

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας

Τομέας Γεωλογίας-Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας



Διπλωματική Εργασία

Μπίρος Δημήτριος ΑΕΜ:4461

**ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ
ΠΡΑΝΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΟΛΑΣΣΑΣ.**



Επιβλέπων: Λέκτορας, Βασίλειος Μαρίνος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Λέκτορα Βασίλη Μαρίνο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την υπομονή, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους δικούς μου ανθρώπους για την υποστήριξη και την συμπαράσταση τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΜΕΡΟΣ Α – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	7
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	7
1.1 Ορισμός κατολίσθησης	7
1.2 Είδος υλικών	7
1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων.....	8
1.3.1 Καταπτώσεις.....	9
1.3.2 Ανατροπές.....	10
1.3.3 Ολισθήσεις.....	11
1.3.4 Πλευρικές εξαπλώσεις.....	14
1.3.5 Ροές.....	15
1.3.6 Σύνθετες μετακινήσεις πρανών.....	15
1.4 Ενεργότητα κατολισθήσεων.....	16
1.4.1. Τύπος ενεργότητας.....	17
1.5 Ταχύτητα μετακίνησης.....	17
1.6 Παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων.....	18
1.6.1 Γενικά.....	18
1.6.2 Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση.. κατολισθήσεων.....	19
1.7 Έναυσμα εκδήλωσης των κατολισθήσεων.....	20
1.7.1 Γενικά.....	20
1.7.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	24
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	24
2.1 Γενικά.....	24
2.2 Συντελεστής ασφαλείας πρανούς.....	25
2.3 Ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών.....	26
2.3.1 Ιδιότητες αντοχής εδαφών.....	26
2.4 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας.....	27
2.4.1 Ανάλυση της ευστάθειας με την μέθοδο των λωρίδων.....	27
2.4.2 Μέθοδος Fellenius.....	28
2.4.3 Μέθοδος Bishop.....	30
2.4.4 Μέθοδος Morgenstern and Price (1965).....	31
2.4.5 Μέθοδος Spencer (1967).....	31
2.5 Χαρακτηριστικά βραχώμαζας για την επίλυση ευστάθειας πρανών.....	33
2.5.1 Ορισμός βραχώμαζας.....	33
2.5.2 Διατμητική αντοχή βραχώμαζας.....	33
2.5.3 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών.....	34
2.5.4 Ο ρόλος των ασυνεχειών στην ευστάθεια των πρανών.....	35
2.5.5 Αστοχία βραχώμαζας.....	36
2.5.6 Γεωτεχνικές ιδιότητες βραχώμαζας.....	36

2.5.7 Κριτήριο αστοχίας Hoek and Brown για την βραχώμαζα.....	41
2.5.8 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	42
2.6 Ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών.....	43
2.6.1 Γενικά.....	43
2.6.2 Εκτίμηση δυνητικών ολισθήσεων.....	43
2.7 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας βραχωδών πρανών.....	45
2.7.1 Ανάλυση ευστάθειας σε επίπεδη ολίσθηση.....	45
2.7.2 Ανάλυσης ευστάθειας σε σφηνοειδή ολίσθηση.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	49
ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	49
3.1 Γενικά.....	49
3.2 Μέτρα προστασίας σε εδαφικά πρανή.....	49
3.2.1 Αποφυγή του προβλήματος.....	49
3.2.2 Εκσκαφή – διαμόρφωση πρανών.....	49
3.2.3 Αποστράγγιση.....	50
3.2.4 Αντιστήριξη.....	51
3.3 Μέτρα προστασίας σε βραχώδη πρανή.....	52
3.3.1 Γενικά.....	52
3.3.2 Αγκυρώσεις.....	52
3.3.3 Τοίχοι.....	53
3.3.4 Εκτοξευμένο σκυρόδεμα.....	53
3.3.5 Αποστράγγιση.....	53
3.3.6 Αλλαγή κλίσης – φόρτισης.....	53
3.3.7 Ξεσκάρωμα βράχων.....	53
3.3.8 Πλέγματα συγκράτησης.....	53
ΜΕΡΟΣ Β – ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	
ΜΟΛΑΣΣΙΚΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	55
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	55
4.1 Γενικά.....	55
4.2 Μολασσικά ιζήματα Ελλάδας.....	56
4.3 Λιθολογία μολασσικών σχηματισμών.....	58
4.4 Τεκτονισμός.....	61
4.5 Αποσάθρωση.....	61
4.6 Υδρογεωλογικό καθεστώς.....	63
4.7 Γεωλογικό προφίλ συμπερασμάτων μολασσικών σχηματισμών.....	64
4.8 Η γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	68
ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ	
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	68
5.1 Γενικά.....	68
5.2 Εργαστηριακές δοκιμές.....	69
5.3 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σύνθετης και ασθενή	
βραχώμαζας.....	70

5.3.1 Εναλλαγές ικανών – μεγάλης γενικά αντοχής-ψαμμιτικών πάγκων και μη ικανών-μικρής γενικά αντοχής – ιλυολιθικών, αργιλοσχιστολιθικών στρωμάτων.....	70
5.3.2 Αλλαγή δομής και συμπεριφοράς προς το βάθος.....	71
5.3.3 Παρουσία ιλυολιθικών-αργιλικών πετρωμάτων (ιλυόλιθοι, μάργες, αργιλόλιθοι).....	72
5.3.4 Ασθενής διαγένεση.....	72
5.3.5 Αποσάθρωση των ιλυολιθικών – αργιλικών μελών στην επιφάνεια.....	72
5.3.6 Επίδραση των υπογείων υδάτων	72
5.4 Γεωτεχνική αξιολόγηση.....	73
5.4.1 Εδαφικοί σχηματισμοί.....	73
5.4.2 Βραχώδεις σχηματισμοί.....	75
5.5 Διαγράμματα δείκτη ποιότητας αντοχής RQD σε συνάρτηση με το βάθος.....	78
5.6 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της μολάσας.....	80
5.6.1 Γενικά.....	80
5.7 Διαγράμματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c σε συνάρτηση με το βάθος.....	81
5.8 Ιστογράμματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c	83
5.8.1 Διορθωμένες τιμές μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c – ιστογράμματα.....	85
5.9 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά ανά τύπο βραχώμαζας.....	88
5.10 Ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση το γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI.....	93
5.10.1 Βαθμονόμηση της βραχώμαζας μολασσικών σχηματισμών στο βάθος.....	93
5.10.2 Βαθμονόμηση της βραχώμαζας μολασσικών σχηματισμών στην επιφάνεια.....	95
5.11 Ταξινόμηση ανά τύπο βραχώμαζας.....	96
5.12 Διαγράμματα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI σε συνάρτηση με το βάθος.....	97
5.13 Ιστογράμματα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI.....	100
5.14 Συνοπτικά αποτελέσματα γεωτεχνικών παραμέτρων μολασσικής βραχώμαζας.....	102
5.15 Αποτελέσματα συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ για τους κυριότερους τύπους μολασσικής βραχώμαζας.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	107
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	107
6.1 Γενικά.....	107
6.2 Παρουσίαση αναλύσεων.....	109
ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	120
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	122

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατολισθήσεις όπως είναι γνωστό, είναι ένα φαινόμενο που απασχόλησε αρκετά τον άνθρωπο ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, όπου μπόρεσε και αύξησε την τεχνογνωσία του τόσο γεωλογικά όσο και τεχνικογεωλογικά και μπόρεσε να ερμηνεύσει και να αναλύσει αυτό το φαινόμενο. Η μελέτη των κατολισθήσεων ήταν επιτακτική ανάγκη καθώς έχει άμεσες επιπτώσεις στην ζωή του αλλά και γενικότερα στο περιβάλλον όπου κινείται και αναπτύσσεται. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που ακούμε για κατολισθήσεις ή για καταπτώσεις βράχων που έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζώων, τόσο στον ελλαδικό χώρο όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Επομένως η μελέτη και η κατανόηση του μηχανισμού των κατολισθήσεων είναι αρκετά σημαντική για την αποφυγή δυσάρεστων ατυχημάτων.

Η παρούσα εργασία έχει σαν σκοπό την έρευνα των αιτιών των κατολισθήσεων σε πρηνή ιζημάτων μολάσσας, καθώς επίσης και την ανάλυση ευστάθειας τους. Γενικά οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων μπορεί να αναζητηθούν στην μορφολογία των πρηνών, στην παρουσία νερού, σε μετεωρολογικούς και κλιματικούς παράγοντες σεισμική δραστηριότητα κ.α.

Ο σχηματισμός της μολάσσας αποτελείται από εναλλαγές ιζημάτων ψαμμίτη, ιλυολίθου και κροκαλοπαγών. Παρουσιάζει μία ετερογένεια ως προς την λιθολογία του. Επίσης η απόθεση αυτών των ιζημάτων έγινε σε ήρεμο τεκτονικό περιβάλλον γεγονός που δηλώνει ότι ο σχηματισμός της μολάσσας δεν έχει τεκτονιστεί και δεν παρουσιάζει σημαντικά ρήγματα και πτυχώσεις σε αντίθεση με τον φλύσχη.

Από τεχνικογεωλογική άποψη ένα από τα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται είναι κυρίως, η αποδιοργανωμένη και σχιστοποιημένη μορφή σε μικρά επιφανειακά βάθη και η συμπαγής δομή σε μεγαλύτερα βάθη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά της βραχώμαζας στην επιφάνεια και στο βάθος. Οπότε κατά την ανάλυση ευστάθειας, γίνεται η προσομοίωση του πρηνούς και των παραπάνω συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης και καθορίζεται κατά πόσο είναι ασφαλές το πρηνές.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Ο Το πρώτο μέρος αφορά το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο χωρίζεται σε 3 κεφάλαια και είναι πολύ χρήσιμο για την κατανόηση και την συνέχιση των μετέπειτα κεφαλαίων καθώς σε αυτό αναφέρονται: ορισμός της κατολίσθησης, ταξινόμηση κατολισθήσεων, ενεργότητα κατολισθήσεων, ταχύτητα μετακίνησης της κατολίσθησης, παράγοντες που συμβάλλουν στην έναρξη αυτής, ανάλυση ευστάθειας εδαφικών αλλά και βραχωδών πρηνών καθώς και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και των κυριότερων μηχανικών παραμέτρων. Τέλος γίνεται και μία αναφορά στα μέτρα προστασίας και αντιστήριξης των πρηνών από κατολισθητικά φαινόμενα και καταπτώσεις βράχων.
- Ο Το δεύτερο μέρος αφορά το γεωλογικό περιβάλλον των μολασσικών σχηματισμών με την γενικότερη έννοια καθώς και την γεωλογία της περιοχής – μελέτης. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λόγος για τα χαρακτηριστικά της μολάσσας, δηλαδή την λιθολογία της, τον τεκτονισμό της, το υδρογεωλογικό καθεστώς καθώς και την γεωγραφική της εξάπλωση στον ελλαδικό χώρο.

Επίσης γίνεται λόγος για τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των μολασσικών σχηματισμών καθώς και την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά αυτών. Οι παραπάνω πληροφορίες προέρχονται από τα εργαστηριακά δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, από όπου προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα από ένα σύνολο πινάκων, διαγραμμάτων και ιστογραμμάτων.

- ο Στο τρίτο μέρος, γίνεται ανάλυση ευστάθειας των πρανών σύμφωνα με τα αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από το προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτή η μελέτη γίνεται με την χρήση προγράμματος SLIDE 5.0 της Rocscience.

Τέλος σαν επίλογος της εργασίας, συνοψίζονται τα βασικά σημεία και εξάγονται συμπεράσματα τόσο για την λιθολογική όσο και την τεχνικογεωλογική ετερογένεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διάκριση των μολασσικών σχηματισμών σε 6 διαφορετικούς τεχνικογεωλογικούς τύπους. Αυτή η διάκριση είναι αρκετά σημαντική για το τελικό μοντέλο ευστάθειας πρανούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

1.1 Ορισμός κατολίσθησης

Ο όρος «κατολίσθηση» αποτελεί την απόδοση του αντίστοιχου αγγλικού όρου «Landslide» ο οποίος ετυμολογικά δεν ανταποκρίνεται με ακρίβεια στο γενικότερο φαινόμενο, καθόσον εκτός της ολίσθησης μπορεί να περιλαμβάνει η πτώση, η ανατροπή ή ακόμα και η ροή. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει όχι μόνο στην ξηρά αλλά και μέσα σε λίμνες, ταμιευτήρες και θάλασσες.

Με την γενική έννοια του όρου, κατολίσθηση είναι κάθε αλλαγή μεγάλη ή μικρή της επιφάνειας μια κλιτύς, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού, με ρήξη ή όχι της συνέχειας της, αργή ή ξαφνική που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας και οφείλεται σε τεχνικά ή φυσικά πρηνή. Η κατολίσθηση εκφράζει το αποτέλεσμα αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους και είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την πλήρη παύση ή επιβράδυνση του φαινομένου.

1.2 Είδος υλικών

Πολύ σημαντικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό μιας κατολίσθησης είναι τα γεωυλικά που εμφανίζονται σε αυτήν.

Με κριτήριο την μηχανική τους συμπεριφορά αυτά μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι το **έδαφος** και το **πέτρωμα**.

Σαν **έδαφος** μπορεί να οριστεί το συσσωμάτωμα κόκκων που είτε έχει σχηματιστεί επί τόπου από την επίδραση εξωτερικών παραγόντων (καιρός, άνθρωπος) στο προϋπάρχον πέτρωμα (*αυτόχθονα εδάφη*) είτε με την μεταφορά κόκκων με φυσικές διαδικασίες στη θέση που βρίσκονται (*ιζηματογενή εδάφη*).

Γενικά είναι ασταθές ως γεωυλικό, δημιουργεί αξιόλογους υδροφόρους ορίζοντες και υδροστατικές πιέσεις ή πιέσεις πόρων με αποτέλεσμα να δίνει συχνά κατολισθητικά φαινόμενα. Άρα σε συνδυασμό με γεωμορφολογικές ή άλλες συνθήκες είναι επικίνδυνα για την εκτέλεση κατασκευαστικών έργων

Οι μετακινήσεις του εδάφους μπορούν εν γένει να πλήξουν:

- Ορεινά ή πεδινά χωριά έως και μεγάλες αστικές περιοχές
- Στοές μεταλλείων
- Οδοποιία και σήραγγες
- Φράγματα αν η κατολίσθηση συμβεί στα αντερείσματα ή στον ταμιευτήρα του φράγματος
- Δίκτυα κοινής ωφέλειας και υποθαλάσσιες κατασκευές (περίπτωση αστοχίας πρανών κυρίως λόγω σεισμού κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας).

Ως **πέτρωμα** μπορεί να οριστεί το συσσωμάτωμα κόκκων που έχει συγκολληθεί και παρουσιάζει αξιόλογη αντοχή. Γενικά είναι πιο σταθερά από τα εδάφη, η τελική συμπεριφορά του όμως εξαρτάται από την ένταση, τον προσανατολισμό και την πυκνότητα των ρωγμών και των ασυνεχειών. Οι κατολισθήσεις που συμβαίνουν στα πετρώματα οφείλονται κυρίως στην ύπαρξη μιας ή περισσότερων κυρίαρχων ασθενών επιφανειών ασυνέχειας πάνω στην οποία συμβαίνει η αστοχία αλλά ακόμα και στον έντονο κερματισμό του πετρώματος.

1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Ο VARNES (1978) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων που περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν σε πρανή εκτός βέβαια των καθιζήσεων. Τα βασικά κριτήρια ταξινόμησης είναι:

- i. Ο τύπος της μετακίνησης
- ii. Το είδος του μετακινούμενου υλικού

Ανάλογα με τον τύπο της μετακίνησης διακρίνονται:

- Καταπτώσεις
- Ανατροπές
- Ολισθήσεις
- Πλευρικές εξαπλώσεις
- Ροές
- Σύνθετες μορφές

Ανάλογα με το είδος της μετακίνησης του γεωλογικού υλικού που μετακινείται διακρίνονται κινήσεις οι οποίες εκδηλώνονται:

- Στο βραχώδες υπόβαθρο
- Στους εδαφικούς σχηματισμούς που διακρίνονται σε κορήματα και σε γαίες

Στη συνέχεια δίνεται μια σχετικά συνοπτική περιγραφή κάθε τύπου μετακινήσεις σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του VARNES.

Πίνακας 1.1 Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν τη μετακίνηση)	
		Υπόβαθρο	Έδαφος
			Επικρατούν τα αδρομερή υλικά Επικρατούν τα λεπτόκοκκα υλικά
Πτώσεις		Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Κάθιση βράχων	Κάθιση κορημάτων γαιών
	Μεταθετικές	Ολίσθηση τεμάχους Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση τεμάχους γαιών Ολίσθηση κορημάτων γαιών
Πλευρικές εκτάσεις		Έκταση βράχων	Έκταση κορημάτων γαιών
Ροές		Ροή βράχων	Ροή κορημάτων γαιών
		(Βαθύς ερπυσμός)	(ερπυσμός εδάφους)
Σύνθετες		Συνδυασμός δυο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακίνησης	

1.3.1 Καταπτώσεις (Πτώσεις)

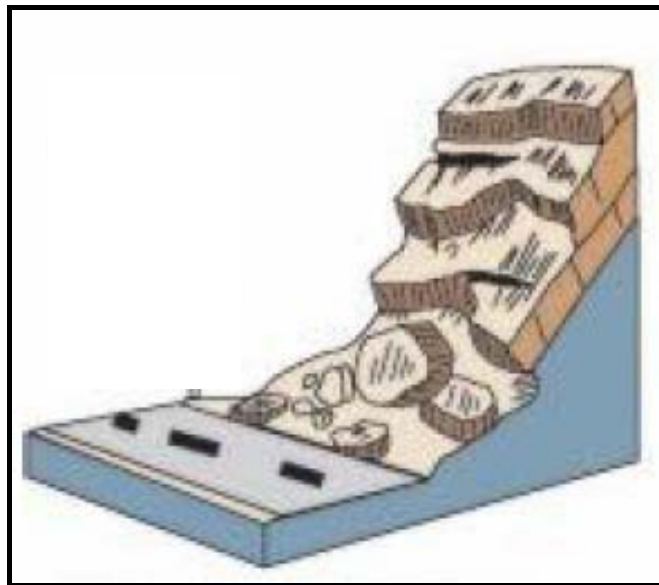
Στις καταπτώσεις, μία μάζα (κυρίως πετρώματος αλλά και συνεκτικού εδάφους) οποιουδήποτε μεγέθους, αποσπάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας χωρίς ή ελάχιστη διατμητική μετατόπιση και πτώση γίνεται κυρίως ελεύθερα με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρανούς. Η μετακίνηση είναι εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατό να έχουν προηγηθεί αυτής μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα. Το φαινόμενο των καταπτώσεων είναι συνηθισμένο στα απότομα πρανή πολύ συνεκτικών εδαφών ή βράχων τα οποία υποσκάπτονται από την ενέργεια θαλάσσιων κυμάτων ή το ρεύμα ποταμών ή ακόμα από την ανθρώπινη παρέμβαση.

Στην περίπτωση των καταπτώσεων βράχων η μάζα που μετακινείται είναι η μάζα βράχων που αποσπάστηκαν από μία περιοχή του υποβάθρου, ενώ οι πιο συχνές περιπτώσεις αναφέρονται σε:

- i. **Εναλλαγές συμπαγών και λιγότερο συμπαγών πετρωμάτων**
- ii. **Συμπαγή πετρώματα με δυσμενή γεωμετρία ασυνεχειών**

Στην περίπτωση καταπτώσεων κορημάτων η μάζα που αποκολλάται είναι κορήματα, τα οποία αποτελούνται από θραύσματα που δημιουργήθηκαν πριν από την εμφάνιση του φαινομένου της μετακίνησης.

Τέλος η κατάπτωση γαιών (ή εδάφους) είναι αρκετά σπάνιο φαινόμενο καθόσον τα υλικά κατά κανόνα υπόκεινται στους άλλους τύπους μετακίνησης.



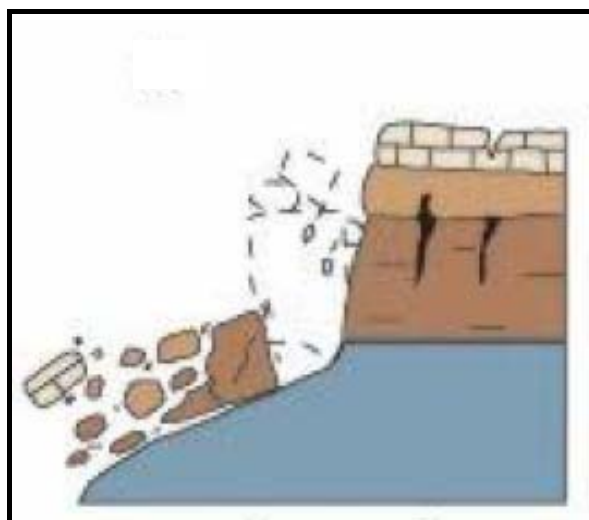
Σχήμα 1.1 Καταπτώσεις βράχων
(από Κ.Λουπασάκης, 2011).

1.3.2 Ανατροπές

Στις ανατροπές η κίνηση είναι μία προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες κυρίως πρανές, γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από ένα κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από την βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές. Η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή στα πρώτα στάδια και να μετατραπεί εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια.

Οι GOODMAN and BRAY (1976) και στη συνέχεια οι HOEK and BRAY(1977) με βάση τους μηχανισμούς που συμβάλουν στην εκδήλωση των ανατροπών στους βραχώδεις κυρίως σχηματισμούς πρότειναν την παρακάτω ταξινόμηση:

- Ανατροπή λόγω κάμψης (το σκληρό πέτρωμα αποχωρίζεται σε κολώνες λόγω της ύπαρξης ενός καλά αναπτυγμένου συστήματος ασυνεχειών)
- Ανατροπή τεμαχίων (ανάλογη περίπτωση με την προηγούμενη με την διαφορά ότι η θραύση και η ανατροπή έρχεται λόγω της παρουσίας ενός δεύτερου συστήματος ασυνεχειών.
- Ανατροπή τεμαχίων λόγω κάμψης (σε απότομα βραχώδη πρανή μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική κάμψη των πετρωμάτων κατά μήκος μιας καλά διαμορφωμένης επιφάνειας)
- Δευτερογενείς ανατροπές (στην κατηγορία αυτή εντάσσονται περιπτώσεις που προκαλούνται κυρίως από υποσκαφή της βάσης του πρανούς λόγω φυσικών διεργασιών. Οι πιο συχνές από τις περιπτώσεις αυτές είναι:
 - Ανατροπή του πόδα λόγω ολίσθησης των ανώτερων στρωμάτων
 - Ανατροπή της βάσης λόγω ολίσθησης
 - Ανατροπή των ανώτερων στρωμάτων λόγω ολίσθησης
 - Ανατροπή λόγω της παρουσίας εφελκυστικών ρωγμών
 - Κυκλοειδής ολίσθηση και ανατροπή



Σχήμα 1.2 Ανατροπή βράχων
(από Κ. Λουπασάκης, 2011)

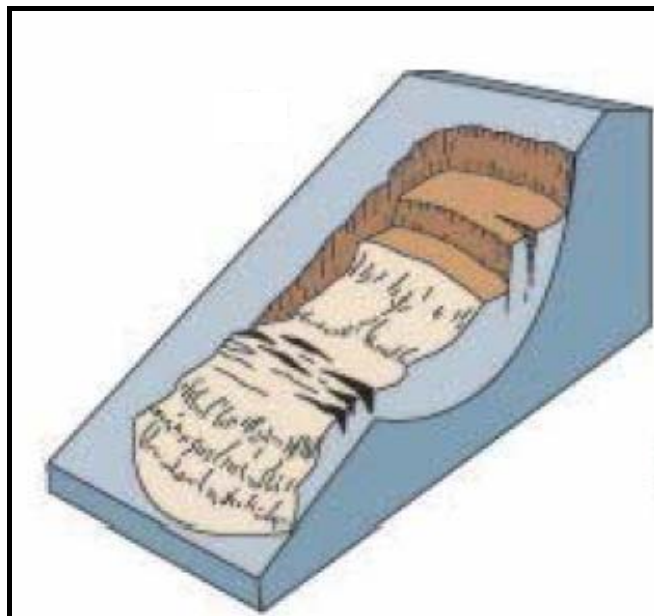
1.3.3 Ολισθήσεις

Στις ολισθήσεις, η μετακίνηση προϋποθέτει κυρίως διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση – θραύση του υλικού κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών που μπορεί να είναι ορατές ή όχι και να εκδηλώνονται μέσα σε μία σχετικά στενή ζώνη. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή η διατμητική θραύση να μην συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια που θα αποτελέσει τελικά την επιφάνεια θραύσης, αλλά επεκτείνεται διαδοχικά πέρα από την αρχική περιοχή τοπικής θραύσης. Η μάζα που θα μετατοπίζεται μπορεί να ολισθήσει προς τα κατάντη απομακρυνόμενη από την αρχική επιφάνεια θραύσης.

Στους βραχώδεις σχηματισμούς η ολίσθηση μπορεί να συνίσταται από μετατόπιση - μετακίνηση επάνω σε καλά διαμορφωμένες επιφάνειες ασυνεχειών (στρώση, διάκλαση, σχιστότητα κ.λπ.), χωρίς να παρατηρείται πρωτογενής θραύση του υλικού οπότε και η επιφάνεια ολίσθησης να είναι σαφώς καθορισμένη. Έτσι, είναι δυνατό η ολισθαίνουσα μάζα να κινηθεί πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης, η οποία και αποτελεί πλέον μία επιφάνεια διαχωρισμού για τη μετακινούμενη μάζα. Η μετακινούμενη μάζα μπορεί να παραμείνει ενιαία κατά την ολίσθηση ή να διαχωριστεί σε μικρότερες ανεξάρτητα κινούμενες μάζες.

Οι ολισθήσεις, ανάλογα με την μορφή της επιφάνειας ολίσθησης καθώς και το μηχανισμό μετακίνησης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- a) **Περιστροφικές ολισθήσεις**
- b) **Μεταθετικές ολισθήσεις**



Σχήμα 1.3 Περιστροφική ολίσθηση
(από Κ. Λουπασάκης, 2011)

α) Περιστροφικές ολισθήσεις

Οι περιστροφικές ολισθήσεις γίνονται συνήθως κατά μήκος κοίλων προς τα πάνω επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας. Το ανώτερο τμήμα της μετακινούμενης μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω με μία μικρή κάμψη προς τα πίσω, λόγω της περιστροφικής κίνησης, ενώ στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση (φούσκωμα).

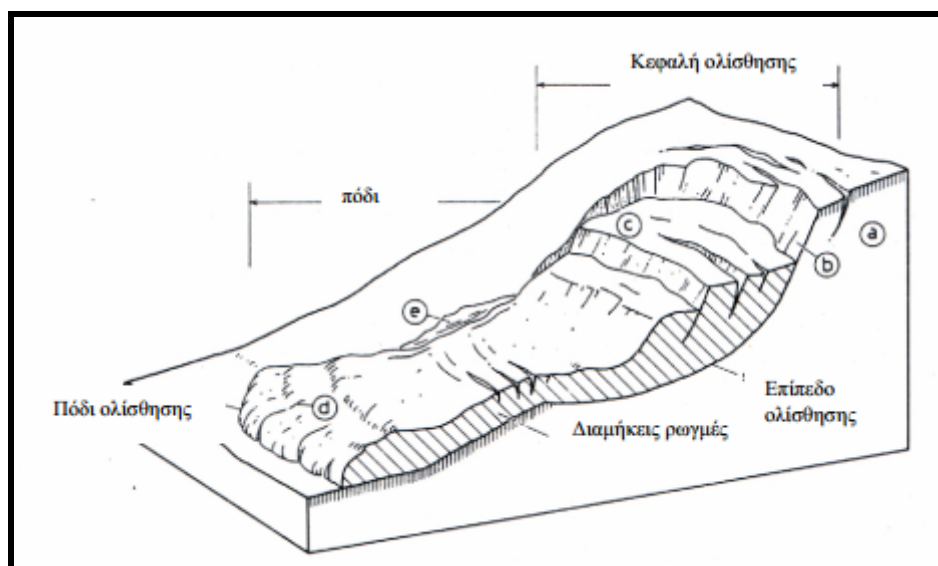
Στην περίπτωση περιστροφικών ολισθήσεων μεγάλου μήκους η ολίσθηση γίνεται πάνω σε μία κυλινδρική επιφάνεια όπου ο άξονάς της θεωρείται παράλληλος προς την περιστροφή της κατολίσθησης. Οι περιστροφικές κατολίσθησεις εκδηλώνονται κυρίως σε ομογενή εδαφικά υλικά και συνήθως το μήκος τους είναι 3-7 φορές το βάθος τους. Επίσης μπορούν να εκδηλωθούν σε έντονα ασυνεχείς βραχώμαξες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν σαν ισότροπες.

Συνήθως οι πρώτες ενδείξεις πριν την εκδήλωση μιας περιστροφικής κατολίσθησης είναι η εμφάνιση τοξοειδών ρωγμών στο έδαφος, κατά μήκος των οποίων θα αναπτυχθεί η κύρια κατακρήμνιση με τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της ολίσθησης.

Σε μια τυπική περιστροφική ολίσθηση η **κύρια ουλή** είναι η επιφάνεια που οριοθετεί προς τα ανάντι το αδιατάρακτο έδαφος που βρίσκεται γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης και προκαλείται από την απομάκρυνση της ολισθαίνουσας μάζας. Η προέκταση της επιφάνειας της ουλής κάτω από το υλικό που μετατοπίστηκε, αποτελεί την **επιφάνεια θραύσης**. Το δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης είναι η τομή ανάμεσα στο κατώτερο μέρος της επιφάνειας θραύσης και στην αρχική επιφάνεια του εδάφους. Το υλικό που εξακολουθεί να βρίσκεται στη θέση του, πρακτικά χωρίς μετατόπιση και που γειτονεύει με τα υψηλότερα σημεία της κύριας ουλής είναι η **στέψη**. Τα ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος της επαφής ανάμεσα στο μετακινούμενο υλικό και την κύρια ουλή αποτελούν την **κεφαλή της κατολίσθησης**. Η **κορυφή** είναι το υψηλότερο σημείο επαφής, ανάμεσα στο υλικό που έχει μετατοπιστεί και την κύρια ουλή.

Την κύρια ουλή συνοδεύει συνήθως η **δευτερεύουσα ουλή** που αντιστοιχεί σε μια απότομη επιφάνεια (αναβαθμό) μέσα στο υλικό που μετατοπίστηκε και η οποία προκύπτει από διαφορετικές κινήσεις μέσα στη μάζα που ολισθαίνει. Το περιθώριο του πιο απομακρυσμένου, από την κύρια ουλή, υλικού είναι το **δάκτυλο της κατολίσθησης**. Το **άκρο** είναι το πιο απομακρυσμένο σημείο του δακτύλου από την κορυφή της ολίσθησης. Μεταξύ του δακτύλου και της κύριας ουλής αναπτύσσονται όλα τα υπόλοιπα τμήματα της κατολίσθησης. Έτσι το μεταφερόμενο υλικό είναι το υλικό που έχει απομακρυνθεί από την αρχική του θέση στο πρηνές, είτε είναι παραμορφωμένο είτε όχι.

