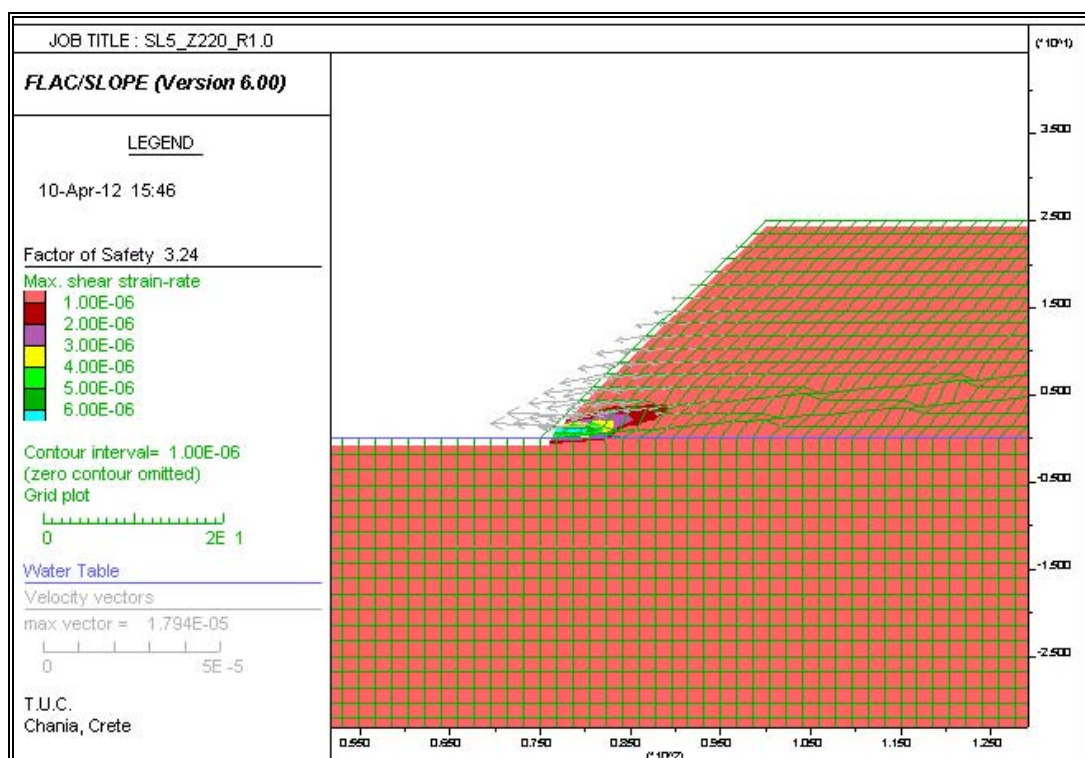
19^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	5°	50

Για τη 19^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=220$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα B.20.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 19^η επίλυση είναι: $FS= 3.24$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.32.