Το τμήμα του μεταφερόμενου υλικού που υπέρκειται της επιφάνειας θραύσης στην περιοχή ανάμεσα στην κύρια ουλή και το δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης ονομάζεται **κύριο σώμα**. Μεταξύ του μεταφερόμενου υλικού και αυτού που δεν έχει μετατοπισθεί βρίσκεται η επιφάνεια διαχωρισμού, κατά μήκος της οποίας δεν έχει συμβεί καμία θραύση. Ως **πόδας** χαρακτηρίζεται το μέρος του μεταφερόμενου υλικού που βρίσκεται κατάντη από το δάκτυλο.



Σχήμα 1.4. Ιδεατό σχέδιο και ονοματολογία μιας περιστροφικής ολίσθησης (Varnes 1978)

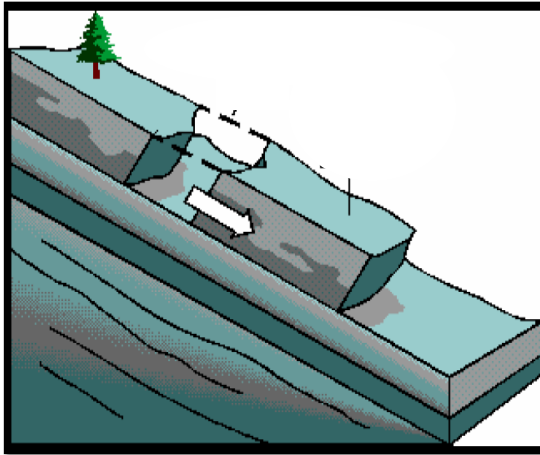
b) Μεταθετικές ολισθήσεις

Στις μεταθετικές ολισθήσεις η μάζα που αποσπάται από τα πρανές μετακινείται προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω, κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή ομαλής – κυματοειδούς επιφάνειας, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Συνήθως, η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει και μετακινείται παράλληλα πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Η διάκριση της μεταθετικής από την περιστροφική ολίσθηση είναι βασικής σημασίας για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στην περιστροφική ολίσθηση, όπου η επιφάνεια ολίσθησης στην περιοχή του πόδα κλίνει προς το πρανές, υπάρχει η «εγγενής» τάση αποκατάστασης της ισορροπίας στην ασταθή μάζα.

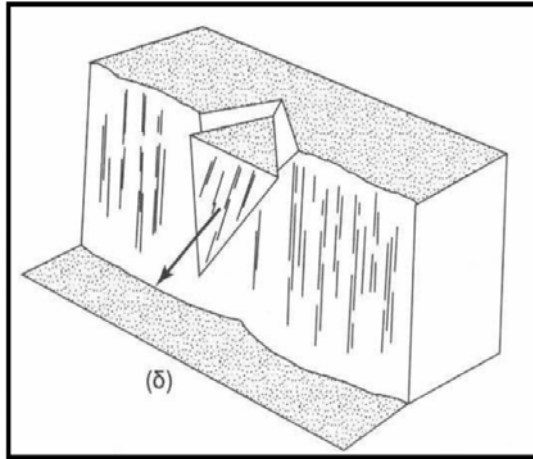
Αντίθετα, σε μία μεταθετική ολίσθηση, η μετακίνηση μπορεί να προχωράει απεριόριστα, όταν η επιφάνεια ολίσθησης έχει σημαντική κλίση και εφόσον η διατμητική αντίσταση κατά μήκος της επιφάνειας αυτής παραμένει μικρότερη από τη σταθερή δύναμη που προκαλεί την κίνηση.

Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι γενικά πιο αβαθείς από τις περιστροφικές και συνήθως το μήκος τους υπερβαίνει το 10πλάσιο του βάθους τους ενώ έχει μορφή «διευρυμένου σε πλάτος καναλιού».

Μεταθετικές ολισθήσεις κατά μήκος συγκεκριμένης ασυνέχειας σε ασυνεχείς βραχώμαζες ονομάζονται επίπεδες ολισθήσεις κατά Hoek and Bray (1977). Στην περίπτωση όπου η ολίσθηση γίνεται πάνω σε δύο τεμνόμενες επιφάνειες ασυνεχειών και κατά μήκος της τομής τους, καλείται σφηνοειδής ολίσθηση. Κλιμακωτές μεταθετικές ολισθήσεις είναι επίσης να εκδηλωθούν σε βραχώδη πρανή όταν η βραχώμαζα διατέμνεται από δύο ή περισσότερα κυρίαρχα συστήματα ασυνεχειών.



Σχήμα 1.5. Ολίσθηση τεμάχους
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

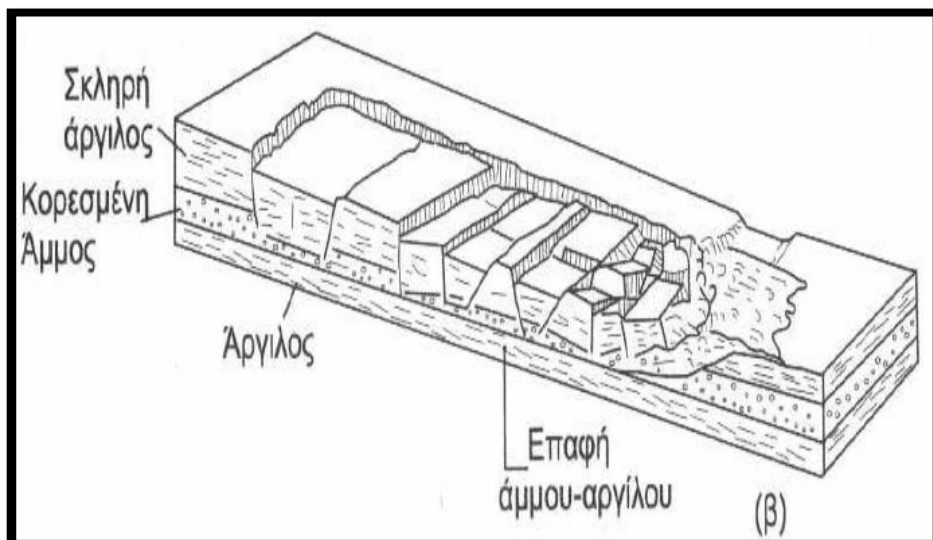


Σχήμα 1.6. Σφηνοειδής ολίσθηση

1.3.4 Πλευρικές εξαπλώσεις

Στις πλευρικές εξαπλώσεις η κίνηση που επικρατεί είναι η πλευρική διάσταση του υλικού που διευκολύνεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. Ο όρος εξάπλωση προτάθηκε αρχικά από τους Terzachi and Peck (1948) για την περιγραφή των απότομων μετακινήσεων υδροφόρων στρωμάτων άμμου ή ιλύος στα οποία υπέρκεινται ομογενή στρώματα αργίλου ή τα οποία έχουν φορτιστεί από επιχώματα. Αποτέλεσμα αυτών είναι η μετακίνηση αργίλων σε πολύ ομαλό μορφολογικό ανάγλυφο που για δεκαετίες δεν παρουσίαζαν κάποιες ενδείξεις για επικείμενες μετακινήσεις τους. Διακρίνονται οι παρακάτω βασικοί τύποι πλευρικών εξαπλώσεων:

- Εξάπλωση τεμαχών
- Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης
- Σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις



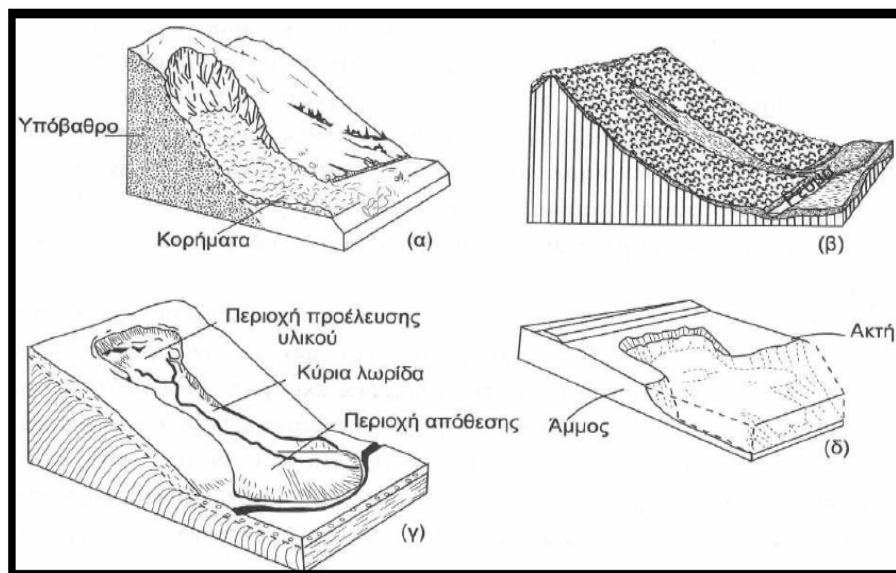
Σχήμα 1.7. Πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμος και ιλύος (Varnes 1978)
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

1.3.5 Ροές

Οι ροές υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά. Αντίθετα στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές κοντινές ρωγμές – διακλάσεις, καθώς και εκείνες που παρατηρούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση.

Οι αργές ροές ταξινομούνται από το VARNES και από πολλούς ερευνητές στον ερπυσμό που είναι μία αργή, όχι άμεσα ορατή κίνηση του επιφανειακού μανδύα του εδάφους ή του σαθρού καλύμματος των πετρωμάτων. Αναγνωρίζεται το φαινόμενο αυτό από την κλίση των δέντρων στύλων ή ακόμα και από τη σχετική θέση των θραυσμάτων κάποιου χαρακτηριστικού γεωλογικού ορίζοντα. Παρακάτω διακρίνονται βασικοί τύποι ροών:

- **Ροές βραχώδους υποβάθρου**
- **Ροές κορημάτων**
- **Ροές γαιών**

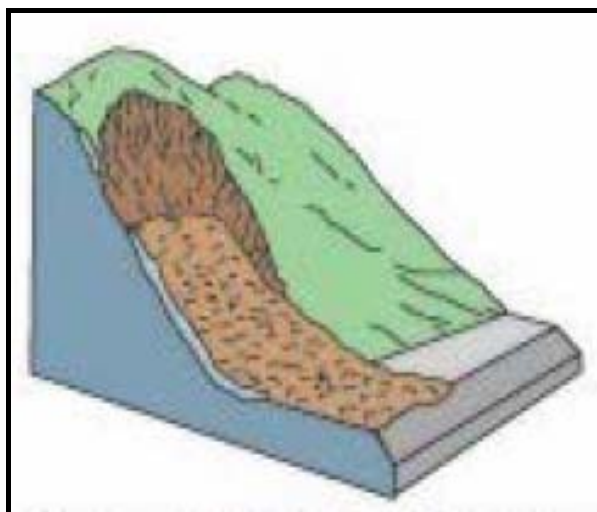


Σχήμα 1.8. (α) – (β) Ροή κορημάτων, (γ) Ροή γαιών, (δ) Ροή άμμου ιλύος
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

1.3.6 Σύνθετες μετακινήσεις πρανών

Συνήθως οι μετακινήσεις των πρανών είναι ένας συνδυασμός των κύριων τύπων μετακινήσεων που περιγράφηκαν μέχρι τώρα, που εκδηλώνονται είτε στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας είτε στα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης. Σαν σύνθετες ολισθήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες διαφορετικού τύπου μετακινήσεις γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές ταυτόχρονα (Cruen and Varnes 1996). Αυτές διακρίνονται:

- **Χιονοστιβάδα καταπτώσεων βράχων**
- **Ολίσθηση ροής**



Σχήμα 1.9 Ολίσθηση ροής
(από Κ.Λουπασάκης 2011)

1.4 Ενεργότητα κατολισθήσεων

Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες στην έρευνα και μελέτη των κατολισθήσεων είναι ο προσδιορισμός της ενεργότητάς τους.

Ενεργές χαρακτηρίζονται οι κατολισθήσεις που παρουσιάζουν πρόσφατες μετακινήσεις. Οι ενεργές μετακινήσεις είναι συνήθως πρόσφατες, δηλαδή οι μορφολογικοί τους χαρακτήρες αναγνωρίζονται εύκολα και δεν έχουν αλλοιωθεί σημαντικά από τις διεργασίες της επιφανειακής αποσάθρωσης και διάβρωσης. Από τις κατολισθήσεις αυτές άλλες εκδηλώνονται για πρώτη φορά και άλλες επανενεργοποιούνται μετά από ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είχαν σταθεροποιηθεί. Οι τελευταίες μετακινούνται συνήθως πάνω σε προϋπάρχουσες επιφάνειες ολίσθησης των οποίων η διατμητική αντοχή πλησιάζει την παραμένουσα (Skempton 1970). Οι κατολισθήσεις που μετακινήθηκαν τον τελευταίο εποχικό κύκλο και οι οποίες κατά την παρούσα περίοδο δεν μετακινούνται χαρακτηρίζονται ως παροδικά ανενεργές ή υπό αναστολή.

Ως **ανενεργές** αναφέρονται οι κατολισθήσεις οι οποίες παραμένουν σταθερές για περισσότερο από ένα έτος (κατά τον τελευταίο εποχικό κύκλο). Αν τα αίτια που συντελούν στην εκδήλωση της κατολίσθησης παραμένουν, τότε η κατολίσθηση βρίσκεται σε λανθάνουσα κατάσταση. Αν όμως τα αίτια που τις προκαλούν έχουν εκλείψει, τότε πρόκειται για μη ενεργοποιήσιμη κατολίσθηση. Τέλος όταν για μία κατολίσθηση έχουν ληφθεί μέτρα προστασίας και σταθεροποίησης, η κατολίσθηση θεωρείται σταθεροποιημένη.

1.4.1 Τύπος ενεργότητας

Ο τύπος της ενεργότητας των κατολισθήσεων καθορίζεται από τον τρόπο που κατανέμονται οι πιθανές διαφορετικές μετακινήσεις μέσα στην ίδια τη μάζα τους. Ο Varnes (1978) καθόρισε ως σύνθετες κατολισθήσεις, τις κατολισθήσεις αυτές που εκδηλώνονται με τουλάχιστον δύο διαφορετικούς τύπους μετακίνησης (π.χ. ολίσθηση και ανατροπή). Επίσης μία κατολίσθηση που εμφανίζει επαναλαμβανόμενες κινήσεις του ίδιου τύπου με επέκταση της επιφάνειας θραύσης καλείται πολλαπλή.

Στην περίπτωση αυτή η νέα μετακινούμενη μάζα είναι σε επαφή με την προηγούμενη και πολλές φορές έχουν κοινό τμήμα των επιφανειών θραύσης.

Οι διαδοχικές κατολισθήσεις είναι παρόμοιες με τις πολλαπλές, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει επικάλυψη του υλικού της μίας κατολίσθησης με το αντίστοιχο της άλλης και η κάθε μία αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση.

Τέλος, μια απλή κατολίσθηση, σε αντίθεση με τη σύνθετη εκδηλώνεται πάντα με έναν τύπο μετακίνησης, χωρίς η μάζα που ολισθαίνει να διαχωρίζεται σε διάφορα μέρη κινούμενα μερικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους.

1.5 Ταχύτητα μετακίνησης

Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολίσθησης είναι παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με τις επιπτώσεις που έχει σε ανθρώπινες ζωές, βλάβες κτιρίων και έργων υποδομής καθώς και σε απώλεια γης. Η πιο πρόσφατη ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα εκδήλωσης τους δίνεται στον παρακάτω πίνακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι συχνά είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της ταχύτητας μετακίνησης μιας κατολίσθησης, λόγω της διαφορετικής ταχύτητας που αναπτύσσει στα διάφορα στάδια εξέλιξής της.

Πίνακας 1.2. Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης κατολισθήσεων (WP/WLI 1995)
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

Κατηγορία	Περιγραφή	Ταχύτητα mm/sec	Τυπική ταχύτητα
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 5 \times 10^3$	$> 5 \text{ m/sec}$
6	Πολύ γρήγορη	$> 5 \times 10^1$	$> 3 \text{ m/min}$
5	Γρήγορη	$> 5 \times 10^{-1}$	$> 1.8 \text{ m/hr}$
4	Μέτρια	$> 5 \times 10^{-3}$	$> 13 \text{ m/μήνα}$
3	Αργή	$> 5 \times 10^{-5}$	$> 1.6 \text{ m/έτος}$
2	Πολύ αργή	$> 5 \times 10^{-7}$	$> 16 \text{ mm/έτος}$
1	Εξαιρετικά αργή	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 16 \text{ mm/έτος}$

Οι επιπτώσεις που έχει μία κατολίσθηση αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας μετακίνησης, αφού γενικά οι πολύ γρήγορες κατολισθήσεις προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες σε ζωές και περιουσίες σε σχέση με τις αργές.

Ο SASSA (2004) συνέδεσε τις προκαλούμενες καταστροφές (κυρίως ανθρώπινες απώλειες) από κατολισθήσεις, με την ταχύτητα και την απόσταση μετακίνησης των εδαφικών μαζών. Με τον τρόπο αυτό ταξινόμησε τις κατολισθήσεις στις παρακάτω βασικές κατηγορίες.

1. Γρήγορες, μεγάλης απόστασης μετακίνησης
2. Γρήγορες, μικρής απόστασης μετακίνησης
3. Αργές, μεγάλης απόστασης μετακίνησης
4. Αργές, μικρής απόστασης μετακίνησης

1.6 Παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων

1.6.1 Γενικά

Ο μηχανισμός εκδήλωσης μιας κατολίσθησης περιλαμβάνει γενικά μια αλληλουχία γεγονότων που αρχίζουν με την επίδραση διάφορων αιτίων, που επηρεάζουν τις συνθήκες ισορροπίας του πρανούς και προκαλούν τη διατάραξη του με τελικό αποτέλεσμα τη θραύση και τη μετακίνηση.

Σπάνια μπορεί να αποδοθεί μία κατολίσθηση σε ένα και μοναδικό αίτιο. Η διαδικασία που οδηγεί στην ανάπτυξη μιας μετακίνησης πρανούς αρχίζει θεωρητικά με το σχηματισμό του ίδιου του γεωλογικού υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές, όταν καθορίζονται οι βασικές φυσικές του ιδιότητες και περιλαμβάνει όλα τα επακόλουθα γεγονότα των μετακινήσεων του φλοιού, της διάβρωσης και της αποσάθρωσης. Τελικά κάποια συγκεκριμένη δράση, ίσως ασήμαντη, προκαλεί την έναρξη της μετακίνησης του γεωυλικού προς τα κατόντη.

Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει ταυτόχρονα ένας συνδυασμός αιτίων που οδηγούν στην εκδήλωση του φαινομένου. Συχνά, ο τελικός παράγοντας δεν είναι τίποτε άλλο από μία διέγερση που έθεσε σε κίνηση μία μάζα που βρισκόταν ήδη σε οριακή κατάσταση ισορροπίας και για το λόγο αυτό καλείται ένανυσμα μετακίνησης.

Ο *TERZAGHI* (1950) υποδιαιρεί τα αίτια των κατολισθήσεων σε δύο βασικές κατηγορίες:

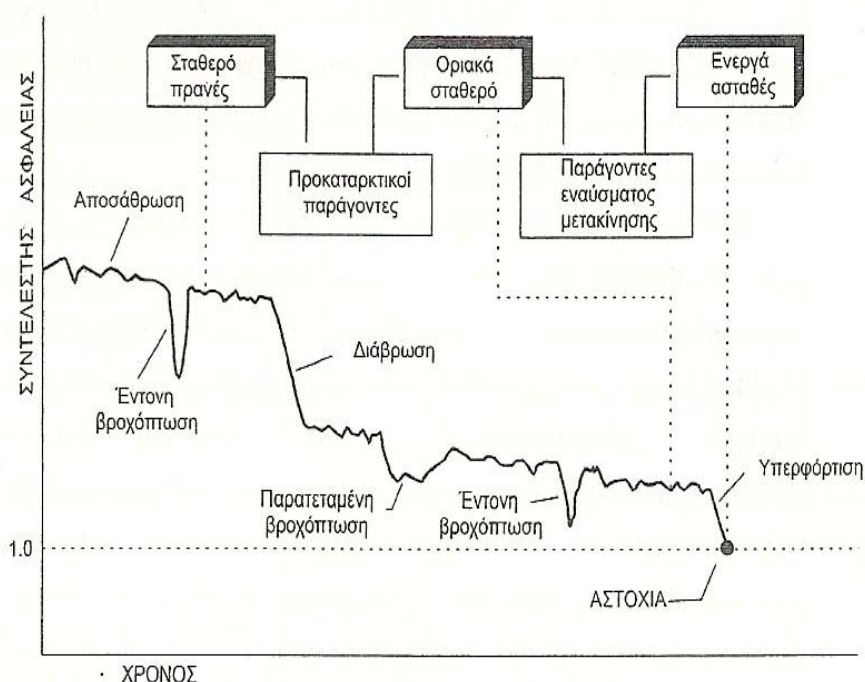
- Τα εξωγενή τα οποία προκαλούν αύξηση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο πρανές(π.χ. μεταβολή στη γεωμετρία του πρανούς, αποφόρτιση του πόδα, φόρτιση του μετώπου, σεισμοί κ.λπ.)
- Τα ενδογενή που προκαλούν μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού (π.χ. προοδευτική θραύση, αποσάθρωση, διάβρωση κ.λπ)

Ο *VARNES* (1978) ομαδοποίηση τους παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής τάσης που επιδρά πάνω στο υπό μετακίνηση υλικό
- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην πιθανή χαμηλή διατμητική αντοχή του υλικού
- Στους παράγοντες που συντελούν στη μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού

1.6.2 Ταξινόμηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των αιτιών που προκαλούν μία κατολίσθηση παρατίθεται το παρακάτω ενδεικτικό διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός φυσικού πρανούς με το χρόνο.



Διάγραμμα 1.1. Παράδειγμα μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς με το χρόνο (WP/WLI 1995), (από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

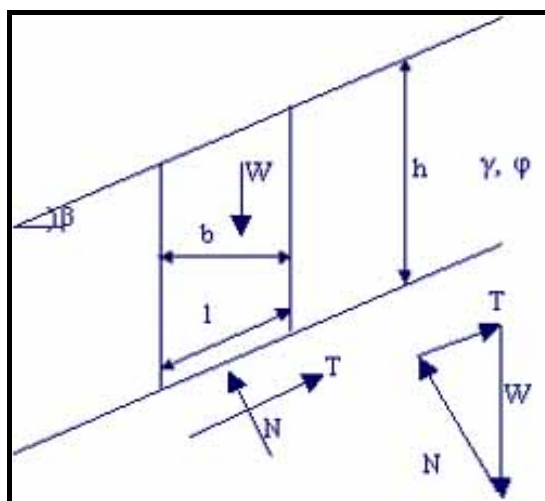
Με βάση τα αποτελέσματα της επίδρασης τους στην ευστάθεια των πρανών έχουμε την παρακάτω ταξινόμηση των παραγόντων που προκαλούν κατολίσθηση:

- Προκαταρκτικοί παράγοντες: Αυτοί συντελούν προοδευτικά στην αστάθεια του πρανούς, το οποίο με την πάροδο του χρόνου γίνεται επιρρεπές σε ολίσθηση, χωρίς όμως να έχει γίνει έναρξη της μετακίνησης. Απλά, με την επίδραση των προκαταρκτικών παραγόντων δημιουργούνται συνθήκες ενός οριακά σταθερού πρανούς.
- Παράγοντες εναύσματος μετακίνησης: Αυτοί προκαλούν την έναρξη της μετακίνησης. Οι παράγοντες αυτοί συντελούν στη μετατροπή ενός πρανούς από οριακά σταθερό σε ενεργά ασταθές.

1.7 Έναυσμα εκδήλωσης των κατολισθήσεων (Αίτια των κατολισθήσεων)

1.7.1 Γενικά

Οι δυνάμεις που καθορίζουν αν κάποιο πέτρωμα ενός πρανούς θα κινηθεί ή θα παραμείνει σταθερό είναι : η διατμητική τάση και η διατμητική αντοχή οι οποίες είναι αντίρροπες μεταξύ τους. Το βάρος ενός πετρώματος επί ενός πρανούς μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα κάθετη στο πρανές, την ορθή τάση και μια συνιστώσα παράλληλη προς το πρανές, τη διατμητική τάση. Η τάση αυτή θα κινούσε το πέτρωμα προς τα κάτω εάν αυτό δεν αντιδρούσε με την εσωτερική αντοχή του (διατμητική αντοχή). Αυτή καθορίζεται από την τριβή και τη συνεκτικότητα των επιμέρους τμημάτων του πετρώματος ή του αποσαθρωμένου μανδύα.



Σχήμα 1.10 Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων που επιδρούν στο πρανές

1.7.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων

Παρακάτω γίνεται η περιγραφή μερικών παραγόντων που είναι σημαντικοί για το έναυσμα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων.

- **Γεωμορφολογικά στοιχεία πρανούς:** Υπάρχει άμεσος συσχετισμός ανάμεσα σε ορισμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής με τις διαδικασίες που οδηγούν στις κατολισθήσεις. Μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών τα πιο σημαντικά για τη μελέτη των κατολισθήσεων είναι το **υψόμετρο**, η **κλίση** και ο **προσανατολισμός** του πρανούς (Moore et al., 1991 Beven and Kirkby, 1979, O' Loughlin, 1986.). Η κλίση του πρανούς καθορίζεται από φυσικές αιτίες ή ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Στις φυσικές αιτίες συγκαταλέγονται οι κατακόρυφες τεκτονικές κινήσεις μιας περιοχής, η ποτάμια διάβρωση, καθώς και ο παράκτιος κυματισμός. Στις ανθρωπογενείς αιτίες περιλαμβάνονται έργα οδοποιίας, μεταλλευτικές δραστηριότητες και άλλα τεχνικά έργα.

Η κλίση του πρανούς επηρεάζει σημαντικά την τάξη των δυνάμεων που συμβάλουν στην αστοχία ενός πρανούς. Αύξηση της κλίσης του πρανούς προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της διατμητικής τάσης, της κατακόρυφης συνιστώσας του βάρους που όπως αναφέραμε είναι η κινητήριος δύναμη για να συμβεί η κατολίσθηση. Επομένως, αν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες της μετακίνησης παραμείνουν σταθεροί, οι κατολισθήσεις αναμένεται να είναι πιο συχνές στα απότομα πρανή.

- **Η σύσταση και η δομή του πρανούς:** Ένα πρανές συγκροτείται συχνά από ένα συνδυασμό πετρωμάτων, αποσπασμένου μανδύα και εδάφους με ποικίλες ποσότητες φυτοκάλυψης και νερού. Όταν το πρανές δομείται αποκλειστικά από στερεά πετρώματα τότε μπορεί να σχηματίζονται ως και κατακόρυφα πρανή. Όταν όμως το πρανές φέρει εσωτερικές επιφάνειες ασυνέχειας (στρώσεις, διαρρήξεις, φυλλώσεις) που η κλίση τους είναι ομόρροπη με αυτή του πρανούς προκαλούν ολισθήσεις και συμβάλουν στο σχηματισμό των κορημάτων
- **Η έντονη βροχόπτωση:** Σε πολλές περιοχές οι πολύ έντονες βροχοπτώσεις που διαρκούν λίγο ή η μέτριας έντασης που διαρκούν για μερικές μέρες έχουν σαν αποτέλεσμα την εκδήλωση σοβαρών κατολισθητικών φαινομένων με μεγάλες κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γρήγορη κατείσδυση του νερού της βροχής, προκαλεί κορεσμό του εδάφους και αύξηση του βάρους της εδαφικής μάζας καθώς και αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους και την εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων.

Γενικά έχει παρατηρηθεί μια στενή σχέση μεταξύ βροχοπτώσεων και κατολισθητικών φαινομένων και η οποία έχει περιγραφεί ποιοτικά ή/και ποσοτικά για διάφορες συγκεκριμένες περιοχές. Η έρευνα στο αντικείμενο αυτό έχει δείξει μία σαφή τάση αύξησης της συχνότητας της εκδήλωσης κατολισθήσεων με την αύξηση της βροχοπτώσεων, ενώ η ποσότητα της κρίσιμης βροχόπτωσης που ενεργοποιεί τα φαινόμενα εξαρτάται γενικά από τις γεωλογικές συνθήκες, το κλίμα, τις γεωμορφολογικές συνθήκες κ.λπ.

Επιπρόσθετα, οι ανεξέλεγκτες πυρκαγιές καταστρέφουν τα δάση και την βλάστηση. Αυτό έχει σαν συνέπεια την δραματική αύξηση της διάβρωσης κατά τη χειμερινή περίοδο και την άμεση δράση του νερού της βροχής που δημιουργεί κατά τις έντονες βροχοπτώσεις εδαφικές ροές και επιφανειακές ολισθήσεις.

- **Γρήγορο λιώσιμο χιονιού:** Το γρήγορο λιώσιμο χιονιού προκαλείται συνήθως από διαλλείματα ηλιοφάνειας και αύξηση της θερμοκρασίας ή από βροχοπτώσεις που ακολουθούν τις χιονοπτώσεις. Το νερό από το λιώσιμο του πάγου τροφοδοτεί πολύ γρήγορα τη ζώνη αποσάθρωσης των πετρωμάτων ή τους εδαφικούς σχηματισμούς με αποτέλεσμα την εκδήλωση μετακινήσεων.
- **Μεταβολές στη στάθμη του νερού:** Η απότομη πτώση της στάθμης του νερού των λιμνών, ταμιευτήρων, ποταμών κ.λπ. που διατρέχουν ένα πρανές προκαλεί αύξηση της διατμητικής τάσης και πιθανή εκδήλωση αστάθειας. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται συχνά στους ταμιευτήρες φραγμάτων, όταν οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι χαμηλής διαπερατότητας άργιλοι ή πετρώματα αργιλικής σύστασης. Επίσης, η απότομη άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρανή λόγω βροχοπτώσεων ή λόγω της ανόδου της στάθμης ποταμών και λιμνών έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση

της πίεσης του νερού των πόρων, τη μείωση της διατμητικής αντοχής των εδαφικών σχηματισμών των πρανών και την πιθανή εκδήλωση νέων κατολισθήσεων, την ενεργοποίηση παλιών ή και την επιτάχυνση της κίνησης κάποιων εξαιρετικά αργών κατολισθήσεων που δεν έχουν εντοπιστεί στο παρελθόν.