Εικόνα B.32: Αποτελέσματα 19^{ης} επίλυσης

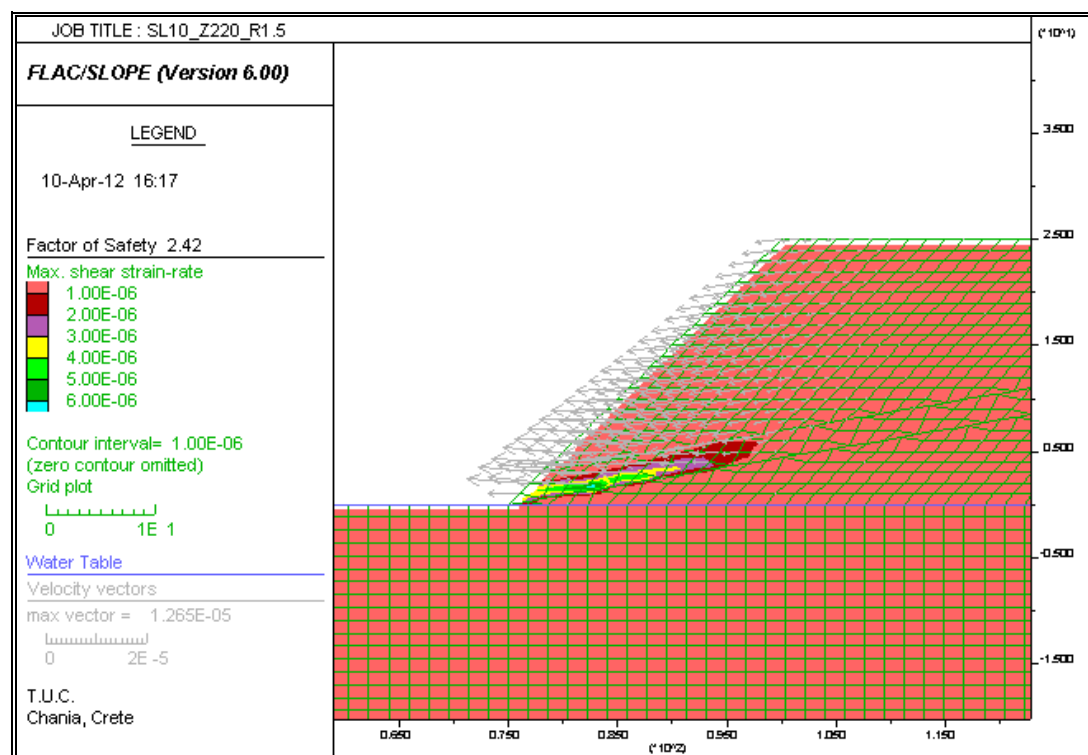
20^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	10°	50

Για την 20^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=220$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα B.22.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 20^η επίλυση είναι: $FS= 2.42$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.33.



Εικόνα B.33: Αποτελέσματα 20^{ης} επίλυσης

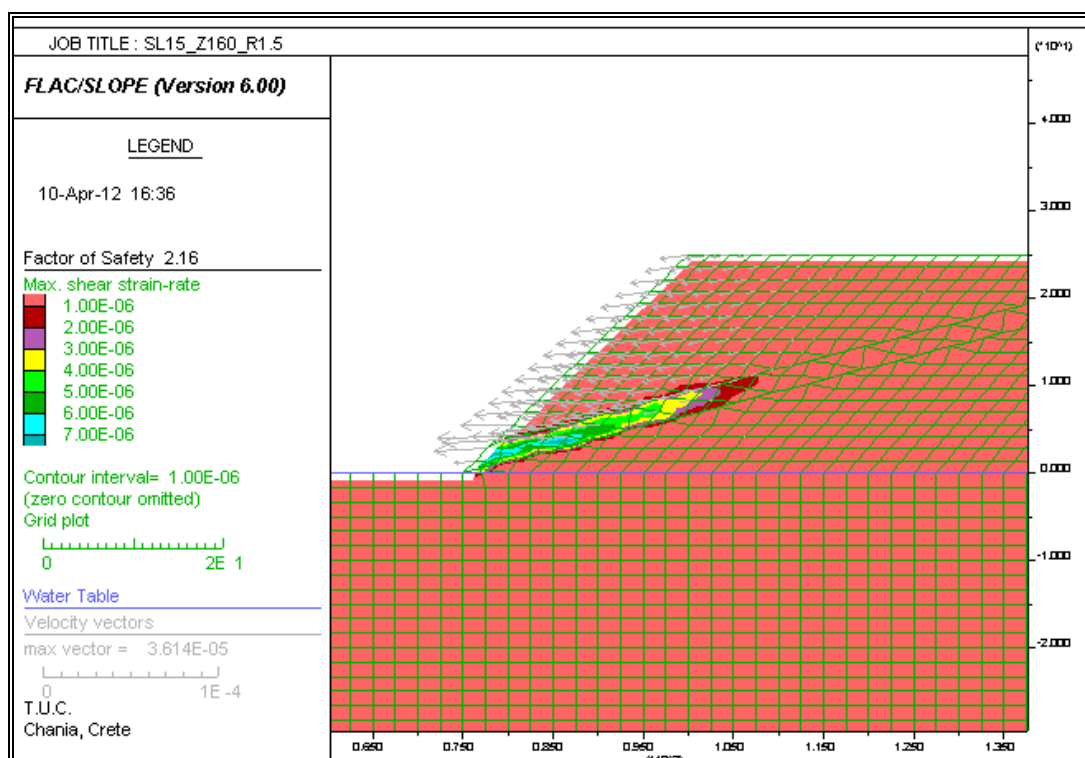
21^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	15°	50

Για την 21^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=160$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα B.24.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 21^η επίλυση είναι: $FS= 2.16$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.34.



Εικόνα B.34: Αποτελέσματα 21^{ης} επίλυσης

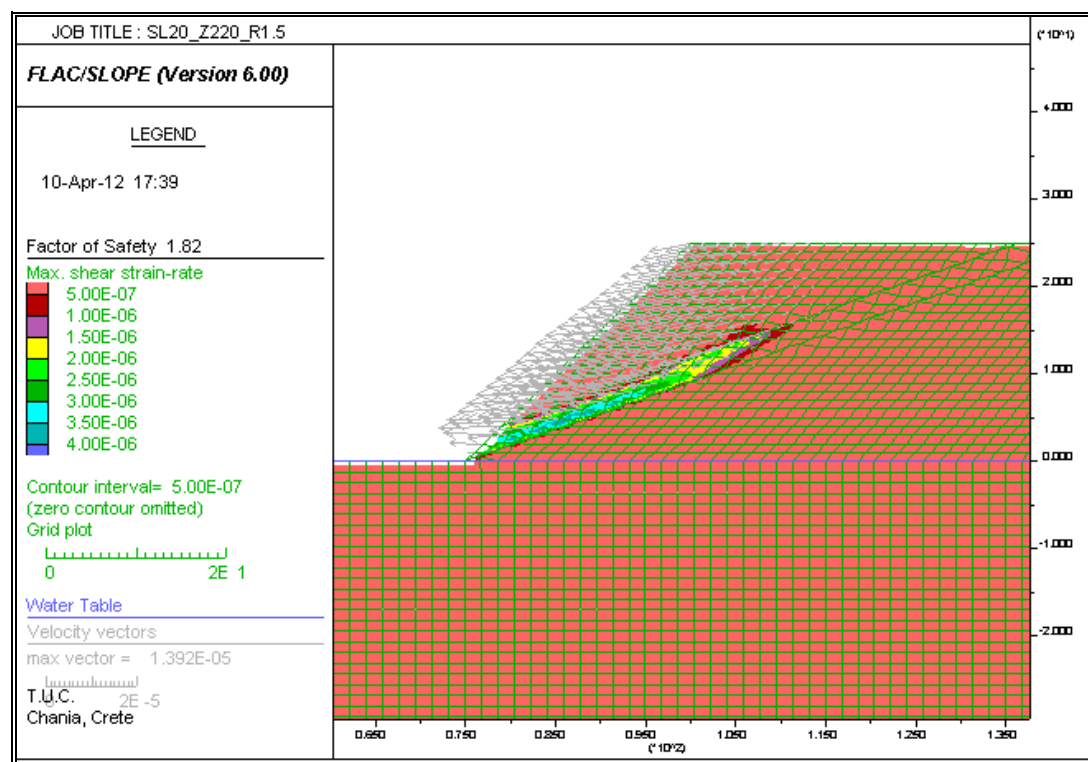
22^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	20°	50

Για την 22^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=220$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1, η οποία είναι ίδια με την εικόνα B.26.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 22^η επίλυση είναι: $FS= 1.82$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.35.