- **Ηφαιστειακή δράση:** Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι δυνατό να προκαλέσουν κατολισθήσεις λόγω:
 - Των ηφαιστειακών υλικών που αποτίθενται στις απότομες κλιτύες και τα οποία συνήθως γρήγορα διαβρώνονται και δημιουργούν λασποροές και ροές κορημάτων μετά από έντονες βροχοπτώσεις
 - Των δονήσεων που δημιουργούνται με την έκρηξη και την ενεργοποίηση καταπτώσεων βράχων και ολισθήσεων κορημάτων από τις κλιτύες του ηφαιστείου.
 - Το λιώσιμο του χιονιού και του πάγου, όταν η έκρηξη γίνεται κατά τη χειμερινή περίοδο και πολλές φορές έχει σαν αποτέλεσμα την εκδήλωση καταστροφικής ροής κορημάτων και λάσπης.
- **Σεισμική δραστηριότητα:** Οι ισχυρές δονήσεις διαταράσσουν της ισορροπία των πρανών με την προσωρινή μεταβολή των τάσεων και αποτελούν πολλές φορές το έναυσμα για την εκδήλωση κατολισθήσεων. Στα απότομα πρανή εκδηλώνονται συνήθως καταπτώσεις βράχων και ολισθήσεις κορημάτων και βράχων, ενώ στα ηπιότερα πρανή εκδηλώνονται περιστροφικές και μεταθετικές ολισθήσεις καθώς και πλευρικές εξαπλώσεις.
- **Ανθρωπογενής παρέμβαση:** Στα αίτια των κατολισθήσεων πρέπει απαραίτητα να συμπεριλάβουμε και τους εξωγενείς παράγοντες όπως η έντονη, πολλές φορές, ανθρωπογενής παρέμβαση. Η όψη ενός τοπίου, η μορφολογία του, η γεωλογική δομή του, η ορυκτολογική του σύσταση και το τεκτονικό καθεστώς που επικρατεί σ' αυτό (διεύθυνση ρηγμάτων, πυκνότητα διακλάσεων), είναι αποτέλεσμα εξέλιξης που διαρκεί για πολλά εκατομμύρια χρόνια και επιδρά έντονα στη συμπεριφορά των πρανών και των τεχνικών έργων που εδράζονται ή συνορεύουν μ' αυτά.

Οι κατασκευές τεχνικών έργων (διάνοιξη δρόμων, δόμηση κτιρίων) με τις αντίστοιχες μεταβολές που αυτές συνεπάγονται για την περιοχή κατασκευής (δημιουργία απότομων πρανών, αφαίρεση προστατευτικού καλύμματος, επιπλέον φόρτιση ενός σχηματισμού) μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες πρανών. Παρόλα αυτά είναι πολύ δύσκολο σε μερικές περιπτώσεις να καθορισθεί το μερίδιο της ευθύνης που φέρουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες στην πρόκληση των κατολισθήσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κατολισθήσεις είναι έως ένα βαθμό φυσικό φαινόμενο. Όμως η κατασκευή τεχνικών έργων μπορεί να αυξήσει τη διάβρωση ενεργοποιώντας παλιές κατολισθήσεις ή δημιουργώντας νέες.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με του πιο σημαντικούς παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (συνοπτικά).

Πίνακας 1.3. Οι πλέον σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994)
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

1. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
1	Πλαστικό χαμηλής αντοχής υλικό
2	Ευσίσθητο υλικό
3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματωμένο ή διακλασμένο υλικό
7	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
8	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
10	Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία (στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού)
2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Τεκτονική ανύψωση
2	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών
3	Επίδραση παγετώνων
4	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρानού
5	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρानού
6	Διάβρωση της βάσης του πρानού από παγετώνα
7	Διάβρωση των πλευρών του πρानού
8	Εσωτερική διάβρωση
9	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρानού
10	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση κ.λπ.)
3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση
2	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
3	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
4	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
5	Σεισμοί
6	Εκρήξεις ηφαιστειών
7	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστειών
8	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
9	Αποσάθρωση λόγω παγετού
10	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
4. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Εκκαφές στη βάση (πόδι) του πρानού
2	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανού
3	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμειυτήρες
4	Άρδευση
5	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
6	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές κ.λπ.)
7	Αποψίλωση
8	Λατομεία και μεταλλεία
9	Δημιουργία χωματερών
10	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, τοποθέτηση πασσάλων κ.λπ.)

Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην ευστάθεια και στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών. Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν μόνο περιστροφικές κυκλοειδής ολισθήσεις και όχι ολισθήσεις επίπεδες ή σφηνοειδής. Εξετάστηκε δηλαδή η εδαφική συμπεριφορά των μολασσικών σχηματισμών και όχι η συμπαγής και βραχώδης δομή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

2.1 Γενικά

Η ευστάθεια των πρανών αποτελεί ένα πολύ ευρύ θέμα, ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της εδαφομηχανικής και της βραχομηχανικής, με το οποίο έχει ασχοληθεί εκτεταμένα τόσο η ελληνική όσο και η διεθνής επιστημονική κοινότητα. Όταν το έδαφος είναι υπό κλίση τότε υπάρχει συνιστώσα βάρους που έχει την τάση να παρασύρει την εδαφική μάζα προς τα κάτω. Αυτό που αντιστέκεται και δεν μετακινείται το έδαφος είναι η αντοχή του σε διάτμηση. Αυτό το απλοϊκό μοντέλο αποτελεί την βάση για την κατανόηση του θέματος της ευστάθειας πρανών. Ένα ερώτημα που συχνά τίθεται όταν εξετάζεται η ευστάθεια ενός πρανούς, είναι το ύψος και η γωνία κλίσης μπορεί να κατασκευαστεί με ασφάλεια. Επίσης πολύ σημαντικός είναι και ο ρόλος των ασυνεχειών στην ευστάθεια του πρανούς.

Η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών αναφέρεται στους βασικούς μηχανισμούς και στις αρχές που οδηγούν στη δημιουργία μιας πιθανής αστοχίας (θραύσης) των πρανών καθώς επίσης και στην ανάπτυξη και εφαρμογή των αντίστοιχων μεθοδολογιών επίλυσης έναντι της προβλεπόμενης αυτής αστοχίας. Η μεθοδολογία ανάλυσης (έλεγχος ευστάθειας) αναφέρεται τόσο σε φυσικά πρανή για ενδεχόμενη κατολίσθηση, όσο και σε τεχνητά πρανή εκσκαφών (ορύγματα) καθώς και πρανή επιχωμάτων.

Οι κύριες μέθοδοι προσέγγισης – ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω δύο κατηγορίες:

- **Αναλύσεις οριακής ισορροπίας**
- **Αναλύσεις παραμόρφωσης**

Οι **αναλύσεις παραμόρφωσης** επιλύονται συνήθως με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method). Για τις επιλύσεις αυτές απαιτείται καλή γνώση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων των εδαφών καθώς επίσης και των διατμητικών αντοχών τους. Αν και οι αναλύσεις αυτές συνεπάγονται προσδιορισμό των μετακινήσεων και της κατανομής των τάσεων στο πρανές, δεν οδηγούν σε απευθείας μέτρηση της ευστάθειας, όπως γίνεται στην περίπτωση των αναλύσεων οριακής ισορροπίας μέσω του συντελεστή ασφαλείας.

Οι **αναλύσεις οριακής ισορροπίας** είναι οι συνηθισμένες αναλύσεις ευστάθειας πρανών που βασίζονται στην εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων εκείνων που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση του πρανού (δυνάμεις βαρύτητας, πιέσεις πόρων κ.λπ.) κατά μήκος μια συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης και των δυνάμεων εκείνων που ασκούνται κατά μήκος της επιφάνειας αυτής και αντιτίθενται στην ολίσθηση (π.χ. διατμητική αντοχή του εδάφους).

2.2 Συντελεστής ασφαλείας πρανούς

Ως συντελεστής ασφαλείας F ορίζεται ο λόγος των συνολικών δυνάμεων που ανθίστανται στην ολίσθηση προς τις δυνάμεις που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση. Εξετάζοντας τις παραπάνω περιπτώσεις, ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Συγκράτησης}}{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Ολίσθησης}}$$

Ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με την μονάδα. (F=1, αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας). Στην περίπτωση που F=1 τότε το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση επικείμενης αστοχίας ή σε οριακή κατάσταση ευστάθειας. Οι τιμές του αποδεκτού συντελεστή ασφαλείας για την ευστάθεια των πρανών είναι της τάξης του 1,4-1,5. Παρακάτω αναφέρονται οι ενδεικτικές τιμές συντελεστών ασφαλείας.

Πίνακας 2.1. Ενδεικτικές τιμές συντελεστών ασφαλείας

F=1.4	Για συνθήκες ομαλής φόρτισης και ομαλής λειτουργίας
F=1.3	Για συνθήκες στατικής φόρτισης και πιθανή εκτιμώμενη ακραία περίπτωση ανύψωσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για ζωή έργου 50 χρόνια
F=1.0	Για την επίπτωση σεισμικής φόρτισης

2.3 Ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών

Πριν προχωρήσουμε στις μεθόδους ανάλυσης των εδαφικών πρανών θα ήταν χρήσιμο να κάνουμε μια μικρή αναφορά στις ιδιότητες των εδαφών, στις βασικές αρχές και ιδίως στην έννοια της διατμητικής αντοχής.

2.3.1 Ιδιότητες Αντοχής Εδαφών

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη μελέτη εδαφών είναι το κριτήριο αστοχίας και η αρχή των ενεργών τάσεων όπως περιγράφονται αναλυτικά στην εδαφομηχανική. Σύμφωνα με την πρώτη το συνηθέστερο κριτήριο είναι αυτό του Mohr-Coulomb:

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

όπου σ = ορθή τάση στην επιφάνεια διάρρηξης

c = συνοχή

και φ = γωνία εσωτερικής τριβής

Η επιφάνεια που προσδιορίζεται από την παραπάνω εξίσωση καλείται **περιβάλλουσα θραύσης**.

Η αρχή των ενεργών τάσεων που διατυπώθηκε από τον Terzaghi αναφέρει πως η μεταβολή οποιουδήποτε χαρακτηριστικού ενός εδαφικού υλικού, συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή των ενεργών τάσεων και αντιστρόφως. Έτσι η ενεργός τάση ορίζεται ως:

$$\sigma' = \sigma - u$$

όπου σ = ολική τάση

και u = πίεση νερού πόρων

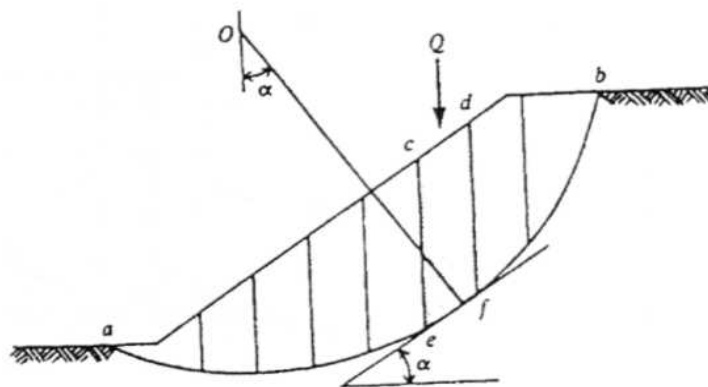
Η ενεργός τάση εκφράζει μακροσκοπικά τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των στερεών κόκκων, δηλαδή το ποσοστό του εξωτερικού επιβεβλημένου φορτίου που αναλαμβάνεται από τον εδαφικό σκελετό. Το υπόλοιπο φορτίο αναλαμβάνεται από την υγρή φάση με τη μορφή υδατικών πιέσεων.

Επίσης είναι χρήσιμο να αναφέρουμε τη διαφορά των *συνεκτικών* από τα *μη συνεκτικά* εδάφη ως προς τη διατμητική αντοχή. Στα μη συνεκτικά εδάφη η αστοχία γίνεται με ολίσθηση των κόκκων σε ένα νοητό επίπεδο όχι όταν η διατμητική τάση γίνει μέγιστη αλλά όταν ο λόγος της διατμητικής τάσης προς την αντίστοιχη ορθή έχει τιμή $\tan \varphi$. Αντίθετα στα συνεκτικά εδάφη η διατμητική τους αντοχή οφείλεται στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων και αφετέρου στην πραγματική συγκόλληση (συνοχή) των κόκκων. Η αστοχία γίνεται στο επίπεδο όταν η διατμητική τάση γίνει ίση με την διαθέσιμη διατμητική αντοχή.

2.4 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας

2.4.1 Ανάλυση της ευστάθειας με την μέθοδο των λωρίδων

Η πρώτη ανάλυση της ευστάθειας με τη μέθοδο των λωρίδων παρουσιάστηκε από τον Petterson το 1916 (Petterson, 1955). Είκοσι χρόνια αργότερα ο Fellenius(1936) εισήγαγε την Κανονική ή Σουηδική μέθοδο λωρίδων, γνωστή επίσης και ως μέθοδος λωρίδων του Fellenius (Fellenius method of slices). Έκτοτε, μία σειρά από άλλες μεθόδους οριακής ισορροπίας, περισσότερο ακριβείς, βασισμένες επίσης στην ιδέα των λωρίδων προτάθηκαν από διάφορους επιστήμονες. Σύμφωνα με τις εν λόγω μεθόδους ανάλυσης, η εδαφική μάζα άνωθεν της επιφάνειας ολίσθησης υποδιαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κάθετων λωρίδων (Σχήμα 13). Ο πραγματικός αριθμός λωρίδων που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη γεωμετρία του πρανούς και το προφίλ της εδαφικής τομής. Μερικές μέθοδοι βασίζονται στην υπόθεση μιας κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης ενώ άλλες υποθέτουν μια αυθαίρετη (μη-κυκλική) επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 13).



Σχήμα 2.1. Τεχνική χωρισμού σε φέτες

Οι μέθοδοι λωρίδων γενικά μπορεί να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης, σε αυτές δηλαδή που θεωρούν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και σε αυτές που θεωρούν επιφάνεια ολίσθησης ακανόνιστου σχήματος. Οι μέθοδοι που θεωρούν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης εξετάζουν την ισορροπία των ροπών ως προς το κέντρο του κύκλου για ολόκληρο το ελεύθερο σώμα που αποτελείται από λωρίδες. Αντίθετα, οι μέθοδοι που θεωρούν μια αυθαίρετη επιφάνεια ολίσθησης ακανόνιστου σχήματος εξετάζουν συνήθως την ισορροπία από την άποψη μεμονωμένων λωρίδων. Οι μέθοδοι αυτές γενικά διαφοροποιούνται κυρίως στην υπόθεση σχετικά με τις ορθές και διατμητικές δυνάμεις που δρουν μεταξύ των λωρίδων.

Μία συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων αυτών δίδεται στη συνέχεια.

Πίνακας 5. Μέθοδοι οριακής ισορροπίας

Μέθοδος	Επιφάνεια ολίσθησης		$\Sigma M=0$	$\Sigma F=0$	Παραδοχές σχετικά με τις δυνάμεις T και E μεταξύ των λωρίδων
	Κυκλική	Μη κυκλική			
Fellenius (1936)	✓	–	✓	–	Αγνοεί την και την E και την T
Bishop (ακριβής) (1955)	✓	(*)	✓	(**)	Λαμβάνει υπόψη και την E και την T
Janbu (απλουστευμένη) (1954)	(*)	✓	–	✓	Λαμβάνει υπόψη την E, αλλά αγνοεί την T
Bishop (απλουστευμένη) (1955)	✓	(*)	✓	(**)	Λαμβάνει υπόψη την E, αλλά αγνοεί την T
Lowe – Karafiath (1960)	–	✓	–	✓	Η συνισταμένη δύναμη μεταξύ των λωρίδων κλίνει με γωνία $\theta = (\alpha + \beta) / 2$ (**)
Morgenstern – Price (1965)	✓	✓	✓	✓	Ορίζεται από την $f(x)$, $T=f(x)\lambda E$
Spencer (1967)	✓	(*)	✓	✓	Σταθερή κλίση, $(T = E \cdot \tan \phi)$
Janbu (ακριβής) (1968)	✓	✓	✓	✓	Λαμβάνει υπόψη και την E και την T
Corps of Engineers (1970)	–	✓	–	✓	Η συνισταμένη δύναμη μεταξύ των λωρίδων κλίνει με γωνία $\theta = (\alpha + \beta) / 2$ (**)
Sarma (1973)	✓	✓	✓	✓	Διάτμηση μεταξύ των λωρίδων $(T = c \cdot h + E \cdot \tan \phi)$
Chen και Morgenstern (1983)	✓	✓	✓	✓	Ορίζεται από την $f(x)$, $T=f(x)\lambda E$

2.4.2 Μέθοδος Fellenius

Είναι η πιο γνωστή και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την προσέγγιση του προβλήματος, με την παραδοχή ότι έχουμε κυλινδρική επιφάνεια ολίσθησης και χωρισμό σε λωρίδες. Αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή και ως Σουηδική Μέθοδος Κύκλου ή Μέθοδος του United States Bureau of Reclamation Για την αποφυγή του προσδιορισμού των εσωτερικών δυνάμεων X και E, γίνεται η απλοποιητική παραδοχή ότι οι ορθές και οι κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που δρουν στις πλευρές της λωρίδας δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ολική ευστάθεια της εδαφικής μάζας και γι' αυτό το λόγο μπορούν να παραληφθούν από τους υπολογισμούς.

Επίσης η μέθοδος αυτή υιοθετεί ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης N ($W_i \cdot \cos \alpha_i$) στη βάση της λωρίδας είναι το σημείο τομής της βάσεως και του κατακόρυφου διανύσματος του βάρους της λωρίδας.

Μία περιστροφική ολίσθηση μπορεί πολύ εύκολα να αναλυθεί με βάση την ισορροπία των ροπών. Ως συντελεστής ασφάλειας ορίζεται ο λόγος της ροπής ως προς το κέντρο του κυκλικού τόξου των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση M_r , προς την ροπή ολίσθησης M_d :

$$F = M_r / M_d \quad (1)$$

Στη βάση κάθε φέτας σύμφωνα με τη σχέση Coulomb, η αναπτυσσόμενη διατμητική αντοχή T_i , είναι ίση με το άθροισμα της τριβής και της συνοχής και δίνεται από τη σχέση:

$$T = c' \cdot l + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \cdot \tan \varphi' \quad (2), \text{ όπου}$$

l = το μήκος της βάσης της φέτας

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

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

Η αντίστοιχη στη βάση της φέτας δύναμη ολίσθησης S είναι ίση με $W \cdot \sin \alpha$. Επανερχόμενοι στη σχέση (1) και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι T και S έχουν διεύθυνση εφαπτόμενη του τόξου και οι δύο ροπές έχουν κοινό βραχίονα ως προς το κέντρο, την ακτίνα r , η σχέση (1) οδηγείται στην παρακάτω αναλυτική:

$$F = \frac{\sum T_i}{\sum S_i} = \frac{\sum \{c'_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \varphi'_i\}}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (3)$$

όπου

c, φ η μέση συνοχή και γωνία τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

W_i το βάρος της i λωρίδας

u_i η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας

α_i, l_i η κλίση ως προς την οριζόντια και το μήκος της βάσης της i λωρίδας

Δύο παρατηρήσεις που αξίζει να αναφερθούν είναι οι εξής:

- Η μέθοδος αγνοεί τις συνθήκες ισορροπίας των δυνάμεων στο γενικό σύστημα
- Η μέθοδος δεν έχει τεχνική άμεσου και εξαρχής προσδιορισμού του δυσμενέστερου κύκλου.

Έτσι ο υπολογιζόμενος με την παραπάνω σχέση συντελεστής ασφάλειας δεν είναι τελικός, καθώς ο κύκλος είναι τυχαίος. Το θέμα αντιμετωπίζεται με τη συστηματική δοκιμή ικανού αριθμού κύκλων και την επισήμανση του δυσμενέστερου και κρίσιμου.

Η μέθοδος του Fellenius, όπως αναφέρει ο Bromhead (1986), φαίνεται ότι υποεκτιμά την τιμή του συντελεστή ασφάλειας, ειδικά όταν ο κύκλος είναι βαθύς ή όταν η πίεση των πόρων του νερού είναι υψηλή. Εντούτοις η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα για πολλά χρόνια. Παρόλο την ανάπτυξη πιο βελτιωμένων μεθόδων ανάλυσης, η χρήση της μεθόδου είναι ακόμα δικαιολογημένη, αφού η ακρίβεια των κυριότερων αναλύσεων πρανούς περιορίζεται από την αδυναμία στην ακριβή εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής του εδάφους παρά στις μεθόδους ανάλυσης που χρησιμοποιούνται

2.4.3 Μέθοδος Bishop

Η μέθοδος του Bishop (1955) προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα ως προς το ότι στη γενική μορφή της λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές πλευρικές δυνάμεις X_i και E_i . Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση (4):

$$F = \frac{\sum \{c' \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha + [(W - u \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha) + (T_1 - T_2)] \cdot \tan \phi'\} \cdot [\cos \alpha + (\tan \phi' \cdot \sin \alpha) / F]^{-1}}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

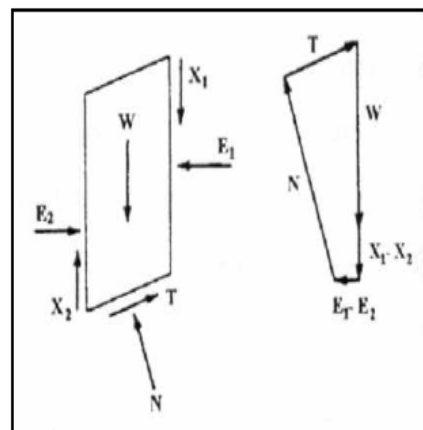
Η σχέση αυτή, καθώς ο συντελεστής F περιέχεται και στους δύο όρους της, κι ακόμη είναι άγνωστες εκτός του F και οι δυνάμεις X_1 - X_2 , απαιτεί μια περαιτέρω επαναληπτική και έμμεση υπολογιστική διαδικασία. Ο υπολογισμός θεωρείται ότι ολοκληρώνεται όταν μετά από m επαναλήψεις ικανοποιηθούν οι τρεις συνθήκες που ακολουθούν:

$$F_m - F_{m-1} = 0 \quad \sum (X_1 - X_2) = 0 \quad \sum (E_1 - E_2) = 0$$

Η υπολογιστική διαδικασία απλοποιείται κατά πολύ αν υποτεθεί ότι:

$$\sum (X_1 - X_2) \cdot \text{εφ}\phi' = 0, \text{ οπότε παίρνουμε τη σχέση (5):}$$

$$F = \frac{\sum \left\{ [c'_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \tan \phi'_i] \cdot \frac{\sec \alpha_i}{1 + (\tan \phi'_i \cdot \tan \alpha_i / F)} \right\}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$



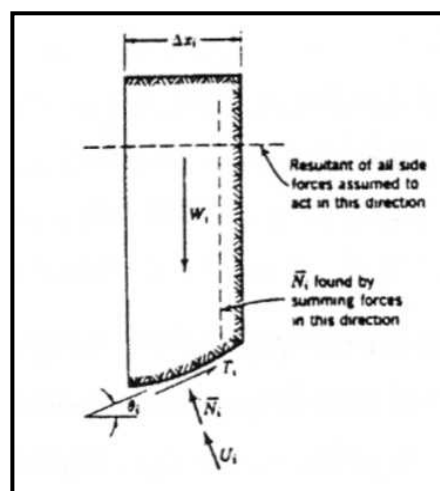
Σχήμα 2.2 Δυνάμεις που επιδρούν σε μία λωρίδα (από Lambe and Whitman 1969).

ή με διαφορετική μορφή (6):

$$F = \frac{\sum [c'_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi'] \cdot [1/M\theta]}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

$$M\theta = \cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'}{F} \right)$$

όπου α , η κλίση της βάσης της κάθε φέτας, W_i το βάρος της κάθε φέτας, b_i το πάχος της φέτας και u η πίεση του νερού.



Σχήμα 2.3 Επίδραση δυνάμεων στην αρχική μέθοδο των λωρίδων (από Lambe and Whitman 1969)

Η παραλλαγή αυτής της μεθόδου Bishop παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί ενώ είναι πιο απλή από την πρώτη (4), συνεπάγεται μικρό πρόσθετο μέσο σφάλμα της τάξης του 0.01 (Fang, 1975). Αριθμητικά παραδείγματα δείχνουν ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι πάρα πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η μέθοδος Bishop δίνει παραπλανητικά αποτελέσματα, όπως όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας για βαθύ κύκλο ολίσθησης. Γενικά στην πράξη εφαρμόζεται η μέθοδος του Bishop συνήθως με την μορφή της σχέσης (5) ονομαζόμενη απλοποιημένη ή τυπική μέθοδος του Bishop. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι και στη μέθοδο Bishop γίνεται δεκτή κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ότι όπως και στη μέθοδο Fellenius είναι απαραίτητο να αναζητηθεί και να προσδιοριστεί ο δυσμενέστερος κύκλος ολίσθησης με το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας μετά από μια σειρά επαναλαμβανόμενων υπολογισμών.

2.4.4 Μέθοδος Morgenstern and Price (1965)

Η μέθοδος των Morgenstern και Price (1965) βασίζεται στην υπόθεση ότι οι διατμητικές δυνάμεις (T) μεταξύ των λωρίδων σχετίζονται με τις αντίστοιχες ορθές (E) σύμφωνα με τη σχέση:

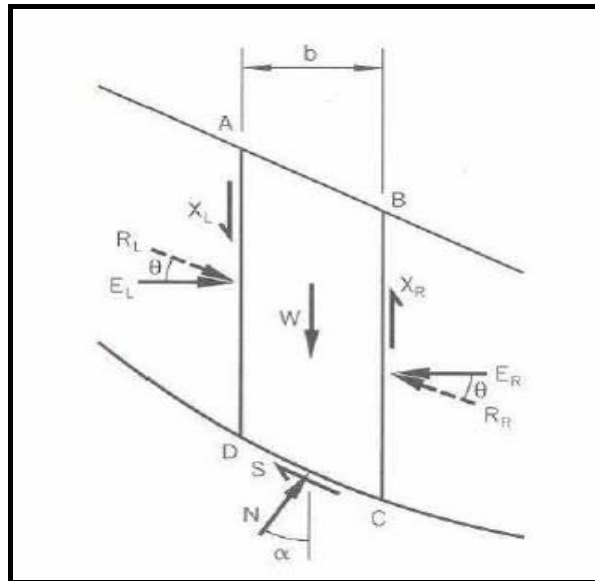
$$\frac{T}{E} = \lambda \cdot f(x)$$

όπου, T και E είναι οι κάθετες και οι οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων, $f(x)$ μία υποτιθέμενη συνάρτηση μεταξύ των δυνάμεων που δρουν στη διεπιφάνεια των λωρίδων και λ μία παράμετρος κλίμακας της παραπάνω υποτιθέμενης συνάρτησης. Σημειώνεται ότι, η συνάρτηση $f(x)$ δεν είναι σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και ότι σύμφωνα με τους Morgenstern and Price (1965) ο συντελεστής ασφαλείας δεν είναι ευαίσθητος σε αυτήν.

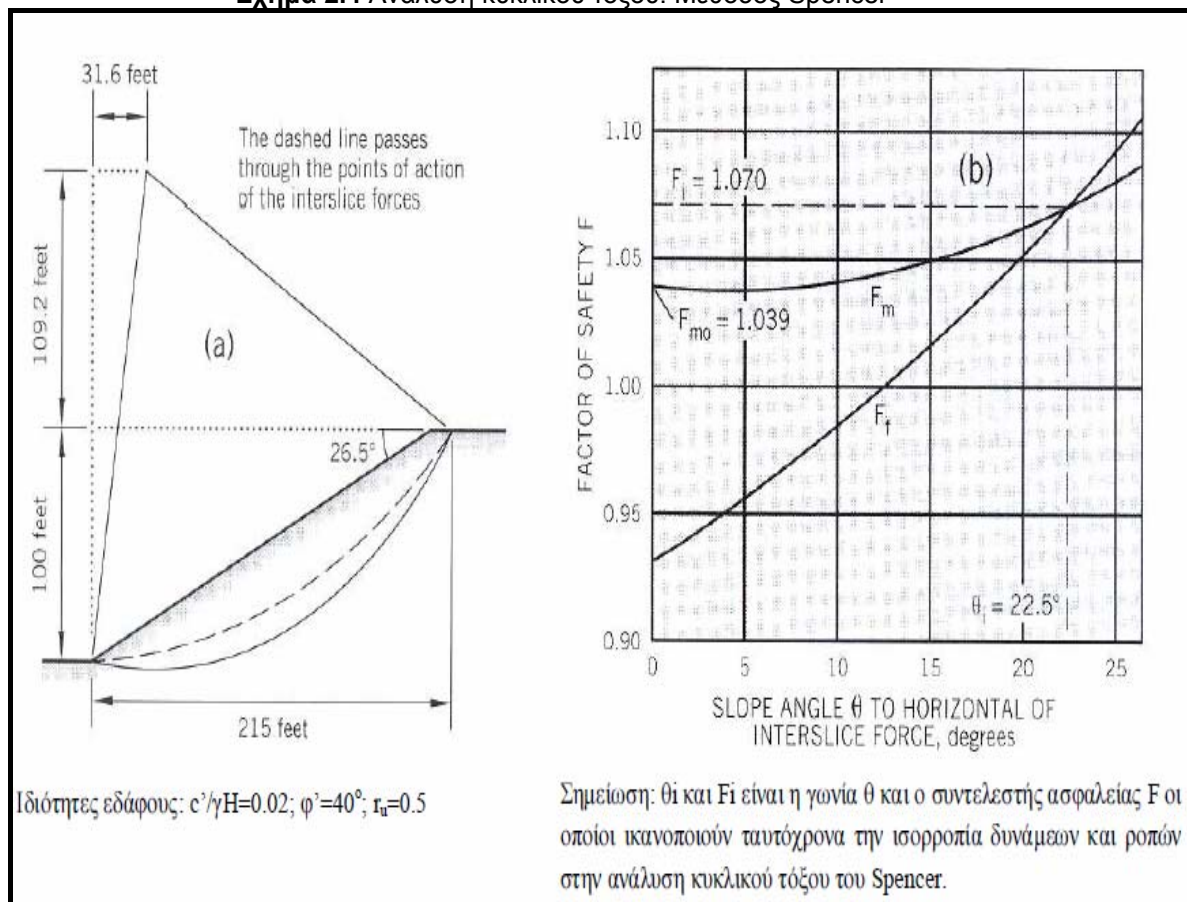
2.4.5 Μέθοδος Spencer (1967)

Ο Spencer (1967) βασίστηκε στην υπόθεση ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι παράλληλες και σχηματίζουν γωνία θ με την οριζόντιο (Σχήμα 2.2). Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την ικανοποίηση και της συνθήκης ισορροπίας των ροπών, αλλά και την αντίστοιχη των δυνάμεων. Η μέθοδος αυτή κατά συνέπεια είναι η μοναδική του είδους (ανάλυση κυκλικού τόξου) η οποία επιτυγχάνει τον επιθυμητό αυτόν αντικειμενικό σκοπό.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού της ευστάθειας πρανούς με τη μέθοδο Spencer παρουσιάζεται στη συνέχεια. Το πρανές του σχήματος 2.3 (αριστερά) είναι ένα τυπικό πρανές με κλίση 1:2 (V:H). Για τον προσδιορισμό της πραγματικής τιμής του συντελεστή ασφαλείας επιλέχθηκαν τυχαίες τιμές γωνίας θ , για κάθε μία από τις οποίες υπολογίστηκαν δύο συντελεστές ασφαλείας από δύο αντίστοιχα εξισώσεις, μία που ικανοποιεί την ισορροπία των ροπών (F_m) και μία των δυνάμεων (F_f). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγράμματος (Σχήμα 2.3 δεξιά). Με F_{m0} στο Σχήμα 2.3 (δεξιά) συμβολίζεται ο συντελεστής ασφαλείας που αντιστοιχεί στην απλουστευμένη μέθοδο Bishop ($\theta=0$). Ο πραγματικός συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει από την τομή των δύο καμπυλών του σχήματος 2.3 (δεξιά) είναι $F=1.070$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την απλουστευμένη μέθοδο Bishop ($F=1.039$) είναι πολύ κοντά σε αυτήν της μεθόδου Spencer. Από το γράφημα του σχήματος 2.3 (δεξιά) συμπεραίνεται επίσης ότι, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτουν από την ισορροπία ροπών δεν είναι πολύ ευαίσθητες στην γωνία θ , σε αντίθεση με αυτές που προκύπτουν από την ισορροπία δυνάμεων.