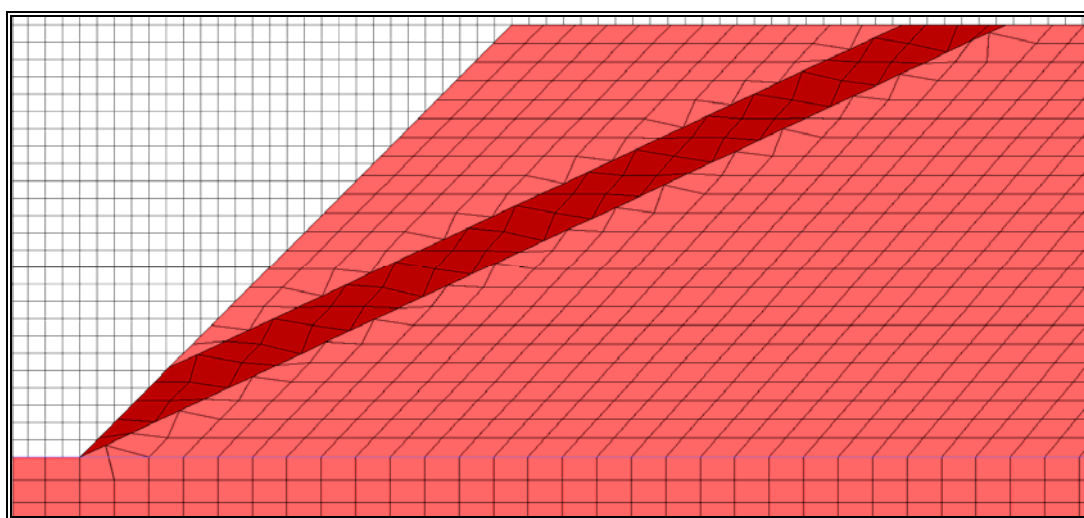
Εικόνα B.35: Αποτελέσματα 22^{ης} επίλυσης

23^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

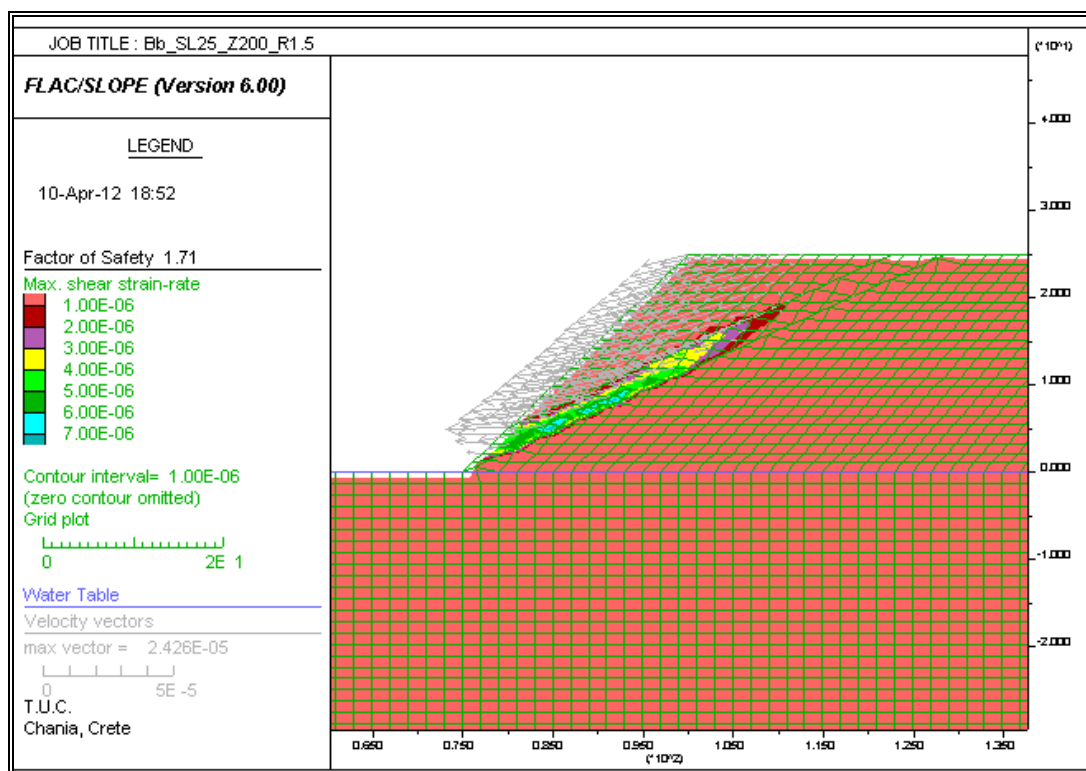
Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	25°	50

Για την 23^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=200$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1,5:1 (εικόνα B.36).