Σχήμα 2.4 Ανάλυση κυκλικού τόξου. Μέθοδος Spencer



Σχήμα 2.5 Παράδειγμα υπολογισμού με την μέθοδο Spencer

Η μέθοδος του Spencer (1967) είναι παρόμοια με αυτή των Morgenstern και Price (1965). Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, η μέθοδος του Spencer θεωρεί μία μοναδική τιμή κλίσης για τις δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων, ενώ η μέθοδος των Morgenstern και Price χρησιμοποιεί την παράμετρο κλίμακας, λ . Αν υποθεθεί ότι η συνάρτηση $f(x)$ της μεθόδου Morgenstern και Price είναι σταθερή, τότε τα αποτελέσματα αυτής είναι ουσιαστικά αντίστοιχα με αυτά της μεθόδου Spencer. Επίσης, η μέθοδος Morgenstern και Price προσδίδει επιπλέον ευελιξία όσον αφορά τις υποθέσεις σχετικά με κλίση των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων

2.5 Χαρακτηριστικά βραχώμαζας για την επίλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών

Πριν προχωρήσουμε στις αναλύσεις ευστάθειας βραχωδών πρανών είναι χρήσιμο, να προηγηθούν κάποια εισαγωγικά θεωρητικά για την έννοια της βραχώμαζας, τον ρόλο των ασυνεχειών, το είδος αστοχίας, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και Hoek and Brown καθώς και τις γεωτεχνικές παραμέτρους αυτής οι οποίοι θα μας χρειαστούν ιδιαίτερα στο τεχνικογεωλογικό κεφάλαιο. Έτσι λοιπόν έχουμε:

2.5.1 Ορισμός βραχώμαζας

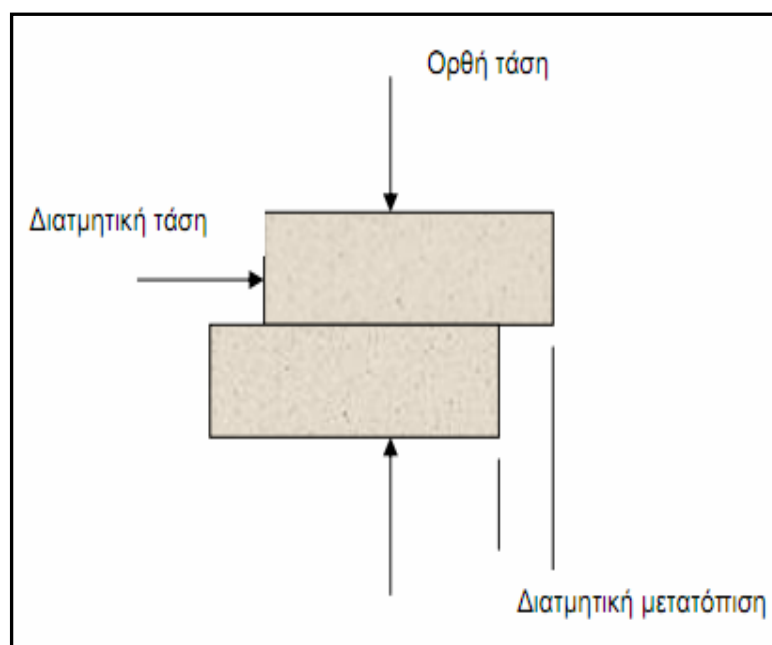
Η βραχώμαζα είναι μία μάζα βραχώδους υλικού διατεμνόμενη από πολυάριθμες δομικές ασυνέχειες, διατεταγμένες ανά συστήματα κατά μία, δύο ή περισσότερες διευθύνσεις. Η μάζα των πετρωμάτων σπάνια είναι ομοιογενή, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιόμορφα αποσαθρωμένη ή καταπονημένη και η απόκρισή της σε καταναγκασμούς εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως ο όρος της βραχώμαζας δόθηκε για να γίνει διαχωρισμός σε σχέση με το άρρηκτο ομοιογενές πέτρωμα.

Τα τεχνικά έργα σχεδόν κατά κανόνα κατασκευάζονται επί ή εντός κερματισμένου – διαταραγμένου βραχώδους υλικού (βραχώμαζα) και όχι σε άρρηκτο βράχο.

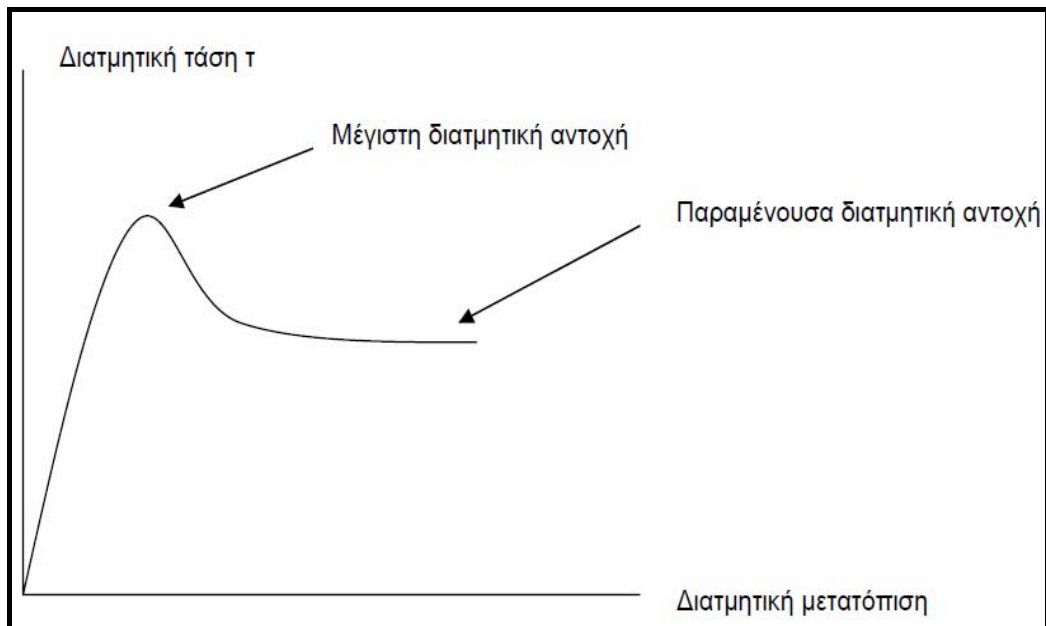
2.5.2 Διατμητική αντοχή βραχώμαζας

Η διατμητική αντοχή είναι η τάση που πρέπει να εφαρμοσθεί ώστε να προκληθεί η αμοιβαία μετατόπιση των κόκκων ή τεμαχίων βράχου. Εκφράζεται από:

- Συνοχή c (KPa): Εκφράζει το «δέσιμο» των κόκκων (στον άρρηκτο) ή τεμαχίων (στη βραχώμαζα).
- Γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi(^{\circ})$: Είναι η τριβή ανάμεσα στα ορυκτά ή στα τεμάχια που αντιστέκεται στη διάτμηση.



Σχήμα 2.6 Διατμητική τάση - μετατόπιση



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό πως για μικρές μετατοπίσεις σε μια επιφάνεια διάρρηξης η βραχύμαζα συμπεριφέρεται ελαστικά και η διατμητική τάση τ αυξάνει γραμμικά με την μετατόπιση. Καθώς υπερνικούνται οι δυνάμεις αντίστασης παύει η γραμμικότητα και η τ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή T_f (διατμητική αντοχή θραύσης). Στη συνέχεια η διατμητική τάση μειώνεται μέχρι που σταθεροποιείται σε μία σταθερή τιμή που καλείται ως παραμένουσα διατμητική αντοχή T .

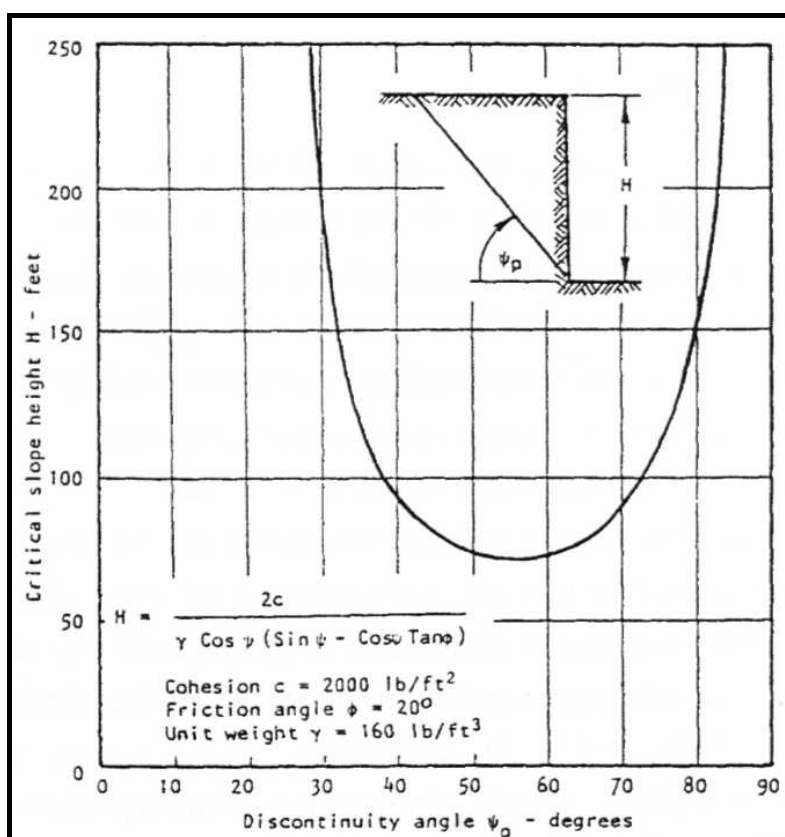
2.5.3 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών

- a) **Κατηγορίες ασυνεχειών:** Διακρίνονται ανάλογα με το αν υπήρχε ή όχι πρόχειρη μετατόπιση σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη είναι αυτή που περιλαμβάνει ασυνέχειες που έχουν παρουσιάσει πρόσφατα μετατόπιση και το υλικό πλήρωσης μορφώνεται από τις ήδη εκδηλωμένες διαδικασίες διάτμησης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει ασυνέχειες που δεν έχουν δώσει προηγούμενη μετατόπιση και τα οποία αποσαθρώθηκαν κατά μήκος των επιφανειών ασυνέχειας για να σχηματίσουν στρώματα αργίλου.
- b) **Τραχύτητα:** Η τραχύτητα των φυσικών επιφανειών ενός πετρώματος έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος της γωνίας τριβής ϕ . Αυτές οι επιφανειακές ανωμαλίες βοηθούν στην καλύτερη επαφή των ασυνεχειών που συνεπάγεται μεγαλύτερη αντίσταση στην ολίσθηση. Η ενεργός γωνία τριβής ϕ ισούται με το άθροισμα της βασικής γωνίας τριβής ϕ_b και της τραχύτητας i . Οπότε έχουμε:

$$\phi = \phi_b + i$$
- c) **Υλικό πλήρωσης:** Όταν οι επιφάνειες ασυνέχειας δεν περιέχουν υλικό πλήρωσης και η επαφή των στρώσεων είναι άμεση τότε η διατμητική αντοχή εξαρτάται μόνο από την γωνία τριβής του υλικού του πετρώματος. Όταν όμως υπάρχει υλικό πλήρωσης τότε η διατμητική αντοχή της επιφάνειας, επηρεάζεται άμεσα από αυτό και ενδεχομένως και η ευστάθεια. Η επίδραση αυτή είναι συνάρτηση αφενός του πάχους και αφετέρου των ιδιοτήτων του υλικού πληρώσεως.

2.5.4 Ο ρόλος των ασυνεχειών στην ευστάθεια των πρανών

Το σχήμα δείχνει ότι ενώ πολλά πρανή με μεγάλες γωνίες κλίσης και ύψη εκατοντάδων μέτρων είναι σταθερά, άλλα με μικρές γωνίες κλίσης αστοχούν έχοντας ύψος μόλις λίγων μέτρων. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η ευστάθεια των βραχώδων πρανών διαφέρει ανάλογα με τη κλίση των επιφανειών ασυνέχειας μέσα στη βραχώμαζα. Η επίδραση της κλίσης μιας επιφάνειας αστοχίας στην ευστάθεια ενός πρανού φαίνεται στο σχήμα 2.7, στο οποίο προβάλλεται το κρίσιμο ύψος ενός ξηρού βραχώδους πρανού σε σχέση με τη γωνία κλίσης της ασυνέχειας. Θεωρείται ότι μόνο ένα σύστημα ασυνεχειών παρουσιάζεται σε μία πολύ σκληρή βράχο μάζα και ότι μία από αυτές «ανατέλλει» στον πόδα του πρανού. Φαίνεται καθαρά ότι η παρουσία ή η απουσία των ασυνεχειών έχει σημαντική επίδραση στην ευστάθεια των πρανών και η αναζήτηση τέτοιων γεωλογικών χαρακτηριστικών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα μέρη μιας ερευνητικής μελέτης

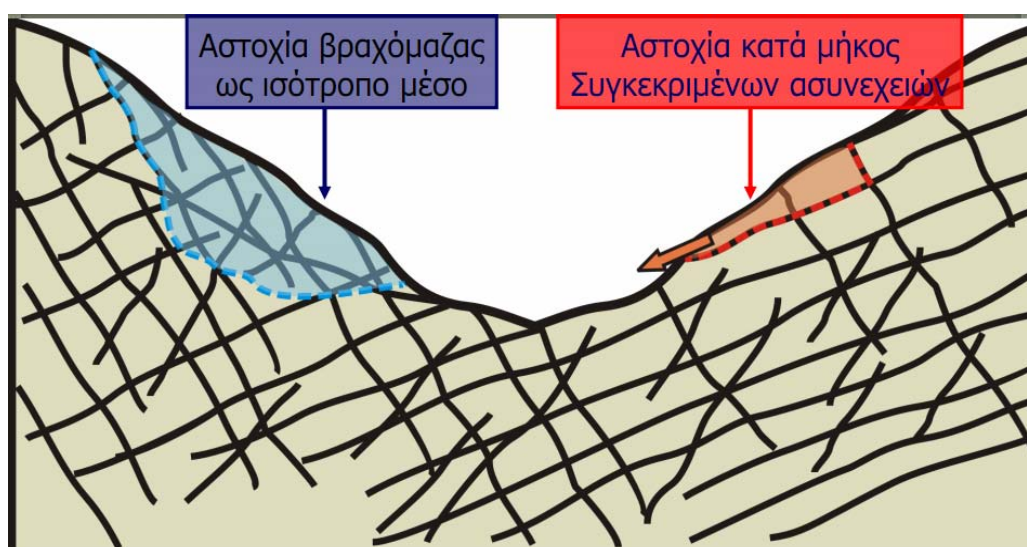


Σχήμα 2.7. Οριακό ύψος ενός αποστραγγισμένου κατακόρυφου πρανού που περιέχει μια επίπεδη ασυνέχεια σε σχέση με τη γωνία κλίσης της ασυνέχειας ψ_p (από Παυλίδης Κωνσταντίνος, 2009)

2.5.5 Αστοχία Βραχόμαζας

Οι διατμητικές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν:

- Σε άρρηκτο πέτρωμα: ψαθυρή θραύση υπό πολύ υψηλές πιέσεις
- Στη βραχόμαζα: θραύση κατά μήκος σύνθετης επιφάνειας που εμπλέκει μια σειρά από διάφορες ασυνέχειες αλλά και διάρρηξη των γεφυρών του άρρηκτου βράχου μεταξύ των ασυνεχειών αυτών. (**Ισότροπη συμπεριφορά**)
- Στις ασυνέχειες: θραύση κατά μήκος μίας ή δύο συγκεκριμένων ασυνεχειών (επίπεδες ολισθήσεις, σφηνοειδής ολισθήσεις). (**Ανισότροπη συμπεριφορά**)



Σχήμα 2.8. Μορφές αστοχίας βραχόμαζας
(από Β. Μαρίνος, 2011)

2.5.6 Γεωτεχνικές ιδιότητες βραχόμαζας

Οι κυριότερες γεωτεχνικές ιδιότητες της βραχόμαζας είναι:

- Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI)
- Συνοχή c
- Γωνία τριβής ϕ
- Μέτρο παραμορφωσιμότητας E_m
- Σταθερά άρρηκτου υλικού m_i
- Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci}
- Αντοχή βραχόμαζας σ_{cm}
- Συντελεστής διαταραχής D

Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων της βραχόμαζας και πως αυτοί χρησιμοποιούνται στα κριτήρια αστοχίας Hoek and Brown της βραχόμαζας.

α. Δείκτης Γεωλογικής αντοχής της βραχόμαζας (GSI)

Ο γεωλογικός δείκτης αντοχής χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας βραχόμαζας. Ο δείκτης αυτός, εκτός από την γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχόμαζας. Αποτελεί λοιπόν σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek and Brown και προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα του προσδιορισμού των πλέον αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων σε περιβάλλον ρωγματωμένων βράχων. Ο Δείκτης GSI βασίζεται στην εκτίμηση της δομής και της καταστάσεως των ασυνεχειών της βραχόμαζας και επομένως αποτελεί ένα φιλικό, γεωλογικά, δείκτη που μπορεί να εκτιμάται εύκολα.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθαρμωμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθαρμωμένες και οξείδωμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθαρμωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσθαρμωμένες με σημαντική επιφθορία ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσθαρμωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης				
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
 INTACT OR MASSIVE - Άρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμά που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλειδωμά και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων		ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ 90 80 70 60 50 40 30 20 10 N/A N/A				

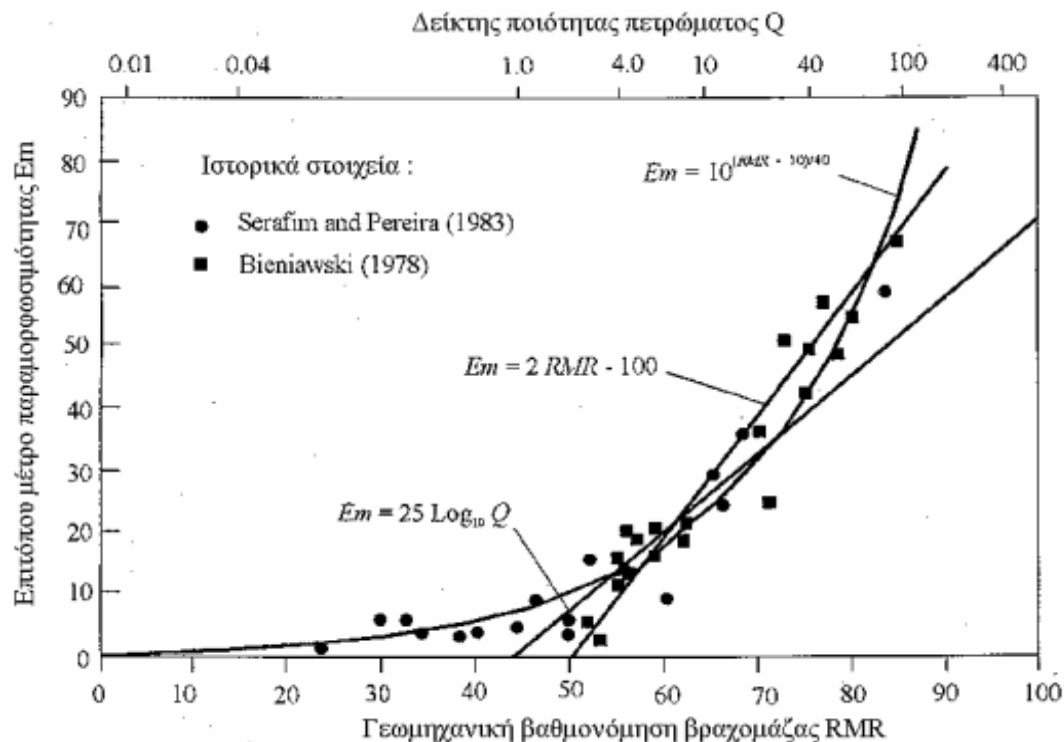
Σχήμα 2.9 Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Marinos and Hoek 2000)

β. Μέτρο παραμορφωσιμότητας E_m

Η παραμορφωσιμότητα του πετρώματος, πριν από τη διαρροή του, χαρακτηρίζεται από το μέτρο παραμορφωσιμότητας E_m . Τούτο δίνεται από τους Serafim and Pereira (1983) και Hoek and Brown (1997) αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$\sigma_{ci} \geq 100 \text{ MPa} \Rightarrow E_m [\text{GPa}] = 10^{((GSI-10)/40)}$$

$$\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa} \Rightarrow E_m [\text{GPa}] = \sqrt{\frac{\sigma_{ci} [\text{MPa}]}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$



Σχήμα 2.10

γ. Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (Rock Quality Designation - RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχόμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχών μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$RQD = \frac{\sum (\text{μήκους τεμαχών μήκους} > 10 \text{ cm})}{\text{Ολικό μήκος του πυρήνα}} \times 100\%$$

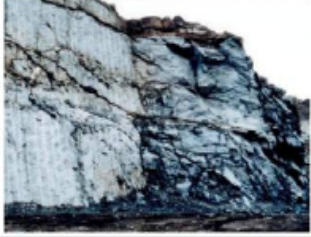
Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχόμαζας αν και παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

1. Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.
2. Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε "λεπτομέρειες" της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής κεφαλής κλπ. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.

3. Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχόμαζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD απ' ό,τι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες

d. Συντελεστής διαταραχής D

Ο συντελεστής διαταραχής παίρνει τιμές μεταξύ 0-1. Όπου 0 έχουμε αδιατάρακτο για την εκσκαφή πέτρωμα και 1 που είναι για πολύ διαταραγμένο πέτρωμα. Ο συντελεστής αυτός περιγράφει την διατάραξη της βραχόμαζας κατά την κατασκευή.

Εμφάνιση της βραχόμαζας	Περιγραφή της βραχόμαζας	Προτεινόμενη τιμή του D
	Άριστης ποιότητας ελεγχόμενη έκρηξη ή εκσκαφή με χρήση TBM που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας	$D = 0$
	Μηχανική ή εκσκαφή με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχόμαζες (όχι έκρηξη) που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας Όπου προβλήματα συγκλίσεων συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι έντονη εκτός και αν τοποθετηθεί ένα προσωρινό ανάστροφο τόξο, όπως στη φωτογραφία	$D = 0$ $D = 0.5$ Όχι ανάστροφο τόξο
	Πολύ πτωχής ποιότητας εκρήξεις σε σήραγγες σε σκληρό βράχο που συντελούν σε σοβαρές τοπικές φθορές, εκτεινόμενες κατά 2 ή 3 m, εντός της περιβάλλουσας βραχόμαζας	$D = 0.8$
	Μικρής κλίμακας εκρήξεις σε πρηνή πολιτικού μηχανικού που συντελούν σε μέτριες φθορές της βραχόμαζας, ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας. Ωστόσο, λόγω ανακούφισης των τάσεων παρουσιάζονται ορισμένες διαταραχές.	$D = 0.7$ Καλή έκρηξη $D = 1.0$ Πτωχή έκρηξη
	Πρηνή πολύ μεγάλου λατομείου δέχονται σημαντικές διαταραχές εξαιτίας ισχυρής παραγωγής εκρήξεων και, επιπλέον, ανακούφιση των τάσεων λόγω απομάκρυνσης των υπερκείμενων Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρηνή να είναι μικρότερος	$D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή

Σχήμα 2.11 Περιγραφή του συντελεστή διαταραχής D για βραχόμαζες.
(από Β. Μαρίνος, 2011)

Επίσης για να προσδιορίσουμε την αντοχή της βραχώμαζας χρειαζόμαστε εκτός από τους παράγοντες απομείωσης της αντοχής του άρρηκτου βράχου (γεωτρήσεις, επιτόπου παρατήρηση) με την χρήση του GSI και του συντελεστή διαταραχής D που περιγράψαμε παραπάνω, και την αντοχή του άρρηκτου βράχου (εργαστηριακές δοκιμές). Αρκεί να υπολογιστούν:

- Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci}
- Η σταθερά υλικού m_i

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχώμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής σ_{ci} , που προκύπτει κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια του συμπαγούς πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμών επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή αλλων ασυνεχειών, με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του συμπαγούς πετρώματος.

Με βάση την αντοχή σ_{ci} τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
> 250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με το νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

Σχήμα 2.12. Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή. (κατά ISRM, 1981)

2.5.7 Κριτήριο αστοχίας Hoek and Brown για τη βραχώμαζα

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω γεωτεχνικές ιδιότητες μπορούμε να εφαρμόσουμε το κριτήριο αστοχίας **Hoek and Brown** για τη βραχώμαζα, η μορφή του οποίου είναι:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Όπου:

σ_1 : η μέγιστη ενεργός τάση στην αστοχία

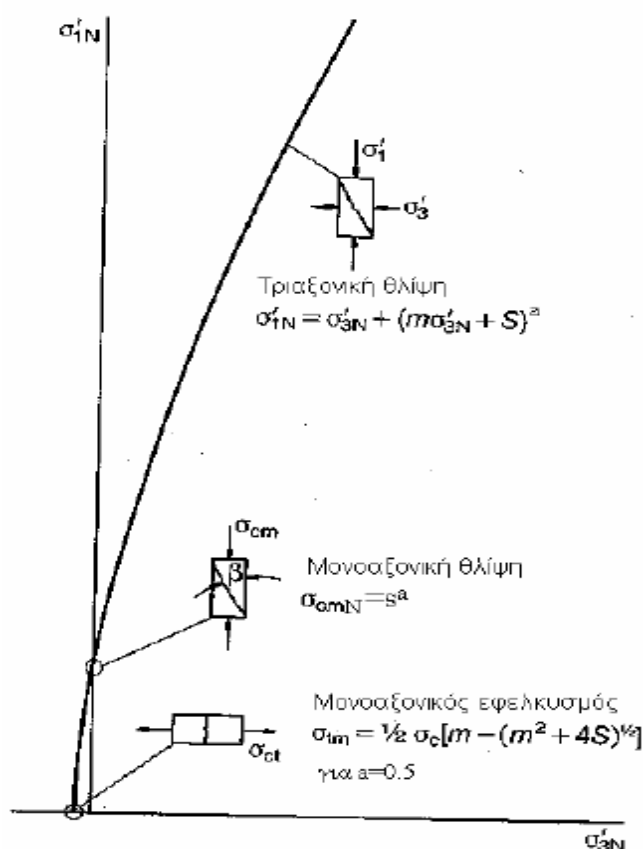
σ_3 : η ελάχιστη ενεργός τάση στην αστοχία

m_b : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από το είδος του πετρώματος και τον τεκτονισμό του. Είναι ανάλογη με τη γωνία τριβής ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb.

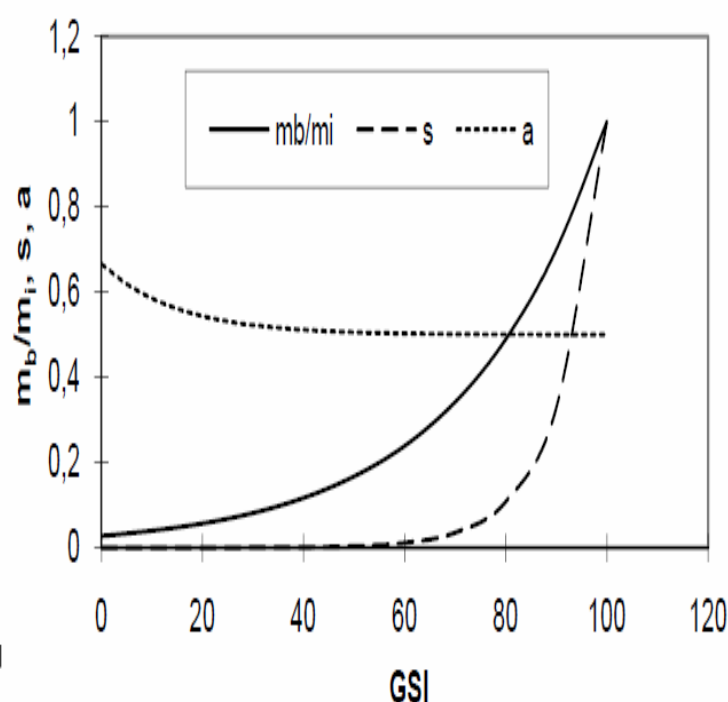
s : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Είναι ανάλογη με τη συνοχή του κριτηρίου Mohr-Coulomb.

σ_{ci} : η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος που δύναται να μετρηθεί στο εργαστήριο

a : παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 0.



Σχήμα 2.13 Κριτήριο Hoek-Brown



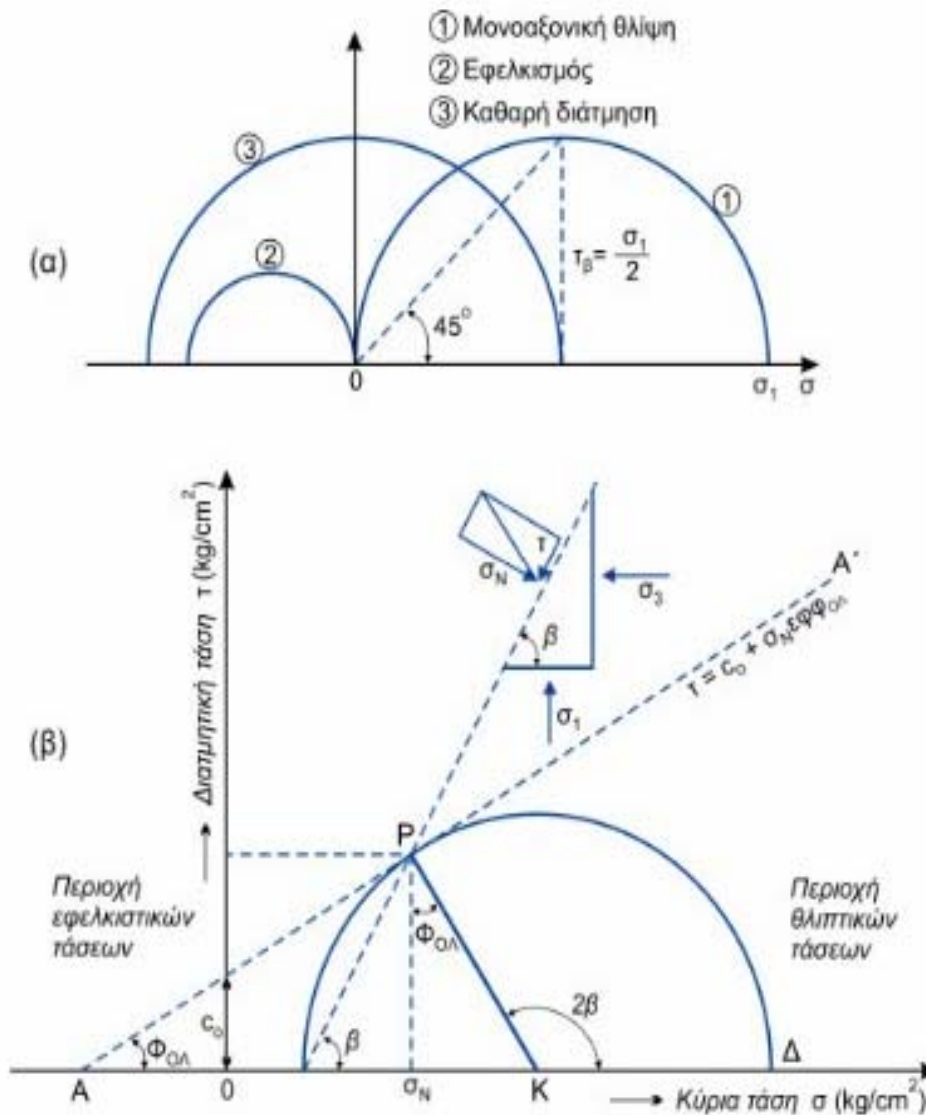
Σχήμα 2.14 Παράμετροι κριτηρίου Hoek-Brown

2.5.8 Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Στη βραχώδη όπως και στα εδάφη ισχύει το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb:

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

Σύμφωνα με το οποίο η διατμητική αντοχή κατά μήκος κάθε επιφάνειας διάρρηξης εκφράζεται συνάρτηση της συνοχής c και της γωνίας τριβής φ .



Σχήμα 2.15 Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb

α) Τασικοί κύκλοι Mohr για ορισμένες απλές περιπτώσεις εντατικής κατάστασης
 β) Διατμητικές παράμετροι και επιφάνεια αστοχίας κατά την τριαξονική καταπόνηση ψαθυρού βραχώδους υλικού.
 (από Δημόπουλος, 2007)

2.6 Ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών

2.6.1 Γενικά

Η προσέγγιση της ευστάθειας των βραχωδών πρανών διαφέρει αυτής των εδαφικών από την ύπαρξη των ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχώμαζα και αποτελούν επίπεδα αδυναμίας και επιφάνειας εκδήλωσης ασυνεχειών. Ο γεωλογικός παράγοντας εδώ παίζει σημαντικό ρόλο καθόσον οι επιμέρους παράμετροι μηχανική περιγραφής των ασυνεχειών πρέπει να προσδιοριστούν επακριβώς, έτσι ώστε να εκτιμηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο της δομής της βραχώμαζας. Ανάλογα με το μοντέλο αυτό και τις επιτόπου συνθήκες, εκτιμώνται οι αναμενόμενες αστοχίες και γίνεται ανάλυση της ευστάθειας με τις μεθόδους της οριακής ισορροπίας, κατά μήκος συγκεκριμένων πλέον επιφανειών ολίσθησης χρησιμοποιώντας και τις αντίστοιχες κατά περίπτωση παραμέτρους διατμητικής αντοχής.

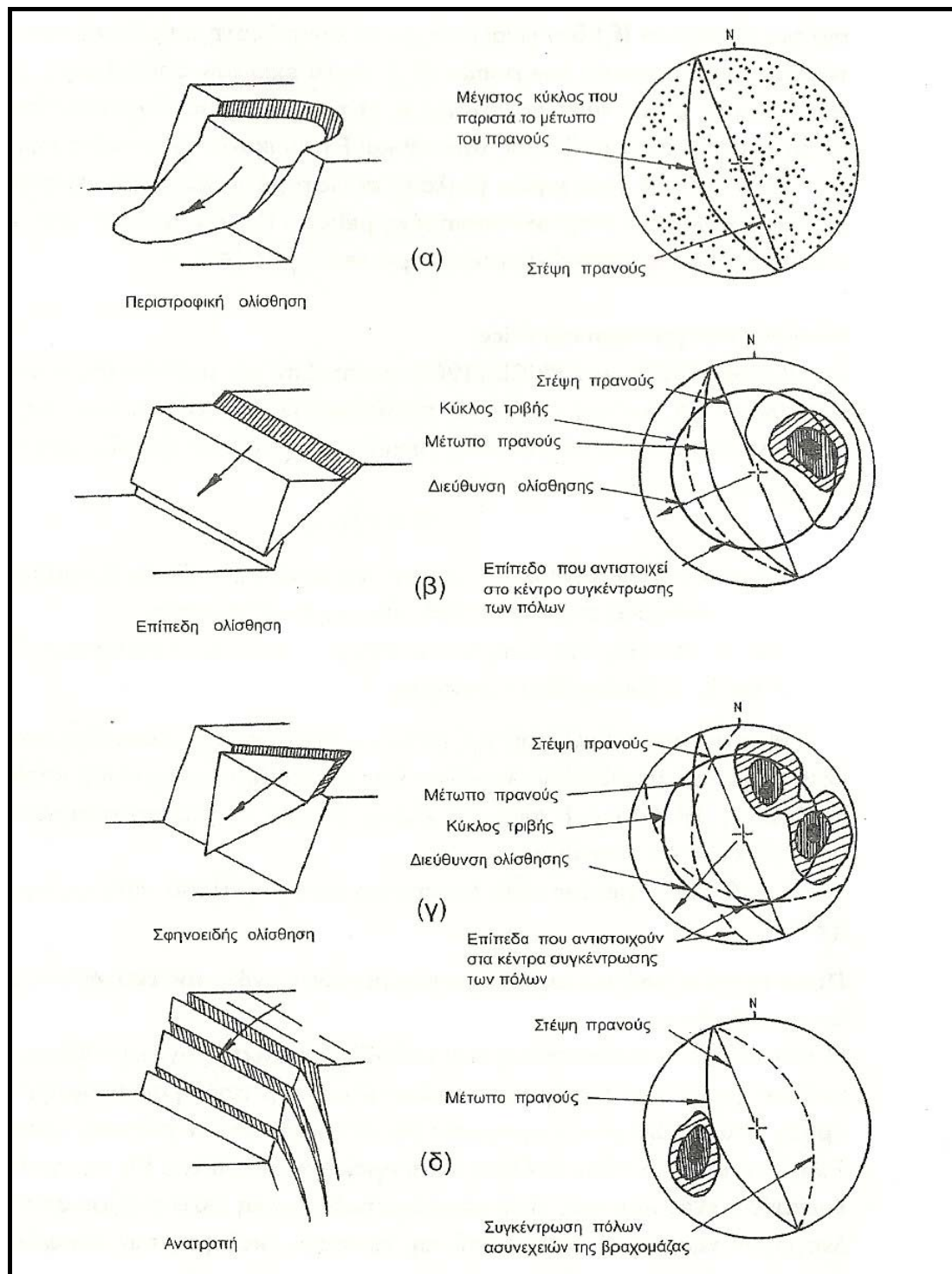
2.6.2 Εκτίμηση δυνητικών ολισθήσεων

Αποτελεί το πρώτο βήμα των αναλύσεων ευστάθειας σε βραχώδη πρανή, καθόσον δίνει τη βασική πληροφόρηση σχετικά με τις δυνατότητες εκδήλωσης κάποιας μορφής αστάθειας στο πρανές, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στα συστήματα των ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχώμαζα. Συνεπώς, η βασική παράμετρος που υπεισέρχεται στο πρόβλημα είναι ο προσανατολισμός των επιπέδων των ασυνεχειών και η σύγκριση του με τον αντίστοιχο προσανατολισμό του επιπέδου του πρανούς.

Η αποτύπωση των επιπέδων, πρανούς και ασυνεχειών, γίνεται ως γνωστόν στο στερεοδιάγραμμα Schmidt. Στο στερεοδιάγραμμα επίσης αποτυπώνεται ο κύκλος τριβής των ασυνεχειών, δηλαδή ο κύκλος που αντιπροσωπεύει τη γωνία τριβής των ασυνεχειών (συνήθως τη βασική γωνία τριβής ϕ_0). Ο κύκλος αυτός είναι ομόκεντρος του μέγιστου κύκλου με κλίση μετρούμενη από την περιφέρεια προς το κέντρο.

Οι δυνατές περιπτώσεις που μπορούν να εκτιμηθούν με βάση το στερεοδιάγραμμα είναι οι παρακάτω (Σχήμα 14):

- Έντονη διασπορά των πόλων των ασυνεχειών, χωρίς την ύπαρξη συγκεκριμένων συστημάτων, πιστοποιεί έντονα διακλασμένη και τετονισμένη βραχώμαζα. Δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος μια μεικτής επιφάνειας ολίσθησης κατά προσέγγιση **κυκλοειδούς μορφής**. (Σχήμα 14a.)
- Ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών (δηλαδή συγκέντρωση πόλων) με προσανατολισμό ίδιο με του πρανούς, συνεπάγεται δυνατότητα εκδήλωσης **επίπεδης ολίσθησης** κατά μήκος του συγκεκριμένου επιπέδου ασυνεχειών. (Σχήμα 14b.)
- Ύπαρξη δύο συστημάτων ασυνεχειών που το σημείο τομής τους εμπίπτει στη ζώνη μεταξύ του πρανούς και του κύκλου τριβής των ασυνεχειών. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται συνθήκες εκδήλωσης **σφηνοειδούς ολίσθησης** κατά μήκος της τομής των δύο επιπέδων. (Σχήμα 14c.)
- Ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών με διεύθυνση περίπου ίδια με αυτήν του πρανούς αλλά με αντίθετη φορά κλίσης που δημιουργεί συνθήκες εκδήλωσης **ανατροπών**. (Σχήμα 14d)



Σχήμα 2.16 Βασικοί τύποι ολισθήσεων βραχωδών πρηνών σε αντίστοιχα διαγράμματα στατιστικής επεξεργασίας πόλων ασυνεχειών – αποτύπωσης κυρίων επιπέδων (Hoek and Bray 1973)
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

2.7 Μέθοδοι ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών

2.7.1 Ανάλυση ευστάθειας σε επίπεδη ολίσθηση

Η ολίσθηση κατά επίπεδο είναι μία σχετικά σπάνια περίπτωση σε βραχώδη πρανή, και αυτό επειδή σπάνια όλες οι γεωμετρικές συνθήκες που απαιτούνται για τη δημιουργία μιας τέτοιας αστοχίας μπορούν να υπάρχουν σ' ένα πρανές.

Για να συμβεί ολίσθηση κατά επίπεδο, οι παρακάτω γεωμετρικές συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται (σχήμα 2.1):

- Η διεύθυνση του επιπέδου ολίσθησης πρέπει να είναι σχεδόν παράλληλη ($\pm 20^\circ$) με τη διεύθυνση του πρανούς.

- Το επίπεδο ολίσθησης πρέπει να "ανατέλλει" στο μέτωπο του πρανούς, δηλ. $\psi_f > \psi_p$.

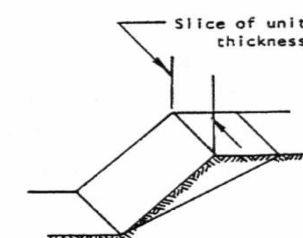
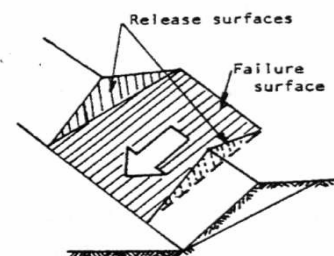
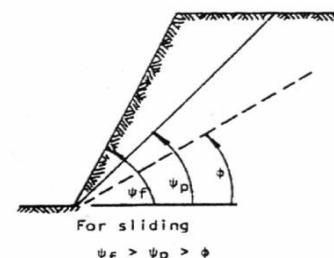
- Η γωνία κλίσης του επιπέδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος, $\psi_p > \phi$.

- Η παρουσία πλευρικών επιφανειών απελευθέρωσης που προβάλλουν ασήμαντη αντίσταση στην ολίσθηση και να καθορίζουν τα πλευρικά όρια της ολίσθησης.

Στην ανάλυση προβλημάτων δυσδιάστατων πρανών είναι σύνηθες να θεωρούμε τέμαχος απειροελάχιστου πάχους με γωνίες κάθετες ως προς την επιφάνεια του πρανούς.

Η γεωμετρία του πρανούς που εξετάζεται σ' αυτή την ανάλυση δίνεται στο σχήμα 16. Δύο περιπτώσεις θεωρούνται:

- Πρανές με ρωγμή εφελκυσμού στην άνω οριζόντια επιφάνειά του.



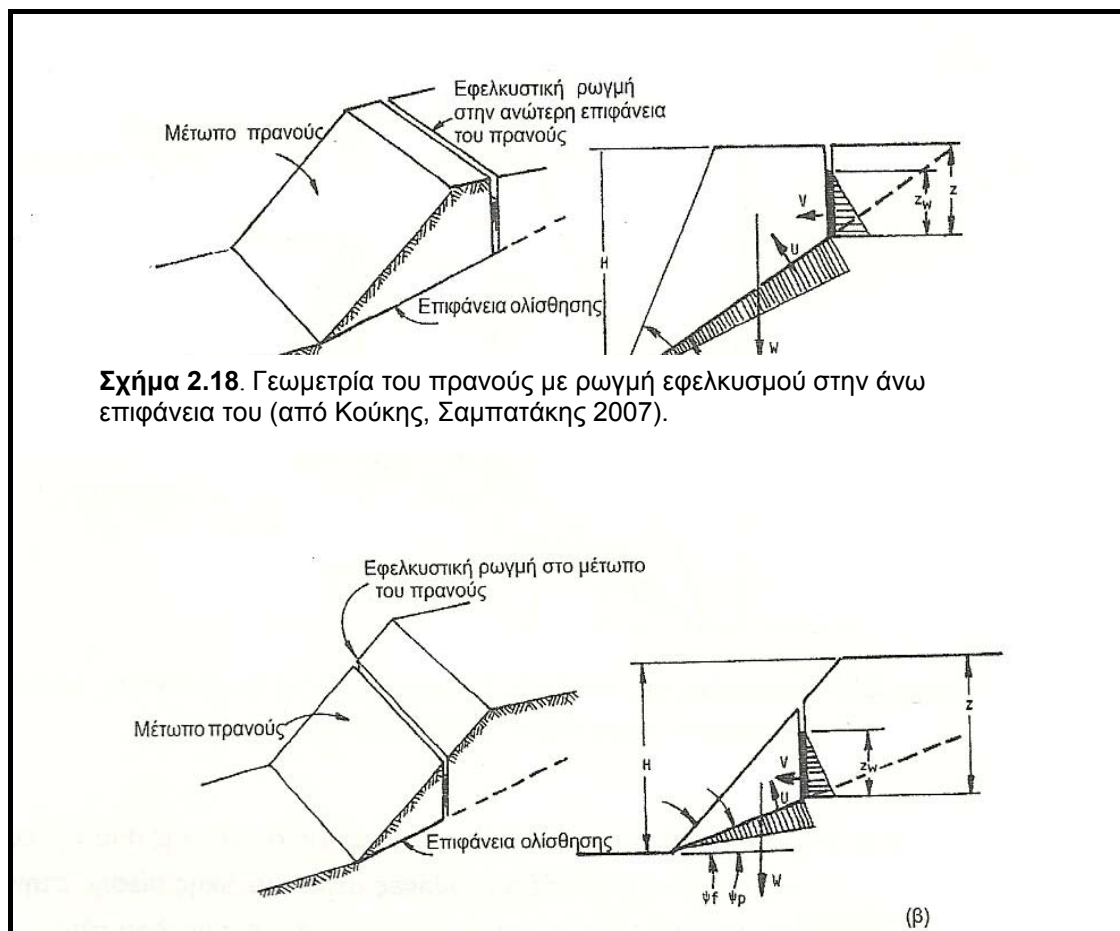
Σχήμα 2.17 Βασικές συνθήκες για επίπεδη ολίσθηση

- Πρανές με ρωγμή εφελκυσμού που βρίσκεται στο μέτωπο του. Η μετάβαση από τη μία περίπτωση στην άλλη συμβαίνει όταν η ρωγμή εφελκυσμού συμπίπτει με την κορυφή του πρανούς, δηλ. όταν:

$$z/H = (1 - \cot \psi_f \cdot \tan \psi_p) \quad (1)$$

Οι παρακάτω παραδοχές γίνονται σ' αυτή την ανάλυση:

- Η επιφάνεια ολίσθησης και η ρωγμή εφελκυσμού είναι παράλληλες με την επιφάνεια του πρανούς.
- Η ρωγμή εφελκυσμού είναι κατακόρυφη και πληρωμένη με νερό έως ένα βάθος z_w .
- Το νερό διεισδύει από τη βάση της ρωγμής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, διαφεύγοντας στην ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο που η επιφάνεια ολίσθησης «ανατέλλει» μέτωπο του πρανούς. Η κατανομή της πίεσης στη ρωγμή εφελκυσμού και κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης φαίνεται στο σχήμα 16.



Σχήμα 2.18. Γεωμετρία του πρηνούς με ρωγμή εφελκυσμού στην άνω επιφάνεια του (από Κούκης, Σαμπατάκης 2007).

Σχήμα 2.19. Γεωμετρία του πρηνούς με ρωγμή εφελκυσμού στο μέτωπο (από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

- Οι δυνάμεις W (βάρος του block ολίσθησης), U και V (υδροστατικές πιέσεις στην επιφάνεια ολίσθησης και στη ρωγμή εφελκυσμού) δρουν στο κέντρο της ολισθαίνουσας μάζας. Μι άλλα λόγια, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ροπές που θα προκαλέσουν περιστροφή του τεμάχους (block) και ως εκ τούτου η αστοχία γίνεται μόνο με ολίσθηση. Τα σφάλματα που προκύπτουν από αυτή την παραδοχή είναι πολύ μικρά στην πράξη. Ωστόσο σε απότομα πρηνή που έχουν ασυνέχειες με μεγάλη κλίση, θα πρέπει να ελέγχεται η πιθανότητα να συμβούν ανατροπές.
- Η διατμητική αντοχή της επιφάνειας ολίσθησης σχετίζεται με τη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή με τη σχέση: $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$.
- Θεωρείται μία φέτα μοναδιαίου πάχους και υποτίθεται ότι επιφάνειες απελευθερώσεως είναι παρούσες, έτσι ώστε να μην υπάρχει αντίσταση στην ολίσθηση στα πλευρικά όρια της αστοχίας.

Στη περίπτωση αυτή ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \psi_p - U - V \cdot \sin \psi_p) \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \psi_p + V \cdot \cos \psi_p} \quad (2)$$

όπου από το σχήμα 2.2

$$A = (H - z) \cdot \operatorname{cosec} \psi_p \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w \cdot A = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w \cdot (H - z) \cdot \operatorname{cosec} \psi_p \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w^2 \quad (5)$$

Για τη ρωγμή εφελκυσμού στην άνω επιφάνεια του πρανούς (σχήμα 16):

$$W = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot [(1 - (z/H)^2) \cot \psi_p - \cot \psi_f] \quad (6)$$

Για τη ρωγμή εφελκυσμού στο μέτωπο του πρανούς (σχήμα 2.2β):

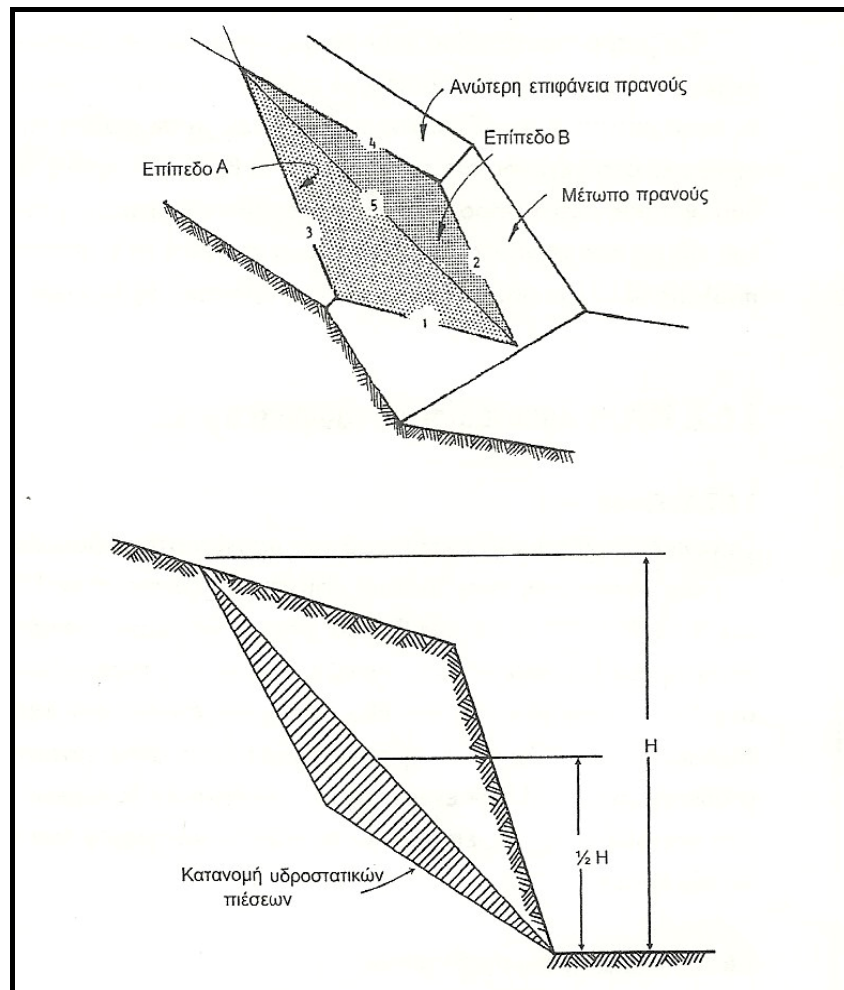
$$W = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot [(1 - z/H)^2 \cot \psi_p \cdot (\cot \psi_p \cdot \tan \psi_f - 1)] \quad (7)$$

2.7.2 Ανάλυση ευστάθειας σε σφηνοειδή ολίσθηση

Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται με την αστοχία ενός πρανούς όπου η ολίσθηση γίνεται κατά μήκος της τομής δύο επιφανειών ασυνέχειας. Ο βασικός μηχανισμός της ολίσθησης είναι πολύ απλός, αλλά λόγω του πλήθους των παραμέτρων που εμπριέχονται, η μαθηματική του προσέγγιση γίνεται σύνθετη. Οι απλές επίσης εξισώσεις έχουν περιορισμένο πεδίο εφαρμογής, πάντως είναι χρήσιμες για τον αρχικό έλεγχο της ευστάθειας του πρανούς.

Η γεωμετρία της σφήνας, για το σκοπό της ανάλυσης του βασικού μηχανισμού ολίσθησης δίνεται στο σχήμα 18. Σ' αυτή την ανάλυση έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

- Όπως και στην περίπτωση της ολίσθησης κατά επίπεδο, η συνθήκη ολίσθησης είναι $\psi_f > \psi_i > \varphi$, όπου ψ_f είναι η γωνία κλίσης του πρανούς και ψ_i η γωνία κλίσης της γραμμής τομής των δύο επιπέδων ως προς την οριζόντια. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αυτών ορίζεται ως γωνία ξ . Η γωνία που σχηματίζεται από τη διάμεσο της γωνίας ξ και το οριζόντιο επίπεδο που περνάει από τον πόδα της σφήνας είναι η γωνία β .
- Αν θεωρήσουμε A και B τα επίπεδα δύο μεγάλων επιφανειών ασυνέχειας, ως B καλείται αυτό με τη μεγαλύτερη γωνία κλίσης.
- Η αστοχία σφήνας συμβαίνει μόνο με ολίσθηση και ελέγχεται μόνο από τη τριβή.
- Η γωνία εσωτερικής τριβής φ είναι ίδια και για τα δύο επίπεδα.



Σχήμα 2.20 Γεωμετρία σφήνας σε συνθήκες ολίσθησης
(από Κούκης, Σαρπατάκης 2007)

Με την προϋπόθεση ότι η ολίσθηση της σφήνας θα γίνει κατά μήκος της τομής των δύο επιπέδων, ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{3}{\gamma \cdot H} \cdot (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot X \right) \cdot \tan \varphi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot Y \right) \cdot \tan \varphi_B \quad (1)$$

Όπου:

C_A, C_B : η συνοχή στα επίπεδα Α και Β

Φ_A, Φ_B : η γωνία εσωτερικής τριβής στα επίπεδα Α και Β

γ : το φαινόμενο βάρος του πετρώματος

γ_w : το φαινόμενο βάρος του νερού

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2na}} \quad (2)$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cdot \cos \theta_{lnb}} \quad (3)$$

$$A = \frac{\cos \psi_a - \cos \psi_b \cdot \cos \theta_{na-nb}}{\sin \psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}} \quad (4)$$

$$B = \frac{\cos \psi_b - \cos \psi_a \cdot \cos \theta_{na-nb}}{\sin \psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}} \quad (5)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Γενικά

Τα μέτρα προστασίας περιλαμβάνουν γενικά εργασίες και κατασκευές τεχνικών έργων που έχουν σαν βασικό σκοπό την πρόληψη των φαινομένων (προληπτικά μέτρα) ή την αποκατάσταση και σταθεροποίηση μιας εδαφική μετακίνησης (μέτρα αποκατάστασης ή σταθεροποίησης).

Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων αποτελεί το ζητούμενο αποτέλεσμα της συνολικής έρευνας σε μία κατολισθαίνουσα ζώνη και προϋποθέτει υπαίθριες έρευνες, εκτέλεση επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών, αναλύσεις ευστάθειας κ.λπ.

Η βασική διαφοροποίηση των προληπτικών μέτρων και των μέτρων αποκατάστασης ή σταθεροποίησης, είναι ο χρονικός παράγοντας που αυτά υλοποιούνται, δηλαδή πριν ή μετά την εκδήλωση του φαινομένου αντίστοιχα.

3.2 Μέτρα προστασίας σε εδαφικά πρανή

3.2.1 Αποφυγή του προβλήματος

Η γεωλογική αναγνώριση αποτελεί ένα πολύ βασικό τμήμα της προκαταρκτικής μελέτης για πολλά έργα οδοποιίας. Στο πλαίσιο αυτής εντοπίζονται όλα τα πιθανά προβλήματα αστάθειας λόγω περιορισμένης επιφανειακής αποστράγγισης, εμφανίσεις νερού στην επιφάνεια υπαρχόντων φυσικών πρανών, φαινομένων ερπυσμού σε λοφώδη πρανή και της ύπαρξης παλιών κατολισθήσεων.

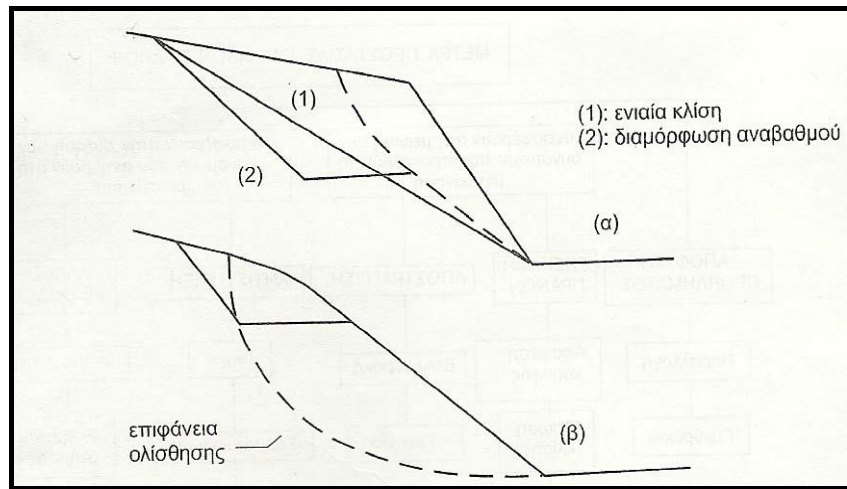
Η αποφυγή του προβλήματος μιας κατολισθαίνουσας περιοχής μπορεί να γίνει με τις παρακάτω μεθόδους:

- Παραλλαγή ή αλλαγή χάραξης, ώστε η οδός να απομακρυνθεί από την επικίνδυνη περιοχή.
- Γεφύρωση. Κατασκευή γέφυρας της οποίας τα ακροβάθρα θα πρέπει να είναι θεμελιωμένα σε σταθερό έδαφος (εκτός της μετακινούμενης ζώνης).