Εικόνα B.36: Διακριτοποίηση 23^{ης} επίλυσης

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 23^η επίλυση είναι: $FS= 1.71$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα B.37.



Εικόνα Β.37: Αποτελέσματα 23^{ης} επίλυσης

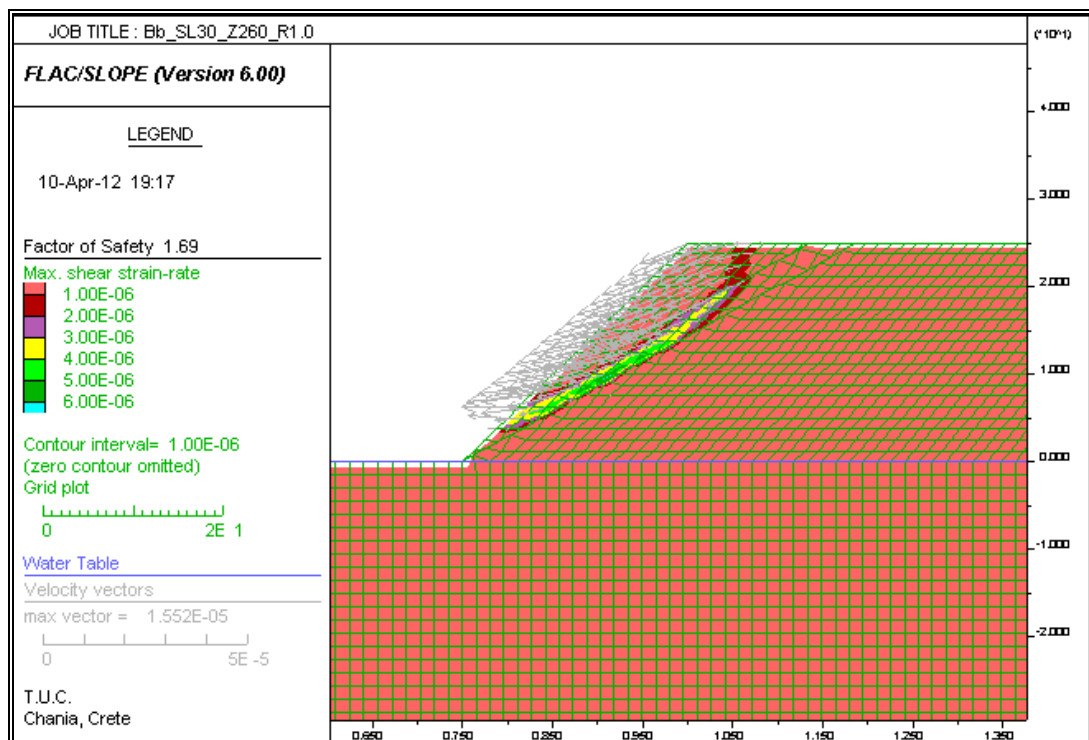
24^η ΕΠΙΛΥΣΗ

Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου:

Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς	Κλίση αργιλικής στρώσης	Συνοχή αργίλου (kN/m ²)
25,00	45°	30°	50

Για την 24^η επίλυση, ο αριθμός των ζωνών που επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του προτύπου, είναι $Z=260$ και ο λόγος των διαστάσεων των κυψελών του πλέγματος είναι 1:1 η οποία είναι ίδια με την εικόνα Β.30.

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την 24^η επίλυση είναι: $FS= 1.69$ και το γράφημα κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων που συγκεντρώνονται στην μάζα της αργιλικής στρώσης καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας μετατόπισης, απεικονίζεται στην εικόνα Β.38.



Εικόνα Β.38: Αποτελέσματα 24^{ης} επίλυσης