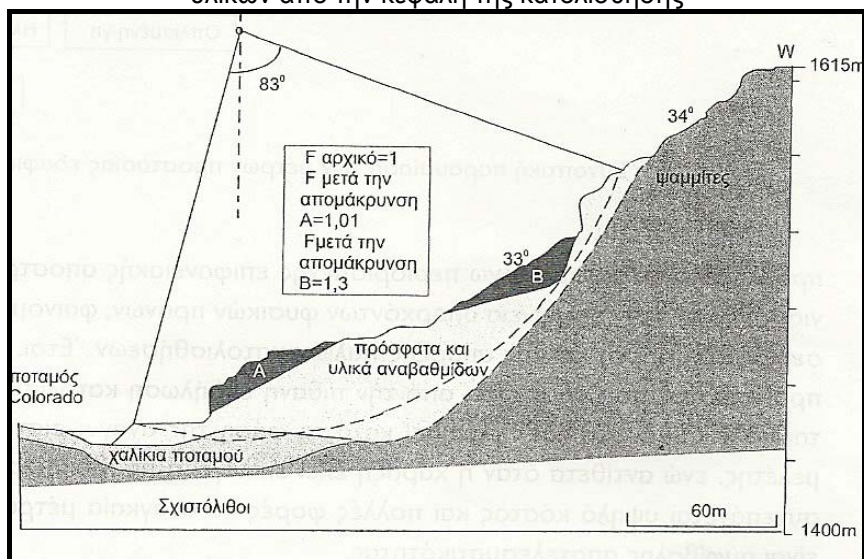
3.2.2 Εκσκαφή – διαμόρφωση πρανών

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται εργασίες διαμόρφωσης των πρανών που έχουν σαν αποτέλεσμα μεταβολές στην κλίση τους, απομακρύνσεις ολισθημένων υλικών κ.λπ. Είναι καθαρά χωματουργικές εργασίες, το εύρος των οποίων καθορίζεται με βάση τις αναλύσεις ευστάθειας. Συνήθως αποβλέπουν:

- Στη μείωση της μέσης κλίσης των πρανών, η οποία μπορεί να επιτευχθεί εκτός από την διαμόρφωση ενιαίας κλίσης και με τη διαμόρφωση αναβαθμών(Σχήμα 19α). Βέβαια η διαμόρφωση αναβαθμών σε σχετικά χαλαρά εδαφικά υλικά γενικά αποφεύγεται λόγω του γρήγορου εκφυλισμού τους.
- Στην απομάκρυνση υλικών κυρίως από την κεφαλή αλλά και το κύριο σώμα ολισθαίνουσας μάζας ή ακόμα ολική αφαίρεση της κατολισθαίνουσας μάζας. Τα υλικά απομακρύνονται από την ολισθαίνουσα ζώνη ή εναποτίθενται στο πόδι της ολίσθησης.



Σχήμα 3.1. Διαμόρφωση (α) ενιαίας κλίσης στο πρηνές ή αναβαθμών (β) απομάκρυνση υλικών από την κεφαλή της κατολίσθησης



Σχήμα 3.2 Σταθεροποίηση κατολίσθησης μετά από μερική αφαίρεση της κεφαλής (από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

3.2.3 Αποστράγγιση

Είναι το πιο σημαντικό μέτρο προστασίας (πρόληψης και αποκατάστασης) το οποίο έχει και την ευρύτερη χρήση. Η αποστράγγιση συνεισφέρει στη μείωση του βάρους της εδαφικής μάζας που τείνει να μετακινηθεί και παράλληλα αυξάνει τη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών του πρηνούς, λόγω της μείωσης της πίεσης του νερού των πόρων.

Μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι:

- Επιφανειακή αποστράγγιση
- Υπόγεια αποστράγγιση

Η επιφανειακή αποστράγγιση αναφέρεται σε νερά που προέρχονται από επιφανειακή απορροή και από βροχοπτώσεις. Απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό, προσφέρει άμεση προστασία στα πρηνή και εντάσσεται γενικά μεταξύ των πρώτων μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται για την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων αστάθειας. Τα πιο συνηθισμένα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται είναι:

- Τάφροι παροχέτευσης
- Εγκάρσια στραγγιστήρια
- Επεμβάσεις – επικαλύψεις

Η υπόγεια αποστράγγιση είναι εξίσου σημαντική σε πρανή και επιχώματα ενώ έχει βασικό στόχο τον περιορισμό της δυνατότητας ανάπτυξης πιέσεων πόρων ικανών να μειώσουν σημαντικά τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος των αποστραγγιστικών έργων είναι σημαντικά μικρότερο όταν εφαρμόζονται στα προληπτικά μέτρα παρά στα μέτρα αποκατάστασης.

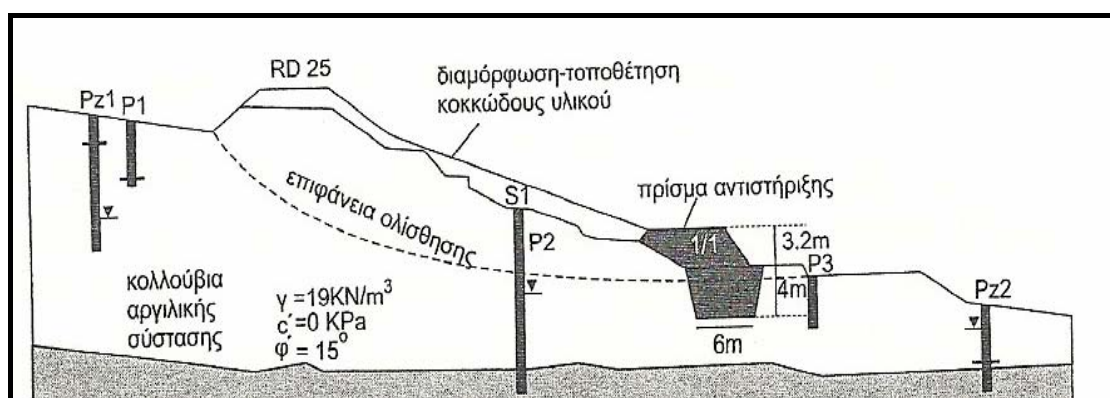
Οι πιο συνήθεις τεχνικές υπόγειας αποστράγγισης είναι:

- Στραγγιστικές τάφροι
- Στραγγιστικές κουβέρτες
- Αποστραγγιστικά φρεάτια
- Στραγγιστήρια
- Αποστραγγιστικές στοές ή σήραγγες

3.2.4 Αντιστήριξη

Περιλαμβάνει την κατασκευή διάφορων τεχνικών έργων που έχουν σαν σκοπό την εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων στο πρανές, ώστε να αυξηθεί η αντίσταση του σε μετακίνηση και να βελτιωθεί η ευστάθεια του. Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται συνήθως στον πόδα της επικίνδυνης προς μετακίνηση εδαφικής μάζας και περιλαμβάνουν τα εξής τεχνικά έργα:

- Τοίχοι αντιστήριξης: Περιλαμβάνει τοίχους βαρύτητας, τοίχους με πρόβολο και διάφορα πετάσματα.
- Συρματοκιβώτια: Είναι συνήθως τετραγωνικού σχήματος κλουβιά από μεταλλικό πλέγμα και πληρωμένα με βραχώδη υλικά τα οποία τοποθετούνται στο πρανές με την μορφή «τοίχου».
- Πρίσματα και αντιρήδες: Η βασική θεώρηση της κατασκευής πρισμάτων είναι η προσφορά ικανοποιητικού αντίβαρου στον πόδα της ασταθούς μάζας ώστε να προληφθεί η μετακίνηση.
- Πάσσαλοι: Η λύση αυτή επιβάλλεται σε περιπτώσεις που υπάρχει υψηλή επικινδυνότητα στην ευστάθεια κάποιου σημαντικού τεχνικού έργου και η επιφάνεια ολίσθησης είναι σε βάθος τέτοιο που τα άλλα συστήματα αντιστήριξης δεν επιφέρουν κάποιο αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.3. Κατασκευή πρίσματος για τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης La Rochelambert της Γαλλίας (από LCPC Guide technique 1998)
(από Κούκης, Σαμπατάκης 2007)

3.3 Μέτρα προστασίας σε βραχώδη πρανή

3.3.1 Γενικά

Ο βασικός διαχωρισμός των μέτρων προστασίας στα βραχώδη πρανή έχει σχέση, στο χρονικό παράγοντα που αυτά υλοποιούνται δηλαδή πριν ή μετά την εκδήλωση του φαινομένου.

3.3.2 Αγκυρώσεις

Οι αγκυρώσεις γενικά συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας κυρίως με την αύξηση των κάθετων δυνάμεων που επενεργούν στις κρίσιμες επιφάνειες αδυναμίας (ασυνέχειες). Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση τόσο βραχωδών όσο και εδαφικών πρανών και διέπονται από τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Τα αγκύρια έχουν μήκος 5-50m και μεταβιβάζουν δυνάμεις από 150 -2500 kN, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσουν μέχρι 10000 kN ενώ εφαρμόζονται σε βραχώδεις αλλά και σε εδαφικούς σχηματισμούς.

Από πλευράς στατικής λειτουργίας καθώς επίσης και του ρόλου τους στην εντατική κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου (βραχώμαζα ή έδαφος) διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ενεργά, που προεντείνονται στην τελική φάση κατασκευής τους και επιβάλλουν μία καινούργια δύναμη που συμβάλλει στην σταθεροποίηση
- Παθητικά, που δεν παραλαμβάνουν καμία δύναμη με την εγκατάστασή τους αλλά ενεργοποιούνται όταν αρχίσει η παραμόρφωση.

Τέλος τα αγκύρια στα εδαφικά πρανή είναι ενεργά και συνήθως εφαρμόζονται με την ενίσχυση τοίχων αντιστήριξης ενώ στα βραχώδη πρανή μπορεί να είναι παθητικά ή ενεργά ή ακόμα και κοχλίες.



Σχήμα 3.4. Αγκύριο βράχου
(από Ε. Αλέξη 2010)

3.3.3 Τοίχοι

Οι τοίχοι αυτοί είναι συνήθως οπλισμένοι φέρουν οπές αποστράγγισης και συχνά ενισχύονται με προεντεταμένες αγκυρώσεις. Με τον τρόπο αυτό επέρχεται καλύτερη κατανομή των εφελκυστικών τάσεων των αγκυρώσεων μέσω του τοίχου στην χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα.

3.3.4 Εκτοξευμένο σκυρόδεμα

Είναι ένα είδος σκυροδέματος που αποτελείται από μείγμα τσιμέντου, άμμου και λεπτόκοκκου υλικού με νερό, που εκτοξεύεται από ειδική αντλία με μεγάλη ταχύτητα και υπό πίεση και με τον τρόπο αυτό εφαρμόζεται και προσκολλάται στο βραχώδες πρανές. Συμβάλει στην ενίσχυση του πρανούς και στην προστασία του από τους αποσθαρρωτικούς παράγοντες.

3.3.5 Αποστράγγιση

Περιλαμβάνονται γενικά τα αντίστοιχα έργα που απαιτούνται στην περίπτωση εδαφικών πρανών και αναφέρονται στην επιφανειακή και υπόγεια αποστράγγιση και περιγράφηκαν παραπάνω.

3.3.6 Αλλαγή κλίσης – αποφόρτισης

Είναι ακριβώς οι ίδιες εργασίες που αναφέρονται και στα εδαφικά πρανή (εκσκαφή – διαμόρφωση). Η βασική διαφοροποίηση είναι ότι στα σχετικά υψηλά βραχώδη πρανή, είναι συνηθισμένη η διαμόρφωση αναβαθμών ανά 10m περίπου ύψους πρανούς. Το πλάτος των αναβαθμών είναι τουλάχιστον 5m. Οι αναβαθμοί έχουν συνήθως ελαφριά κλίση προς το εσωτερικό του πρανούς και στην άκρη φέρουν τάφρο παροχέυτευσης.

3.3.7 Ξεσκάρωμα βράχων

Γίνεται απομάκρυνση των επικίνδυνων για κατάπτωση βράχων από το μέτωπο του πρανούς. Το ξεσκάρωμα μπορεί να γίνει:

- Με χειρονακτικά – μηχανικά μέσα
- Με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών

3.3.8 Τοίχοι αναχαίτισης

Είναι άκαμπτες κατασκευές από σκυρόδεμα οι οποίες έχουν σαν βασικό σκοπό τη συγκράτηση των καταπτώσεων. Κατασκευάζονται στα άκρα των πλατυσμάτων – τάφρων αναχαίτισης και το ύψος τους είναι της τάξης 1,50-2,00m ενώ αυτό το ύψος μπορεί να αυξηθεί στην περίπτωση απότομων πρανών.

3.3.9 Πλέγματα συγκράτησης

Η τοποθέτηση του στο μέτωπο του βραχώδους πρανούς, αποτελεί έναν τρόπο συγκράτησης των περιορισμένου όγκου βραχωδών τεμαχών και παρεμπόδισης τους από κατάπτωση επί του τεχνικού έργου (π.χ. δρόμου). Το πλέγμα στο ανάντη άκρο του προσδένεται κατάλληλα με περιμετρικό συρματόσχοινο το οποίο πακτώνεται πίσω από το μέτωπο του πρανούς με την τοποθέτηση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης.



Σχήμα 3.5. Μέτρα προστασίας έναντι καταπτώσεων (Hoek 2000)
(από Β. Μαρίνος 2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

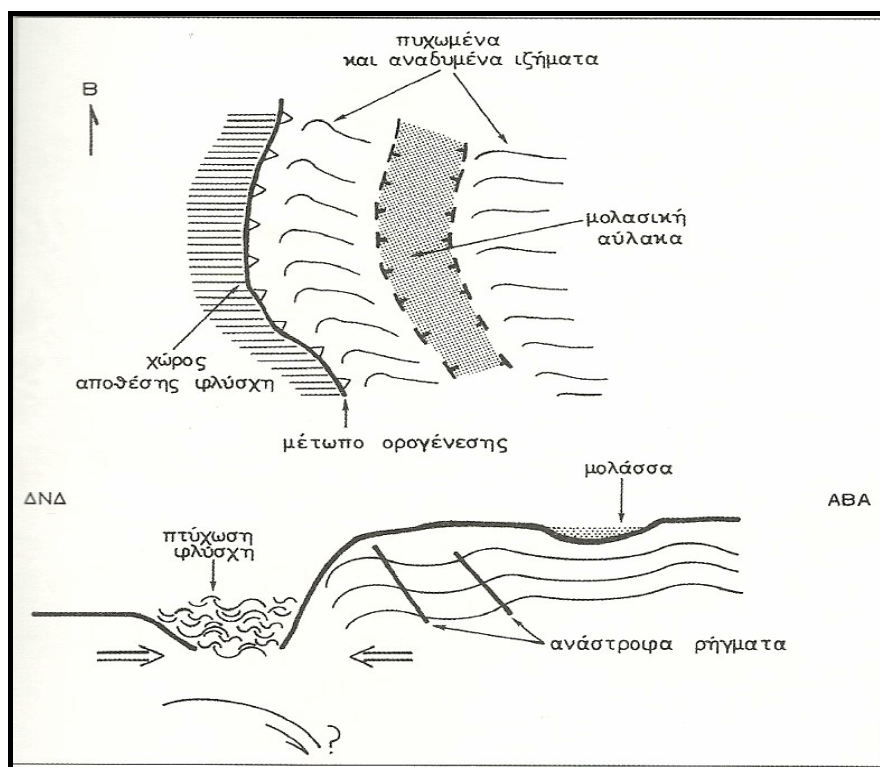
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

4.1 Γενικά

Το όνομα μολάσσα προέρχεται από ένα τοπικό ελβετικό όνομα που αποδόθηκε αρχικά σε μαλακό ψαμμίτη σχετιζόμενο με μάργα και κροκαλοπαγή που ανήκαν στο Τριτογενές και ο οποίος είχε μεγάλη ανάπτυξη στα πεδινά τμήματα της Ελβετίας έχοντας δημιουργηθεί από υπολείμματα της αποσάθρωσης και διάβρωσης του Αλπικού ορεινού περιγύρου.

Η μολάσσα είναι περιγραφικός όρος παράλιας (μερικώς θαλάσσιας και μερικώς δελταικής ή ηπειρωτικής) ιζηματογενούς φάσης. Χαρακτηρίζεται από πολύ παχιά ακολουθία μαλακών, απολιθωματοφόρων και διασταυρούμενων στρωμάτων κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, πηλόλιθων, και μαργών. Επίσης, από πρωτογενείς ιζηματογενείς δομές και μερικές φορές από αποθέσεις άνθρακα. Η μολάσσα είναι ένας εκτεταμένος μεταορογενετικός σχηματισμός που αντιπροσωπεύει το σύνολο των πετρογραφικών φάσεων οι οποίες προήλθαν από την έντονη διάβρωση των ανερχόμενων οροσειρών κατά την διάρκεια και αμέσως κατά την κύρια παροξυσμική φάση της ορογένεσης.

Πιο συγκεκριμένα τα μολασσικά ιζήματα αποθέτονται σε μεγάλες αύλακες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της ορογενετικής πτύχωσης στο χώρο ακριβώς πίσω από το μέτωπο της ορογένεσης και παράλληλα σε αυτό, ακριβώς μπροστά από τις αποθέσεις του φλύσχη. Το περιβάλλον λοιπόν είναι ήρεμο γεωλογικά και τα συμπιεστικά φαινόμενα περιορίζονται κυρίως στα κράσπεδα των νέων λεκανών.



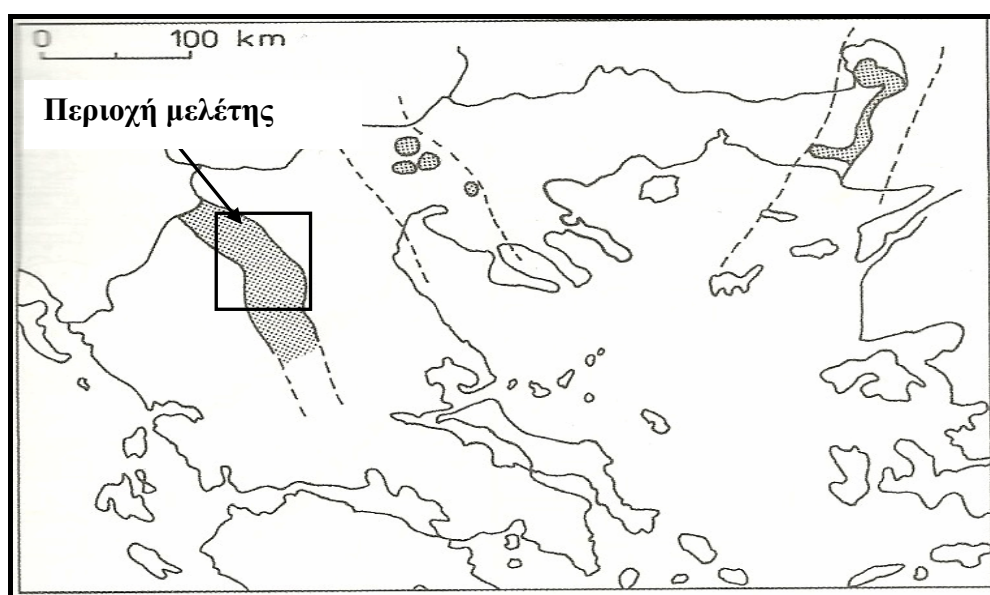
Σχήμα 4.1. Χώρος απόθεσης μολασσικών ιζημάτων (από Δ.Μουντράκης 2010)

4.2 Μολασσικά ιζήματα Ελλάδος

Στο Τριτογενές τρεις μεγάλες αύλακες αναπτυχθήκαν στον ελληνικό χώρο κατά την διάρκεια της εξέλιξης της τελικής ορογενετικής δράσης. Από τα ανατολικά προς τα δυτικά είναι:

- A. Η μολασσική αύλακα του Έβρου
- B. Η μολασσική αύλακα Αξιού
- Γ. Η Μεσοελληνική μολασσική αύλακα

Μεμονωμένες μικρές εμφανίσεις μολασσικών σχηματισμών αναφέρονται και σε νοτιότερες περιοχές, όπως στην Εύβοια, τη Βοιωτία, την Αττική και τις Κυκλάδες, αλλά δεν είναι δυνατή η οριοθέτηση τους σε μια ή περισσότερες συγκεκριμένες μολασσικές αύλακες. Η απόθεση τους άρχισε το Ηώκαινο και έληξε το Μέσο Μειόκαινο.



Χάρτης 4.1 Γεωγραφική εξάπλωση των μολασσικών ιζημάτων στον ελληνικό χώρο (από Δ. Μουντράκης 2010)

A. Μολασσική αύλακα Έβρου

Η αύλακα Έβρου αναπτύχθηκε στο γεωλογικό χώρο της Ροδόπης και της συνέχειας της Περιοδοπικής ζώνης. Δεν είναι γνωστή η έκτασης της. Ίσως κάλυπτε μεγαλύτερο χώρο στη Ροδόπη και τα ιζήματα της διαβρώθηκαν με αποτέλεσμα σήμερα να βρίσκονται μόνο μικρές έκτασης εμφανίσεις στην περιοχή Έβρου – Αλεξανδρούπολης. Μεγάλα τμήματα της μολάσσας βρίσκονται και στον υποθαλάσσιο χώρο του Βορείου Αιγαίου. Τα ιζήματα είναι κυρίως κροκαλοπαγή ψαμμίτες, μάργες, και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Μέσου Ηώκαινου – Ολιγοκαινού.

B. Μολασσική αύλακα Αξιού

Οι σημερινές μολασσικές εμφανίσεις εντοπίζονται στη ζώνη Παιονίας, πιστεύεται όμως ότι ο χώρος της αύλακας είχε μεγαλύτερη έκταση ανάμεσα στη Σερβομακεδονική και στην Πελαγονική. Οι περισσότερες αποθέσεις μολάσσας καλύπτονται σήμερα από χερσαίες Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις της κοιλάδας του Αξιού και της ευρύτερης πεδιάδας της Θεσσαλονίκης. Η ιζηματογένεση της Τριτογενούς αύλακας Αξιού ήταν πολυφασική, μολασσική δηλαδή θαλάσσια,

λιμναία, χερσαία. Αποτελείται από ψαμμίτες, μάργες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή και ασβεστόλιθους ηλικίας Ανωτέρου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου – Άνω Μειοκαίνου.

Γ. Μεσοελληνική αύλακα

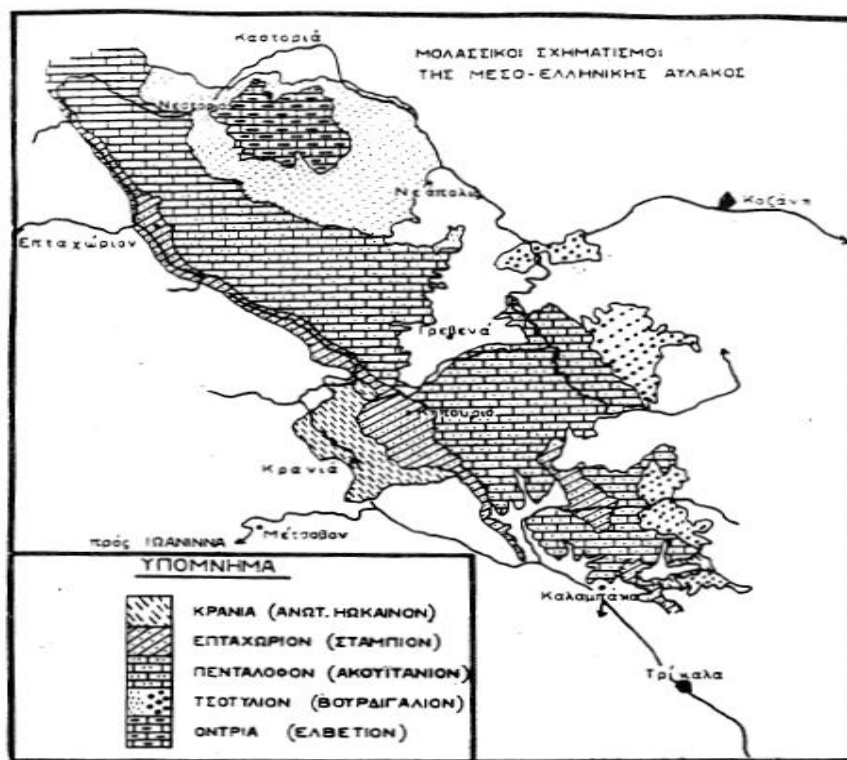
Είναι η σχετικά νεότερη, μεγαλύτερη και σπουδαιότερη μολασσική αύλακα και διατηρείται στην πλήρη της δομή και στρωματογραφία, γιατί βρίσκεται πλησιέστερα στο νέο ορογενετικό μέτωπο των Ελληνίδων. Έχει μήκος περίπου 140km και πλάτος 40km. Με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ καλύπτει τις περιοχές Νότιας Αλβανίας, Καστοριάς, Γρεβενών και Καλαμπάκας. Οι διαδοχικές φάσεις των μολασσικών ιζημάτων, με συνολικό πάχος 5000m και ηλικία Ανωηωκαινική μέχρι Ανωμειοκαινική είναι:

Τα κατώτερα ιζήματα είναι κροκαλοπαγή και λατυποπαγή. Προέρχονται από θαλάσσιες επικλύσεις πάνω στο οφιολιθικό αλπικό υπόβαθρο. Συνολικό πάχος 200m. Τα ιζήματα αυτά αποτελούν τη **σειρά Κρανιας**. Ακολουθούν λιγνιτοφόρα λιμναία στρώματα μαργών με μικρές ποσότητες ψαμμιτών και κροκαλοπαγών πάχους 600m.

Σειρά Επταχωρίου.

Ακολουθεί η παχιά σειρά κροκαλοπαγών και ψαμμιτών (**σειρά Πενταλόφου-Μετεώρων**), που έχει ηλικία μέσω Μειόκαινο. Στους κατώτερους ορίζοντες βρίσκονται πολύμικτα κροκαλοπαγή με χαρακτηριστικές διασταυρούμενες στρώσεις και στους ανώτερους κροκαλοπαγή με αρκετές ενστρώσεις ψαμμιτών και μαργών. Πάνω σε αυτά βρίσκονται τα μοναστήρια των Μετεώρων. Τα ιζήματα είναι κυρίως θαλάσσιας φάσης με επίδραση όμως και της ποταμοχειμάρριας μεταφοράς και απόθεσης. Συνολικού πάχους 3000m. Πάνω στη σειρά των κροκαλοπαγών επικάθεται μια νέα λιμναία φάση με μάργες και λιγνίτες. Πάχος 600m. **Σειρά Τσοτυλίου.**

Η τελευταία σειρά που ακολουθεί περιλαμβάνει από κάτω προς τα πάνω ψαμμίτες ασβεστόλιθους, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με ενστρώσεις λιγνιτών. Είναι κυρίως θαλάσσιας φάσης με παρεμβολές όμως και λιμναίας. Πάχος 600m. **Σειρά Καστονοχωρίου.**



Χάρτης 4.2. Οι μολασσικοί σχηματισμοί της Μεσοελληνικής Αύλακας (κατά Bruun, 1956, απλοποιημένο από Παπανικολάου και Σιδέρη, 1977)

4.3 Λιθολογία μολασσικών σχηματισμών (λιθότυποι)

Οι διάφοροι τύποι της μολάσσας, αφορούν κυρίως εναλλαγές ψαμμιτικών και ιλυολιθικών πετρωμάτων με διαφορετική κάθε φορά ποσόστωση και πάχη στρωμάτωσης. Επίσης πολύ σημαντική είναι και η παρουσία παρεμβολών κροκαλοπαγών με μεγάλα πάχη και συνέχεια. Τα χαρακτηριστικά τεκτονικής, αποσάθρωσης και περατότητας κάθε λιθότυπου έχουν μικρές διαφορές και θεωρούνται όμοια χάρη της ανάγκης για ομαδοποίηση της τεχνικογεωλογικής πληροφορίας και ταξινόμησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των λιθότυπων που ορίσαμε και ταξινομήσαμε για την μολάσσα.

I. Ιλυόλιθοι με πολύ σποραδικές ενστρώσεις ψαμμιτών

Ο λιθότυπος αυτός αποτελείται, σχεδόν αποκλειστικά από ιλυολίθους-μαργαϊκούς ιλυολίθους, με σπάνιες λεπτές ψαμμιτικές ενδιάστρώσεις. Οι ιλυόλιθοι ενδέχεται να έχουν σημαντική παρουσία αργιλικών υλικών και διογκώσιμων ορυκτών. Το κύριο επίπεδο αδυναμίας που αναπτύσσεται μέσα στη βραχώμαζα είναι η στρώση, όχι πάντα με διακριτή συνέχεια στο βάθος. Οι ιλυόλιθοι παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στην αντοχή τους και μπορεί να είναι υγιείς έως πλήρως αποσαθρωμένοι (κοντά στην επιφάνεια). Η λιθολογική ετερογένεια και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία όπως ασυνέχειες και μικροπτυχώσεις που υπάρχουν, λανθάνοντα στη γεωλογική μνήμη των σχηματισμών, δεν εκδηλώνονται παρά μόνο αν εκτεθούν, π.χ. κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή και με την επίδραση του αέρα και της υγρασίας, στρώση και ασυνέχειες διαχωρίζουν τον ιλυόλιθο με την εκδήλωση σχάσης που καταλήγει σε πλήρη κατάρρευση του ιστού της βραχώμαζας.



Εικόνα 4.1. Τυπική μορφή ιλυόλιθων με πιθανές αραιές ενστρώσεις ψαμμιτών στον σχηματισμό της μολάσσας στην επιφάνεια.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

II. Ιλυόλιθοι με κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμιτών.

Αποτελείται κατά βάση από ιλυόλιθους – μαργαϊκούς ιλυόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται ψαμμιτικά στρώματα που κυμαίνονται σε πάχος από λεπτούς ορίζοντες πάχους λίγων εκατοστών έως ψαμμιτικούς πάγκους πάχους 4-5m. Το κύριο επίπεδο αδυναμίας που αναπτύσσεται μέσα στη βραχώμαζα είναι η στρώση, καθώς έχει την απαραίτητη συνέχεια και ιδιαίτερα στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο λιθολογικών τύπων. Ένα ικανό ποσοστό των επιφανειών της έχει φτωχά χαρακτηριστικά μέσα στον ιλυόλιθο όπως και στον προηγούμενο τύπο. Στην επαφή ιλυολίθων-ψαμμιτών υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες ανάπτυξης υγρασίας. Στην υγιή τους κατάσταση οι σχηματισμοί παρουσιάζονται μαζώδεις. Η λιθολογική ετερογένεια και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία όπως ασυνέχειες και μικροπτυχώσεις που υπάρχουν στην λανθάνοντα γεωλογική μνήμη των σχηματισμών, δεν εκδηλώνονται παρά μόνο αν εκτεθούν ή βρίσκονται μέσα στη ζώνη επίδρασης των παραγόντων της αποσάθρωσης με την εκδήλωση σχάσης κατά τα προηγούμενα.

III. Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών

Ο τύπος αυτός αποτελείται από συστηματικές εναλλαγές ιλυολίθων-ψαμμιτών με τράπεζες ολίγων δεκάδων εκατοστών έως ολίγων μέτρων (~5m) σε παρόμοιες αναλογίες. Στην επιφάνεια οι σχηματισμοί είναι στρωσιγενείς λόγω της μείωσης του περιορισμού (περίσφιξης) του. Η λιθολογική ετερογένεια και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία όπως ασυνέχειες και μικροπτυχώσεις που υπάρχουν στην λανθάνοντα γεωλογική μνήμη των σχηματισμών, εκδηλώνονται μόνο στην επιφάνεια λόγω της σχάσης των σχηματισμών.



Εικόνα 4.2 Τυπική μορφή εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων σε ισομερή ποσοστά σε επιφανειακό σχηματισμό μολάσσας (από Β. Μαρίνος, 2007)

IV. Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με κατά θέσεις ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων.

Αποτελούνται από ψαμμιτικά στρώματα με πάχος από 50cm έως λίγα μέτρα (~5m). Τα στρώματα του ψαμμίτη διαχωρίζονται από ιλυολιθικές ενδιαστρώσεις πάχους ολίγων cm έως 30cm. Είναι συμπαγείς και μπορεί να εμφανίζουν αποχωρισμό-απολέπιση παράλληλα στη στρώση μόνο κοντά στην επιφάνεια. Οι σχηματισμοί είναι λίγο εύθρυπτοι στην επιφάνεια αλλά άμεσα στο βάθος είναι υγιείς.

V. Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Αποτελείται από ψαμμιτικά στρώματα μεγάλου πάχους (>5m) και διαχωρίζονται από αραιές λεπτές ιλυολιθικές ενδιαστρώσεις (ολίγων cm). Οι ψαμμίτες έχουν μεγάλες αντοχές όμως όταν είναι ιλυώδεις ή μαργαϊκοί. Είναι συμπαγείς μεσο-αδρόκοκκοι και μπορεί να εμφανίζουν αποχωρισμό-απολέπιση παράλληλα στη στρώση μόνο κοντά στην επιφάνεια.



Εικόνα 4.3 Τυπική μορφή παχυστρωματωδών ψαμμιτών με αραιές ενστρώσεις ιλυολίθων σε επιφανειακό σχηματισμό μολάσσας (από Β. Μαρίνος, 2007)

VI. Κροκαλοπαγείς σχηματισμοί

Ο τύπος αυτός βρίσκεται συνήθως σε ενστρώσεις μέσα στην μολάσσα και λιγότερο συνιστά ανεξάρτητους ορίζοντες με μεγάλο πάχος. Οι βράχοι των Μετεώρων π.χ. αποτελούν εξαίρεση. Αποτελούνται από μέτρια έως πολύ καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή τα οποία πάντως μπορούν να διαμορφώνουν μάζες σημαντικού πάχους συχνά ακανόνιστους. Η συγκόλληση των κροκαλοπαγών μπορεί να είναι ασθενείς έως μέτρια, κυρίως όταν αποτελείται από ιλυοαργιλικά υλικά, ενώ μπορεί να είναι ιδιαίτερα ισχυρά όταν η συνδετική ύλη είναι αμιγώς ασβεστοψαμμιτική. Οι κροκάλες προέρχονται από τα πετρώματα του αλπικού υποβάθρου και είναι κυρίως οφιολιθικές και ασβεστολιθικές, ενώ αναγνωρίζονται ακόμη και γνευσιακές.



Εικόνα 4.4. Χαρακτηριστική εμφάνιση κροκαλοπαγούς στον σχηματισμό της μολάσσας.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

4.4 Τεκτονισμός

Καθώς η μολάσσα χαρακτηρίζει μια σειρά ιζημάτων που σχηματίστηκαν και εξελίχτηκαν μετά την κύρια (τελευταία) ορογένεση, δεν έχει υποστεί συμπίεση ή διάτμηση. Συνεπώς τα ιζήματα αυτά δεν παρουσιάζουν οργανωμένα συστήματα διακλάσεων, πτυχώσεων ή διατμήσεων. Απλώς μπορεί να περιέχουν ήπιες κυμάνσεις κάμψης των στρωμάτων της. Η κλίση των στρωμάτων είναι συνήθως μικρή, οι περιπτώσεις με γωνίες κλίσης μεγαλύτερες των 30° είναι σπάνιες.

Υπάρχουν φυσικά ρήγματα βαρύτητας, όπως σε όλες τις μετά-τεκτονικές λεκάνες, αλλά η επιδρασή τους στην μείωση της ποιότητας του πετρώματος είναι περιορισμένη. Έτσι στα όρια των λεκανών τους, οι μολασσικοί σχηματισμοί μπορεί να είναι παραμορφωμένοι και επωθημένοι από μία ύστερη, τοπική δημιουργία τεκτονικών καλυμμάτων, κατά την «απόσβεση» των πτυχώσεων. Να σημειωθεί εδώ ότι υπήρξε μια μικρή στιγμιαία φάση συμπίεσης κατά το Μειόκαινο, μέσα στο γενικότερο εφελκυστικό περιβάλλον. Αυτή η φάση δεν έδωσε όμως παρά ανάστροφα ρήγματα με τοπική επίδραση στην υποβάθμιση της ποιότητας της μολάσσας. Η υποβάθμιση αυτή αναφέρεται στην παρουσία, επαναλαμβανόμενη πολύ τοπικά, επιφανειακών με ασθενή χαρακτηριστικά και στην βραχώμαζα συνολικά (όπως στον τεκτονισμό του φλύσχη).

Η στρώση είναι η βασική επιφάνειας ασυνέχειας σε μία μολασσική βραχώμαζα, αλλά εκφράζεται μόνο στην επιφάνεια.

4.5 Αποσάθρωση

Οι ιλυόλιθοι της μολάσσας είναι πολύ ευπαθείς στην αλλοίωση και στη σχάση παράλληλα με τις επιφάνειες των στρώσεων όταν αυτά τα πετρώματα είναι εκτεθειμένα ή βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Στις επιφανειακές εμφανίσεις απαντούν σε λεπτές στρώσεις, όπως οι ιλυολιθικοί σχιστόλιθοι, και όταν εναλλάσσονται με ψαμμίτες, η εμφάνιση τους μοιάζει με την ακολουθία των εναλλαγών φλύσχη.

Η μορφή των επιφανειακών εμφανίσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα, μπορεί να είναι παραπλανητική όταν εξετάζεται η συμπεριφορά αυτών των μολασσικών πετρωμάτων σε βάθος (π.χ. σήραγγες).

Το γεγονός αυτό μπορεί να διαπιστωθεί εάν συγκριθεί η εμφάνιση των πυρήνων δειγματοληπτικής γεώτρησης που μόλις έχει διανοιχτεί (Εικόνα 4.5) με εκείνη των πυρήνων μετά από περίπου 6 μήνες στην αποθήκη όπου εφυλάσσοντο, όπως στο (Εικόνα 4.6).

Σε έναν άμεσα εξαχθέντα πυρήνα πολλές φορές λοιπόν, δεν διαχωρίζονται τα στρώματα ψαμμίτη και ιλυολίθου της μολάσσας, αφού ο πυρήνας ενδέχεται να είναι συνεχής για εκτεταμένα μήκη. Μόνο μετά την έκθεσή τους στην ατμόσφαιρα, αρχίζουν οι πυρήνες του ιλυολίθου να αναπτύσσουν σχάση και, μετά από λίγο καιρό, καταρρέουν σε μία ιλυώδη – πηλώδη χαλαρή μάζα. Η διαδικασία αυτή, η οποία επηρεάζει και τους ιλυώδεις ψαμμίτες, μπορεί να οδηγήσει σε μία σημαντική παρερμηνεία των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των μολασσών, εάν τα δείγματα των γεωτρήσεων δεν εξεταστούν αμέσως.



Εικόνα 4.5 Εμφάνιση των πυρήνων γεώτρησης μολασσικού πετρώματος αμέσως μετά την δειγματοληψία. Υπάρχουν ψαμμίτες και ιλυόλιθοι. Το βάθος είναι περίπου 45m. (από Β. Μαρίνος, 2007)

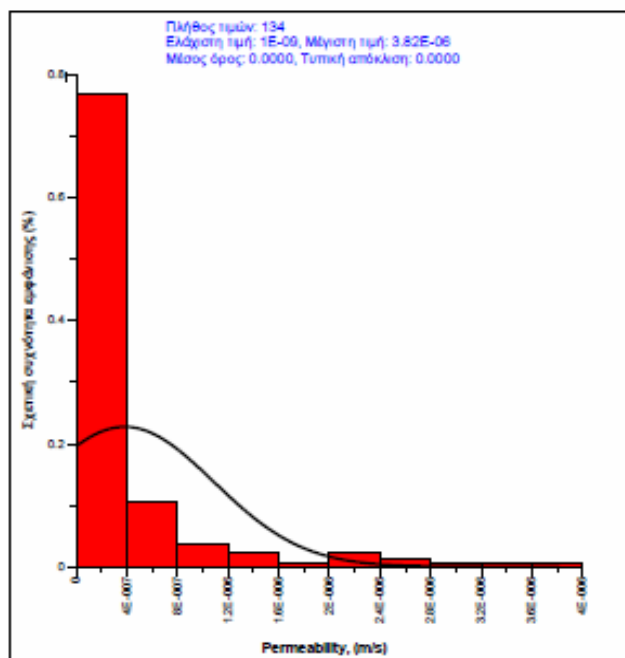


Εικόνα 4.6. Εμφάνιση των ίδιων πυρήνων που εμφανίζεται στην παραπάνω εικόνα αλλά μετά από 6 μήνες στην αποθήκη. Ο ψαμμίτης παραμένει ακέραιος αλλά οι ιλυόλιθοι εμφανίζουν σχάση ακολουθούμενη από κατάρρευση του αρχικού υλικού. (από Β. Μαρίνος, 2007)

4.6 Υδρογεωλογικό καθεστώς

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από συνολική χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, χαρακτηριστικό των ιλυολίθων που κυριαρχούν. Το μικρό πορώδες και οι κλειστές ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν συνήθως τους ιλυόλιθους δημιουργούν συνθήκες χαμηλής υδροπερατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατης υδρογεωλογική συμπεριφοράς. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες κυρίως λόγω της παρουσίας περισσότερων ασυνεχειών με πιο ανοικτές διεπιφάνειες, κοντά στην επιφάνεια παρουσιάζουν γενικά υψηλότερη υδροπερατότητα συγκριτικά με του ιλυολίθους, αλλά και αυτοί στο σύνολο, σε βάθος έδειξαν από δοκιμές υδροπερατότητας ότι κυμαίνονται γενικά στην κατηγορία της χαμηλής υδροπερατότητας. Οι ορίζοντες ή οι ενστρώσεις των κροκαλοπαγών είναι δυνατόν να εμφανίζουν μια μικρής δυναμικότητας υδροφορία, η οποία μπορεί να γίνει πιο αξιόλογη εάν υπάρχουν και άλλοι παράγοντες όπως ο χαμηλός βαθμός συγκόλλησης, η σύσταση της συγκολλητικής ύλης καθώς και ο βαθμός κερματισμού τόσο των κροκαλοπαγών, όσο και των περιβαλλόντων πετρωμάτων, ώστε να διευκολύνεται η κατείσδυση και η τροφοδοσία τους.

Στο σύνολό τους, οι σχηματισμοί της μολάσσας παρουσιάζονται με τη μορφή εναλλασσόμενων οριζόντων με συχνές πλευρικές μεταβάσεις από την αδρομερή στη λεπτόκοκκη φάση και προκύπτει ότι δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός ενιαίου υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των ερευνητικών γεωτρήσεων και τις δοκιμές υδροπερατότητας που έγιναν σε διάφορα βάθη στους σχηματισμούς αυτούς. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υδροπερατότητας που έγιναν στους σχηματισμούς της μολάσσας παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2. Αποτελέσματα δοκιμών υδροπερατότητας που έγιναν σε μολασσικούς σχηματισμούς τα οποία υποδεικνύουν αρκετά χαμηλή υδροπερατότητα.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

4.7 Γεωλογικό προφίλ συμπερασμάτων μολασσικών σχηματισμών

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η συνθετότητα μιας περιοχής σε περιβάλλον μολάσσας έχει τους εξής χαρακτήρες:

- Ήρεμο τεκτονικό περιβάλλον. Τοπικές μόνο μικροδιατμήσεις και μικροπτυχώσεις. Οι ζώνες ρηγμάτων είναι περιορισμένης έκτασης και δεν έχουν διαταράξει έντονα τις περιβάλλουσες βραχόμαζες.
- Στα περιθωριακά κράσπεδα των μολασσικών λεκανών υπάρχουν αρκετά ανάστροφα ρήγματα και διατμήσεις λόγω των συμπίεσεων κατά την ορογένεση των γειτονικών-λεκανών. Οι μολάσσες σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να έχουν διαταραγμένη ή λατυποπαγή χαρακτήρα και πτωχότερα μηχανικά χαρακτηριστικά.
- Οι μολασσικοί σχηματισμοί έχουν το χαρακτηριστικό να είναι σχιστοποιημένοι-στρωματώδεις στην επιφάνεια αλλά και να γίνονται μαζώδεις-συμπαγείς μετά από λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια. Η ιδιαιτερότητα αυτή προκύπτει από την ιδιότητα των ιλυολίθων-αργιολίθων της μολάσσας να αποσχίζονται μέσα στη μάζα τους, στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της επιφάνειας, ενώ αντίθετα στο βάθος, ο περιορισμός της βραχόμαζας και η ήρεμη τεκτονική εξέλιξη δεν έχει ευνοήσει τον αποχωρισμό σε στρώσεις που έχουν λανθάνοντα χαρακτήρα.
- Στην επιφάνεια οι ιλυολιθικές βραχόμαζες είναι έντονα αποσαθρωμένες, κάτι που βοήθησε η σχάση, και πολλές φορές καταστρέφεται η αρχική δομή τους, ομοιάζοντας με εδαφικό μέσο. Οι ψαμμιτικοί πάγκοι, συχνά ιλυολιθικοί, γίνονται πιο εύθρυπτοι και η δομή τους είναι χαλαρή. Στο σύνολο οι βραχόμαζες της μολάσσας δεν δημιουργούν απότομα πρηνή ενώ εκδηλώνονται αρκετές αστάθειες τόσο σε φυσικά πρηνή αλλά και σε τεχνητά πρηνή όταν επιχειρείται αλλαγή, έστω και μικρή, της γεωμετρίας τους. Τα κροκαλοπαγή είναι συμπαγή όταν έχουν ασβεστιτικό υλικό συγκόλλησης, αλλά εμφανίζονται χαλαρά έως αποδιοργανωμένα όταν είναι αργιλικό.

4.8 Η γεωλογία της περιοχής-μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στον άξονα της Εγνατίας Οδού που περνά από τα Γρεβενά και καταλήγει στην Παναγιά. Συγκεκριμένα τοποθετείται μεταξύ των χωριών Κρασιάς και Καλλιθέας.

Η ευρύτερη περιοχή έρευνας ανήκει από γεωτεκτονικής απόψεως στη «**Μεσοελληνική αύλακα**», η οποία αναπτύσσεται στο γεωλογικό χώρο ανάμεσα στην Υποπελαγονική ζώνη (στην μεγαλύτερη έκταση) και την ζώνη Πίνδου και έχει ως αλπικό υπόβαθρο κυρίως οφειολιθικές μάζες μεγάλου πάχους αλλά και ασβεστολίθους Μεσοζωϊκούς.

Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης ανήκει στους μολασικούς σχηματισμούς **Κρασιάς** και **Κηπουριού** («σειρά Κρασιάς») οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από εναλλαγές ψαμμιτών-μαργών καθώς και από μικρές εμφανίσεις κροκαλοπαγών. Η μολάσσα Κηπουριού επικάθεται ασύμφωνα πάνω στη μολάσσα της Κρασιάς ενώ έξω από τον «κόλπο» της Κρασιάς κάθετα επικλυσιγενώς πάνω στους οφειολίθους. Στον «κόλπο» της Κρασιάς οι σχηματισμοί αποτέθηκαν πριν την γενική επίκλυση της Μεσοελληνικής Αύλακας στην περιφέρεια του οποίου τα στρώματα είναι έντονα ανορθωμένα έως αντεστραμμένα.

Επίσης σημειώνεται η παρουσία μόνο των ασβεστολίθων και δεν αναφέρεται πουθενά για παρουσία δολομιτών. Σύμφωνα με την πετρογραφική – ορυκτολογική ανάλυση το δείγμα χαρακτηρίζεται ως Βιοκλαστικός μικριτικός δολομίτης, Δολομιτικός πηλόλιθος, Πυριτιούχος δολομίτης κατά Folk, Dunham και Harben αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

Σχηματισμός Μολάσσας Κρασιάς: Πρόκειται για μία μεγάλη πάχους ακολουθία, η οποία έχει τυπικό λιθοοψικό χαρακτήρα φλύσχη και ηλικίας Αν. Ηωκαίνου. Ο σχηματισμός της Κρασιάς εμφανίζεται στην περιοχή της Κρασιάς σχηματίζοντας ένα είδος εσοχής στο δομή της Πίνδου που λόγω της επιλυσιγενούς σχέσης προς τους οφειολίθους, η οποία αντιπροσωπεύει μια παλαιοακτή, χαρακτηρίστηκε από τον Brunn σαν παλαιοκόλπος της Κρασιάς. Στην ευρύτερη περιοχή συναντώνται:

- Ψαμμίτες με αραιές ενστρώσεις ιλυολίθων
- Ιλυόλιθοι με αραιές ενστρώσεις ψαμμιτών
- Εναλλαγές ιλυολίθων - ψαμμιτών

Σχηματισμός μολάσσας Κηπουρίου (Επταχωρίου): Εμφανίζεται κατά μήκος όλου του δυτικού περιθωρίου της αύλακας και περιλαμβάνει ιλυόλιθους, συνήθως κυανούς, με πελαγικά απολιθώματα του Αν. Ολιγοκαίνου που αναπτύσσονται πάνω σε ψαμμιτοκροκαλοπαγή.

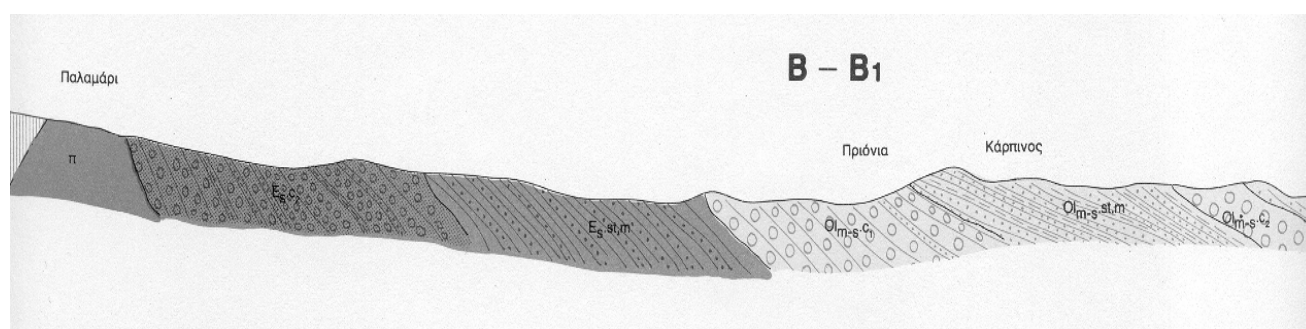
Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μολάσσας Κηπουρίου είναι οι συχνές παρεμβολές κροκαλοπαγών χωρίς κανονική ανάπτυξη τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην οριζόντια διάταξή τους. Η ανάπτυξη αυτή συνδέεται με παλαιογεωγραφικά αίτια απόθεσης τους. Στην ευρύτερη περιοχή της μολάσσας Κηπουρίου συναντώνται:

- Συνεκτικά κροκαλοπαγή βάσης με παρεμβολές ψαμμιτών και ιλυολίθων.
- Εναλλαγές ιωδών ιλυολίθων πολυγενών κροκαλοπαγών ψαμμιτών

Τέλος, τις μολассικές εμφανίσεις και τις πλαγιές των λόφων καλύπτει ελουβιακός μανδύας και πλευρικά κορήματα που αποτελείται από χαλαρά υλικά ερυθρών αργίλων, άμμων και κροκαλοπαγών. Η σύσταση τους εξαρτάται από το είδος των υποκείμενων σχηματισμών.



Χάρτης 4.3. Τμήμα γεωλογικού χάρτη περιοχής, Παναγιά Γρεβενών



Γεωλογική τομή B-B1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

5.1 Γενικά

Η μολάσσα είναι ένας ιδιαίτερος σχηματισμός λόγω της ιδιαιτερότητας να μεταβάλλει τη δομή με το βάθος αλλά και των εναλλασσόμενων πετρωμάτων στο σύνολό της. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται η τεχνικογεωλογική φύση στην βάθος αλλά και στην επιφάνεια όπου συνήθως δημιουργεί πολλά προβλήματα ευστάθειας λόγω της πολύ αποσαθρωμένης της εκεί, φύσης.

Η ιδιαιτερότητα των μολασσικών βραχομαζών επικεντρώνεται συνεπώς στην ποικίλλουσα ετερογένεια, την συμμετοχή γεωυλικών με χαμηλή αντοχή και την αλλαγή δομής προς το βάθος. Η παρουσία νερού στα ιλυολιθικά – αργιλικά πετρώματα της σειράς απομειώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, ιδιαίτερα στις επιφάνειες των στρώσεων, όταν αυτές είναι διακριτές. Τέλος, η αποσάθρωση, ενώ δρα έντονα κυρίως με τον μηχανισμό της σχιστοποίησης – σχάσης στα ιλυολιθικά στρώματα, επικεντρώνεται μόνο στην επιφάνεια.

Στην παρούσα εργασία η τεχνικογεωλογική μελέτη της μολάσσας έγινε ύστερα από σύγκριση και ερμηνείες αποτελεσμάτων από τις εργαστηριακές δοκιμές γεωτρήσεων όπου πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια διάνοιξης της Εγνατίας Οδού μέσα σε μολασσικά ιζήματα. Από τις γεωτρήσεις και τις εργαστηριακές δοκιμές τους, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης όσο και την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

Πιο συγκεκριμένα η γεωτεχνική έρευνα αποσκοπεί στον προσδιορισμό της στρωματογραφίας και κυρίως των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων των εδαφικών και κυρίως βραχωδών – μολασσικών κατά κύριο λόγο σχηματισμών, που συναντώνται στη περιοχή έρευνας, τόσο με την διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και επί τόπου δοκιμών, όσο και με την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών, στα δείγματα αυτών.

Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 4 περιοχές. Αυτές είναι η Αγία Παρασκευή, Καρατζά, Πριόνια και Βελανίδια.

Κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων μετρήθηκαν οι στάθμες των υπογείων οριζόντων και με δοκιμές Lugeon ο συντελεστής υδροπερατότητας k για την βραχώμαζα. Επίσης έγινε διερεύνηση των τοπικών στρωματογραφικών συνθηκών καθώς και ακριβής μέτρηση του δείκτη ποιότητας του RQD. Τέλος έγινε η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων για την εκτέλεση προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής στα αντίστοιχα δείγματα.

5.2 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικούς και σε βραχώδεις σχηματισμούς. Έτσι έχουμε:

α) Στους επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς (topsoil)

Δοκιμές κατάταξης, δηλαδή κοκκομετρική ανάλυση εν ξηρό με κόσκινα, όρια ATTERBERG καθώς και δοκιμές προσδιορισμού φυσικής υγρασίας, φαινομένου και ειδικού βάρους για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των συναντώμενων εδαφικών σχηματισμών

β) Στους βραχώδεις σχηματισμούς

- Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (Uniaxial Compression test) με καταγραφή της καμπύλης φορτίου-αξονικής παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό της αντοχής των βραχωδών σχηματισμών και με ταυτόχρονο προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας η τέμνουσα στο 50% της μέγιστης τάσης, καθώς και του λόγου του Poisson (ν) υπολογιζόμενο στη μέγιστη τιμή τάσης.
- Δοκιμές διάτμησης βράχου σε φυσικές ή τεχνητές ασυνέχειες με υπολογισμό των μέγιστων και παραμένουσων τιμών αντοχής, συνοχής και γωνία τριβής.
- Δοκιμές σημειακής φόρτισης δοκιμίων πετρώματος.
- Δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη χαλάρωσης πετρώματος.

5.3 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σύνθετης και ασθενής βραχώμαζας

Η μολάσσα διαμορφώνει ασθενείς και σύνθετες βραχώμαζες σύμφωνα με τα παρακάτω τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά:

- Σύνθετη βραχώμαζα
 - Εναλλαγές ικανών-καλής γενικά αντοχής στρωμάτων ψαμμίτη ή/και κροκαλοπαγούς και μη ικανών-μέτριας ή μικρής γενικά αντοχής στρωμάτων ιλυολίθου ή αργιλολίθου.
 - Αλλαγή δομής προς το βάθος (ετερογένεια και στρωσιγένεια στην επιφάνεια, ομοιογένεια και συνεχής δομή στο βάθος).
- Ασθενής βραχώμαζα
 - Παρουσία ιλυολιθικών-αργιλικών πετρωμάτων.
 - Πτωχή – ασθενής διαγένεση σε ορισμένες περιπτώσεις.
 - Αποσάθρωση των ιλυολιθικών – αργιλικών μελών από το φαινόμενο της σχάσης στην επιφάνεια.
 - Η επίδραση του νερού είναι επιβαρυντική για τα ιλυολιθικά – αργιλικά μέλη και τις ασυνέχειες τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πιο συγκεκριμένα τα παραπάνω χαρακτηριστικά της μολάσσας.

5.3.1 Εναλλαγές ικανών – μεγάλης γενικά αντοχής-ψαμμιτικών πάγκων και μη ικανών-μικρής γενικά αντοχής – ιλυολιθικών, αργιλοσχιστολιθικών στρωμάτων.

Οι εναλλαγές των στρωμάτων μπορεί να είναι συχνές έως και σποραδικές –αραιές. Ο βαθμός που επιδρά κάθε γεωολικό εξαρτάται από την ποσόστωση του στο σύνολο και ελάχιστα από την τεκτονική διαταραχή του. Έτσι, η αντοχή του «άρρηκτου» βράχου εξαρτάται και από τα δύο γεωολικά με βάση τα παραπάνω κριτήρια έχοντας μια ζυγισμένη μέση τιμή.

Ο ιλυόλιθος, ακόμα και όταν συμμετέχει σε πολύ μικρό ποσοστό, όπως π.χ. ως λεπτός υμένας – φιλμ μπορεί να ελέγχει την ολίσθηση στρωμάτων ψαμμίτη τα οποία διαχωρίζει. Από την άλλη, ένας ψαμμίτης σημαντικού πάχους όταν βρίσκεται μεμονωμένα μέσα σε μια ιλυολιθική μάζα μπορεί να δρα στη συνολική ευστάθεια και να λειτουργεί σαν γεφυροποιό στοιχείο.

Οι σχηματισμοί αυτοί είναι αποσαθρωμένοι έως πολύ αποσαθρωμένοι στην επιφάνεια, και αυτό γιατί έχουν υποστεί επιφανειακή αποσάθρωση που έχει υποβοηθηθεί λόγω του φαινομένου της σχάσης με αποτέλεσμα η βραχώμαζα να είναι πιο χαλαρωμένη.

Κύρια ασυνέχεια είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμονή, αλλά και έντονη στρωσιγένεια και πολλές φορές σχιστοποίηση (στις ιλυολιθικές ενότητες). Στις ζώνες αυτές η βραχώμαζα παρουσιάζει έντονο κερματισμό και έντονη αποσάθρωση. Το εκτιμώμενο RQD των πετρωμάτων κυμαίνεται από 0% έως 50%. Αυτά τα χαρακτηριστικά συναντώνται μέχρι το βάθος ολίγων μέτρων (~3-4m) όπου μετά έχουμε βελτίωση της ποιότητας σε σχέση με το βάθος.



Εικόνα 5.1 Χαρακτηριστική εικόνα της ετερογενούς δομής στην επιφάνεια.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

5.3.2 Αλλαγή δομής και συμπεριφοράς προς το βάθος

Η ποιότητα της βραχόμαζας αρχίζει να βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό μετά από λίγα μέτρα (~5m) και αυτή παρουσιάζεται μέτρια αποσαθρωμένη και μέτρια κερματισμένη. Σε βάθος 10-15m ανάλογα πάντως με τις επιτόπου συνθήκες συναντώνται υγιείς σχηματισμοί με πολύ συμπαγή και συνεχή δομή και στο σύνολο είναι ομοιογενείς. Το εκτιμώμενο RQD είναι μεγαλύτερο από 50%.

Βέβαια το πόσο συμπαγής μπορεί να είναι η βραχόμαζα εξαρτάται και από το πάχος των εναλλαγών των πετρωμάτων. Έτσι σε μεγάλα πάχη η βραχόμαζα μοιάζει με άρρηκτη ενώ σε μικρότερα πάχη λίγο έως μέτρια κερματισμένη.



Εικόνα 5.2 Χαρακτηριστική εμφάνιση συμπαγούς δομής με τιμές RQD>60 από πυρήνα δειγματοληψίας σε μέτριο βάθος(~15m) σε μολασσικά πετρώματα.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

5.3.3 Παρουσία ιλυολιθικών-αργιλικών πετρωμάτων (ιλυόλιθοι, μάργες, αργιλόλιθοι)

Η συχνή παρουσία ιλυοαργιλικών πετρωμάτων στους μολασσικούς σχηματισμούς μειώνει τα χαρακτηριστικά αντοχής συνολικά της βραχώμαζας καθώς οι τιμές αντοχής και παραμορφωσιμότητας των ιλυολιθικών ή αργιλοσχιστολιθικών πετρωμάτων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Χαμηλή αντοχή μπορεί να έχει και ο ψαμμίτης όταν είναι ιλυολιθικός.

5.3.4 Ασθενής διαγένεση

Οι σχηματισμοί της μολάσσας μπορεί να έχουν σε ορισμένες θέσεις της λεκάνης τους πτωχό βαθμό διαγένεσης λόγω της «νεαρής» γεωλογικά δημιουργίας τους και της μη κάλυψής τους, από άλλα πετρώματα ώστε να αποκτήσουν πιο σφικτή δομή.

5.3.5 Αποσάθρωση των ιλυολιθικών – αργιλικών μελών στην επιφάνεια

Το φαινόμενο της σχάσης επιδρά πολύ έντονα στους σχηματισμούς της επιφάνειας και κυρίως των ιλυολιθικών μελών. Η αποσάθρωση αυτή αλλοιώνει σημαντικά την αντοχή της βραχώμαζας η οποία πολλές φορές προσομοιάζει με έδαφος. Αυτός είναι και ο λόγος που το ανάγλυφο το μέγιστο πεδίο είναι κυρίως λοφώδες χωρίς μεγάλες κλίσεις. Για το λόγο αυτό εκδηλώνεται πολλές αστοχίες σε ορύγματα στα μολασσικά πετρώματα αν δεν σχεδιαστούν κατάλληλα.

5.3.6 Επίδραση των υπογείων υδάτων

Λόγω της μικρής περατότητας, το νερό που λίγο υπάρχει στα ανώτερα τμήματα στο μολασσικά πεδία, μπορεί να έχει δυσκολίες στην αποστράγγιση και να μειώνει την αντοχή της βραχώμαζας. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό όταν αναπτύσσονται αργιλόλιθοι ή ιλυόλιθοι είναι το γεγονός της ευαισθησίας των υλικών αυτών στις αλλαγές του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας.

Επειδή, τα δείγματα αλλοιώνονται πολύ γρήγορα εάν αφεθούν να στεγνώσουν μετά την αφαίρεση τους από τη βραχώμαζα τους, ο έλεγχος του «άρρηκτου» βράχου για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής αντοχής σ_c και της σταθεράς m_i θα πρέπει να διενεργείται το συντομότερο κάτω από συνθήκες που ομοιάζουν όσο το δυνατό περισσότερο με τις επιτόπου συνθήκες υγρασίας. Μια χαρακτηριστική εικόνα της άμεσης αλλοίωσης ιλυολιθικών δειγμάτων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5.3 Χαρακτηριστική εικόνα άμεσης αλλοίωσης ιλυολιθικών δειγμάτων.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

5.4 Γεωτεχνική αξιολόγηση

5.4.1 Εδαφικοί σχηματισμοί

5.4.1.1 Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής

Οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί έχουν ένα πάχος που κυμαίνεται από 0-4m. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 8m. Το εδαφικό υλικό εμφανίζεται επιφανειακά σαν ελουβιακός μανδύας και μεταβατική ζώνη μεταξύ του ελουβιακού υλικού και του βραχώδους υποβάθρου. Το υλικό αυτό προέρχεται από την πλήρη αποσάθρωση και την εδαφοποίηση του βραχώδους υποβάθρου.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η συνοχή του c , παίρνει τιμές από 5-58 Kpa ενώ η γωνία τριβής παίρνει τιμές από 22° - 34°

Οι τιμές 5 για την συνοχή και 34 για την γωνία τριβής θεωρούνται ακραίες τιμές και δεν θα τις λάβουμε υπόψιν μας διότι θα αλλοιωθούν τα πραγματικά αποτελέσματα.

Αυτές οι ακραίες τιμές είναι πιθανό να οφείλονται στην διατάραξη του δείγματος κατά την διαδικασία της γεώτρησης.

Στους πίνακες 5.1 και 5.2 που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής.

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής

Επιφανειακοί σχηματισμοί (εδαφικοί)										
Περιγραφή σχηματισμών	Βάθος	Φυσική υγρασία	Όρια Atterberg			Ξηρό φαινόμενο βάρος	Υγρό φαινόμενο βάρος	Ειδικό βάρος	Διατμητική αντοχή	Αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης
	(m)	%	LL(%)	PL(%)	PI(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(KPa)	(KPa)	(KPa)
Σκούρη άργιλος με τεμμάχη μάργας ψαμμίτη και σκούρη ιλυώδης άργιλος	0-4	14,2	48	22	26	17,00	20,55	2,71	60	532
	0-4	12,2	42	22	21	16,88	20,20	2,654	82	1222
	0-4	15	24,8	46,3	21,5	18,40	21,20	-	-	1138

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών για συνοχή και γωνία τριβής

Συνοχή c	Γωνία τριβής φ
(KPa)	(ο)
39	26
35	25
58	22
30	25
58	22
5	34
29	23

5.4.2 Βραχώδεις σχηματισμοί

5.4.2.1 Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής

Η ενότητα των βραχωδών σχηματισμών εμφανίζεται μετά τον ελουβιακό μανδύα. Αποτελείται από βραχώδες υλικό το οποίο έχει υποστεί μερική αποσάθρωση και ελαφρό τεκτονισμό λόγω της υποεπιφανειακής του εμφάνισης. Το υλικό της βραχώμαζας αποτελείται κυρίως από ψαμμίτες και ιλυόλιθους σε εναλλαγές και σε ορισμένα σημεία εμφανίζονται και ενδιαστρώσεις κροκαλοπαγών σχηματισμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακριβώς πάνω από αυτή τη ζώνη υπάρχει μία μεταβατική ζώνη που δεν ξεπερνά σε πάχος τα 2m και το υλικό είναι αρκετά αποσθρωμένο και προσεγγίζει την κατάταξή σε έδαφος αλλά ταυτόχρονα διατηρεί και τον βραχώδη ιστό του.

Στους πίνακες 5.3 5.4 και 5.5 που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών της βραχομηχανικής για ιλυόλιθο, ψαμμίτη και κροκαλοπαγές.

Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής σε ιλυόλιθο

Βραχώδεις σχηματισμοί

Περιγραφή σχηματισμών	Βάθος	RQD	Ξηρό φαινόμενο βάρος	Πυκνότητα	Αντοχή σ_{ci}	Παραμόρφωση ϵ	Μέτρο Ελαστικότητας E	Πορώδες
	(m)	(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)
Ιλυόλιθος	4	55	25,10	-	24,04	1,78	-	-
	7	45	21,66	22,70	9,43	1,18	1,67	20,10
	8	79	23,80	-	17,34	0,70	-	-
	14	60	24,20	23,90	20,17	0,52	3,72	-
	22	95	25,50	-	28,67	1,83	-	-
	29	90	-	25,10	20,04	0,44	3,75	-
	30	69	24,80	-	36,55	0,46	6,75	-
	37	70	22,87	24,60	8,93	0,46	1,69	17,60
	40	65	22,10	24,00	6,14	0,48	1,10	22,00
	45	50	22,50	-	7,32	3,57	-	-
	53	60	24,52	25,30	7,65	0,52	1,69	9,80

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής σε ψαμμίτη

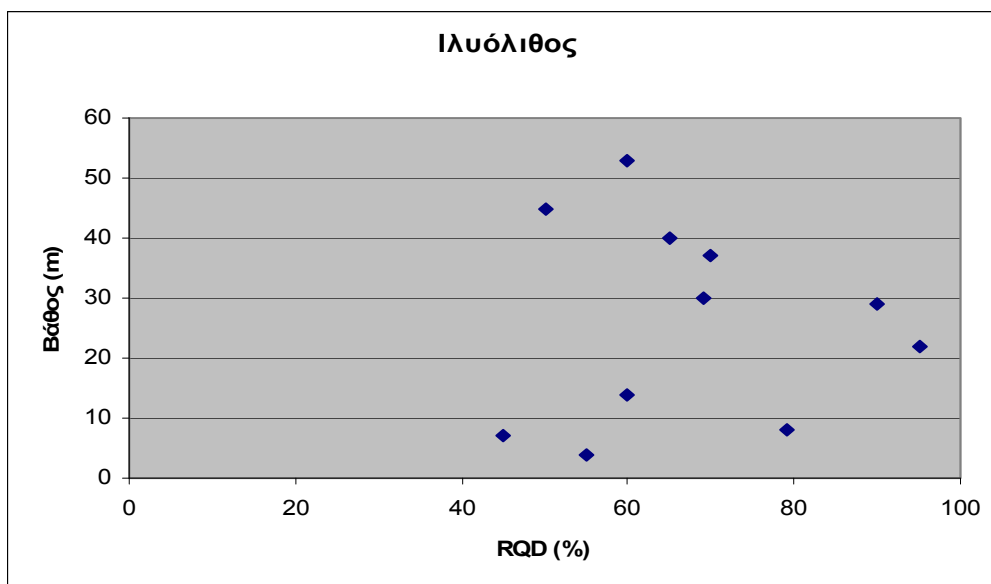
Περιγραφή σχηματισμών	Βάθος	RQD	Ξηρό φαινόμενο βάρος	Πυκνότητα	Αντοχή σ_{ci}	Παραμόρφωση ϵ	Μέτρο ελαστικότητας E	Πορώδες
Ψαμμίτης	(m)	(%)	(kN/m³)	(kN/m³)	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)
	5	94	24,90	-	15,88	0,58	2,83	-
	11	50	22,00	24,50	17,70	0,42	3,26	19,20
	14	64	24,60	-	36,13	0,50	0,58	-
	19	70	24,37	25,30	28,18	0,42	5,39	11,90
	24	60	23,67	25,20	28,69	0,46	5,37	13,10
	28	54	26,30	-	75,02	2,16	-	-
	38	70	22,87	25,00	34,62	0,45	6,42	17,60
	40	50	24,60	-	36,06	0,50	6,55	-
	42	84	24,20	-	15,44	0,61	-	-
	56	45	23,80	24,50	25,35	0,47	-	15,50
	65	70	23,57	25,10	19,92	0,54	3,50	14,70

Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής σε κροκαλοπαγές

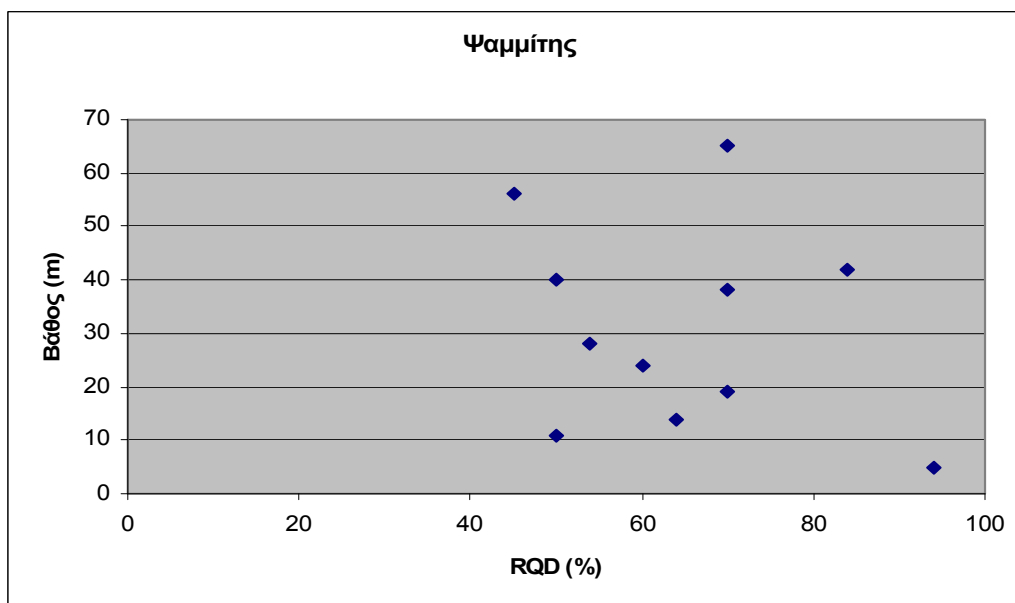
Περιγραφή σχηματισμών	Βάθος	RQD	Ξηρό φαινόμενο βάρος	Πυκνότητα	Αντοχή σ_{ci}	Παραμόρφωση ϵ	Μέτρο ελαστικότητας E	Πορώδες
Κροκαλοπαγές	(m)	(%)	(kN/m³)	(kN/m³)	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)
	5	55	26,47	25,80	42,80	0,39	8,05	1,80
	15	80	26,13	26,30	12,62	0,43	2,34	3,20
	17	80	24,75	25,50	20,71	0,45	3,88	9,00
	21	90	26,48	26,50	27,81	0,42	-	1,60
	24	70	26,42	26,50	50,09	0,45	9,45	1,60
	37	88	25,40	-	29,97	0,50	5,64	-
	46	80	26,10	-	10,63	0,45	-	-
	48	80	-	26,30	6,42	0,44	1,58	-
	54	50	-	25,30	18,37	0,32	3,34	-
	58	10	24,34	25,20	9,81	0,47	1,78	11,60

5.5 Διαγράμματα δείκτη ποιότητας αντοχής RQD σε συνάρτηση με το βάθος

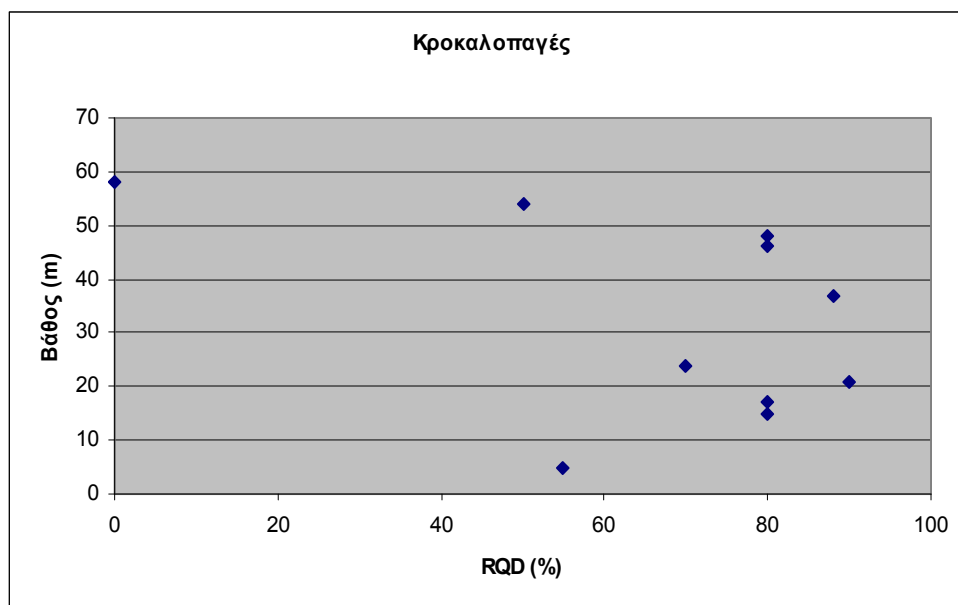
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη ποιότητας αντοχής των πετρωμάτων σε συνάρτηση με το βάθος όπως προκύπτουν από τους πίνακες των εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής.



Διάγραμμα 5.1. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων RQD σε συνάρτηση με το βάθος σε ιλυολιθικά δείγματα



Διάγραμμα 5.2. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων RQD σε συνάρτηση με το βάθος σε ψαμμικά δείγματα



Διάγραμμα 5.3. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων RQD σε συνάρτηση με το βάθος σε κροκαλοπαγή δείγματα

Πίνακας 5.6. Στατιστικά αποτελέσματα του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας RQD

RQD	Πλήθος δοκιμών	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μ.Ο.
Ιλυόλιθος	11	95	45	70
Ψαμμίτης	11	94	45	70
Κροκαλοπαγές	10	90	10	50

Οι παραπάνω τιμές RQD προέρχονται από τα αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα διαγράμματα, 5.1, 5.2 και 5.3 οι τιμές των RQD είναι σχετικά μεγάλες (>40) καθώς το πλήθος των τιμών είναι συγκεντρωμένο κυρίως στο δεξί τμήμα του διαγράμματος. Επίσης δεν μπορεί να γίνει κάποιος διαχωρισμός των τιμών RQD στην επιφάνεια και στο βάθος. Ωστόσο γνωρίζουμε από βιβλιογραφικές πηγές ότι ο σχηματισμός της μολάσας συνήθως έχει διαφορετικό δείκτη ποιότητας πετρώματος στην επιφάνεια και στο βάθος, και ιδιαίτερα όταν στην επιφάνεια έχουμε ιλυολιθικούς σχηματισμούς που είναι «ευάλωτοι» στο φαινόμενο της σχάσης. Αυτοί οι ιλυόλιθοι μπορούν να εμφανίζουν μέχρι και μηδενικό RQD στα επιφανειακά τμήματα.

5.6 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της μολάσσας

5.6.1 Γενικά

Οι ψαμμίτες που συμμετέχουν στη σύσταση της μολάσσας συχνά ιλυώδεις ή μαργαϊκοί και τότε παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές αντοχής. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή μπορεί να είναι στα επίπεδα των 10MPa εάν είναι ιλυώδεις ή μαργαϊκοί ή και περισσότερο από 50MPa στην τυπική κοκκώδη μορφή τους. Μία τιμή της τάξης των 30MPa μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τη συνήθη μονοαξονική θλιπτική αντοχή των ψαμμιτών που απαρτίζουν τις μολάσσες στην ΒΔ Ελλάδα. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή ενός τυπικού ιλυολίθου είναι περίπου 15MPa. Ωστόσο, οι ιλυόλιθοι ενδέχεται να έχουν σημαντική παρουσία αργιλικών υλικών και στην περίπτωση ενός αργιλικού ιλυόλιθου ή μίας μάργας, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 5-10MPa.

Όλοι οι ιλυόλιθοι είναι πολύ ευπαθείς στην εξαλλοίωση και στη σχασιμότητα, παράλληλα με τις στρώσεις όταν αυτά τα πετρώματα είναι εκτεθειμένα ή βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Λόγω της σχάσης αυτής, εμφανίζονται σε λεπτές στρώσεις στις επιφανειακές εμφανίσεις, σαν ιλυολιθικοί σχιστόλιθοι, και όταν εναλλάσσονται με ψαμμίτες οι εμφανίσεις της μολάσσας ομοιάζουν με εκείνες του φλύσχη.

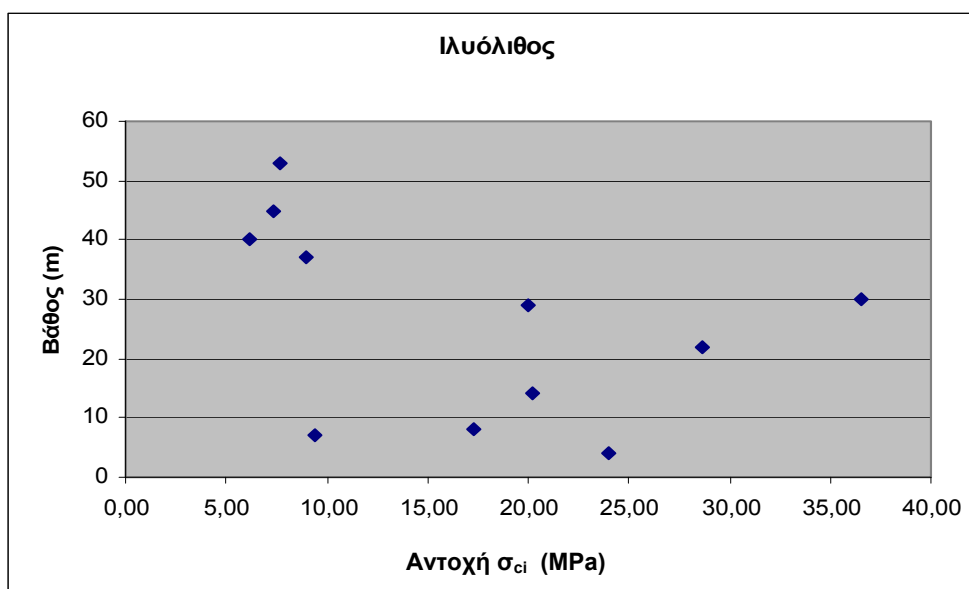
Παρακάτω φαίνεται μια χαρακτηριστική εικόνα της σχάσης των ιλυολιθικών σχηματισμών.



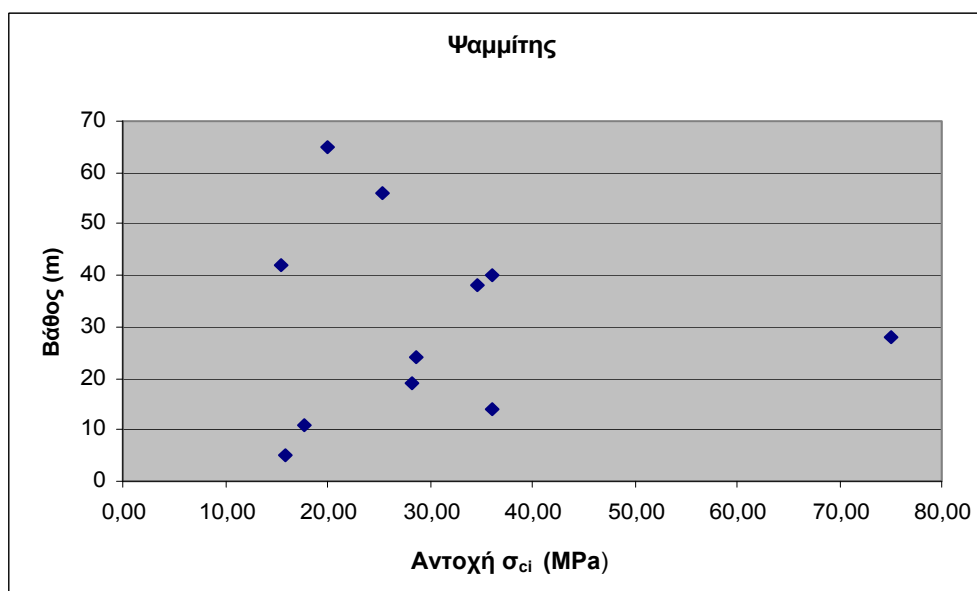
Εικόνα 5.4 Χαρακτηριστική εικόνα σχάσης ιλυολιθικών σχηματισμών σε περιβάλλον μολάσσας. (από Β. Μαρίνος, 2007)

5.7 Διαγράμματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} σε συνάρτηση με το βάθος

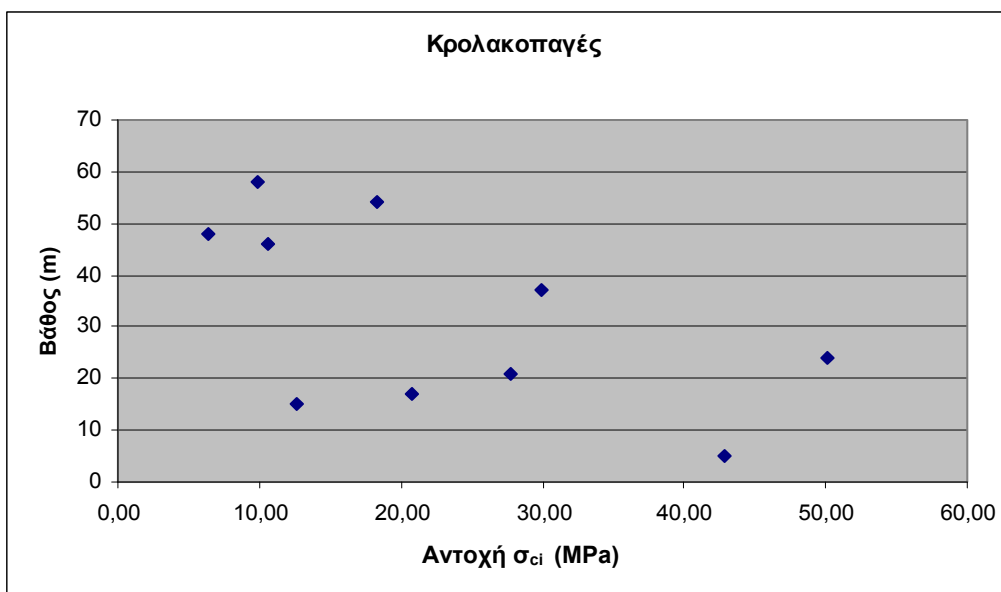
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των πετρωμάτων σε συνάρτηση με το βάθος όπως προκύπτουν από τους πίνακες των εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής.



Διάγραμμα 5.4. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων της αντοχής σ_{ci} σε συνάρτηση με το βάθος σε ιλυολιθικά δείγματα



Διάγραμμα 5.5 Ταξινόμηση αποτελεσμάτων της αντοχής σ_{ci} σε συνάρτηση με το βάθος σε ψαμμιτικά δείγματα

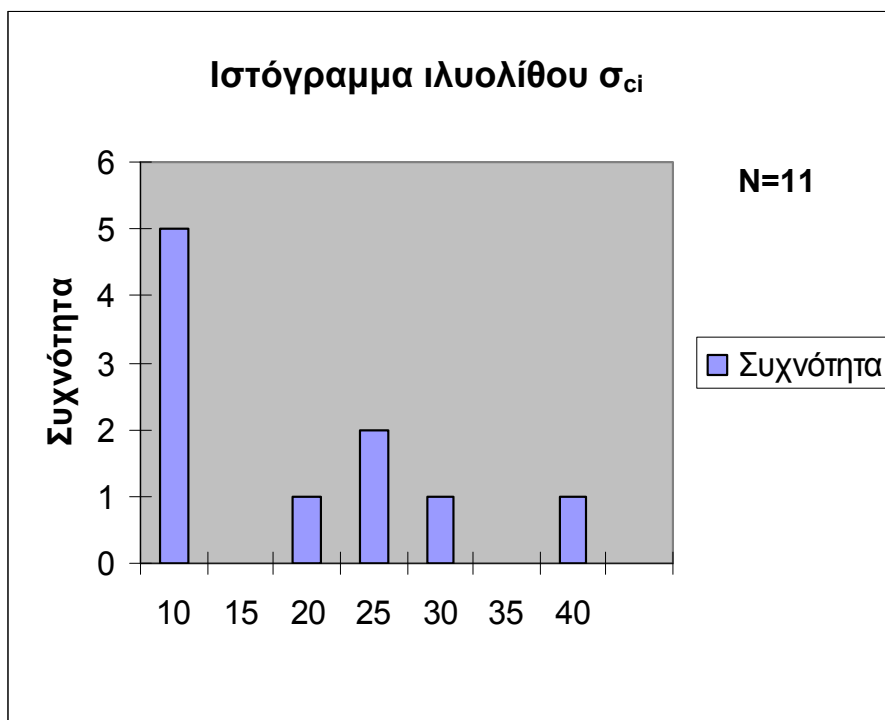


Διάγραμμα 5.6. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων της αντοχής σ_{ci} σε συνάρτηση με το βάθος σε κροταλοπαγή δείγματα

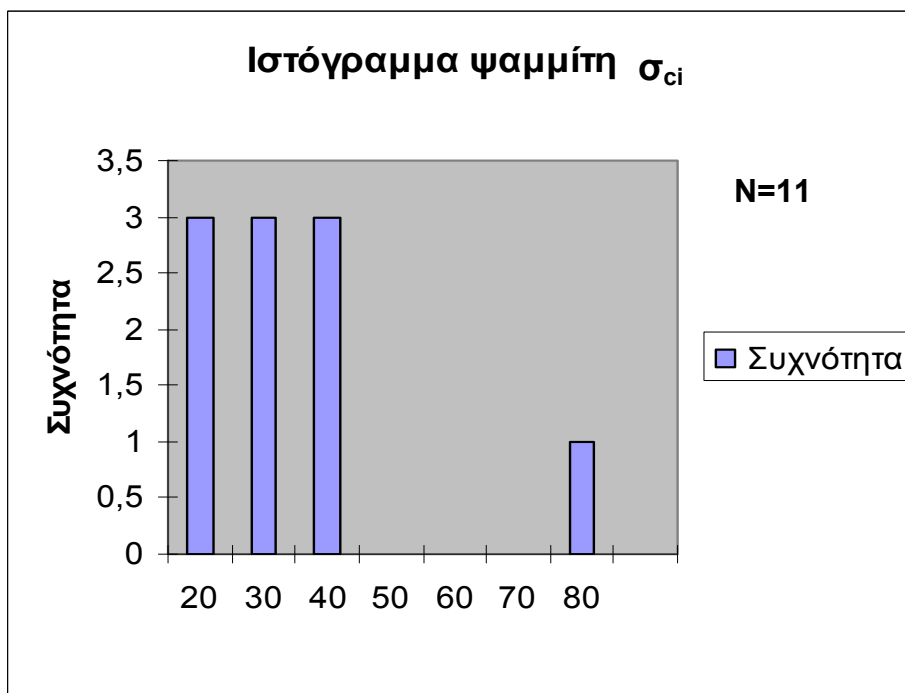
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι είναι ιδιαίτερα υψηλές οι τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής. Ο μέσος όρος και στα τρία γεωυλικά μας κυμαίνεται στα 40-50MPa. Επίσης δεν μπορούμε να κάνουμε μια διάκριση των τιμών στην επιφάνεια και στο βάθος (διάσπαρτο πλήθος τιμών). Οι τιμές αυτές προέρχονται από τις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής που προαναφέραμε. Είναι σημαντικό στις παρατηρήσεις των διαγραμμάτων να μην παίρνουμε υπόψη μας τις ακραίες τιμές, διότι η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την πραγματικότητα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την παρερμηνεία των τελικών αποτελεσμάτων.

5.8 Ιστογράμματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci}

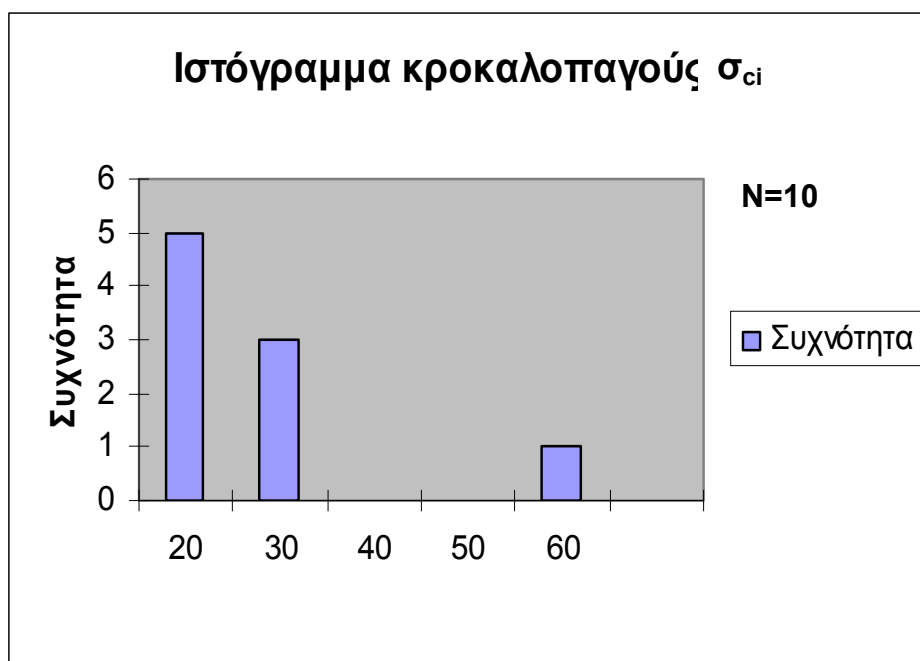
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής στον ιλυόλιθο στον ψαμμίτη και στο κροκαλοπαγές.



Ιστόγραμμα 5.1. Σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε ιλυολιθικά δείγματα



Ιστόγραμμα 5.2. Σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε ψαμμιτικά δείγματα



Ιστογράμμο 5.3. Σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε δείγματα κροκαλοπαγών

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα παραπάνω ιστογράμματα υπάρχουν κάποιες ακραίες τιμές της αντοχής σ_{ci} . Αυτό οφείλεται κυρίως όταν:

Στις συμπαγείς βραχώμαζες ψαμμίτη ή ιλυολίθου, όπου δεν υπάρχουν σημαντικές στρώσεις ή ασυνέχειες, η βραχώμαζα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως άρρηκτη και οι τιμές σχεδιασμού για το συντελεστή αντοχής και παραμόρφωσης θα πρέπει να λαμβάνονται απευθείας από εργαστηριακές δοκιμές, με μια μικρή ενδεχόμενη μείωση της μετρούμενης τιμής για τα τυχόν μικροελαττώματα που μπορεί να υπάρχουν στην βραχώμαζα. Σημειώνεται ότι αυτές οι δοκιμές θα πρέπει να διενεργηθούν προσεκτικά προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ορισμένα δείγματα μπορούν να καταρρεύσουν πολύ γρήγορα κατά την έκθεσή τους στην ατμόσφαιρα και είναι πολύ σημαντικό να ελέγχονται αμέσως μόλις ανακτώνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ίσως απαραίτητες δοκιμές επιτόπου με χρήση φορητού εξοπλισμού προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επίσης αυτές οι αποκλίνουσες τιμές μπορεί να οφείλονται στην διατάραξη του δείγματος κατά την διάρκεια της γεώτρησης.

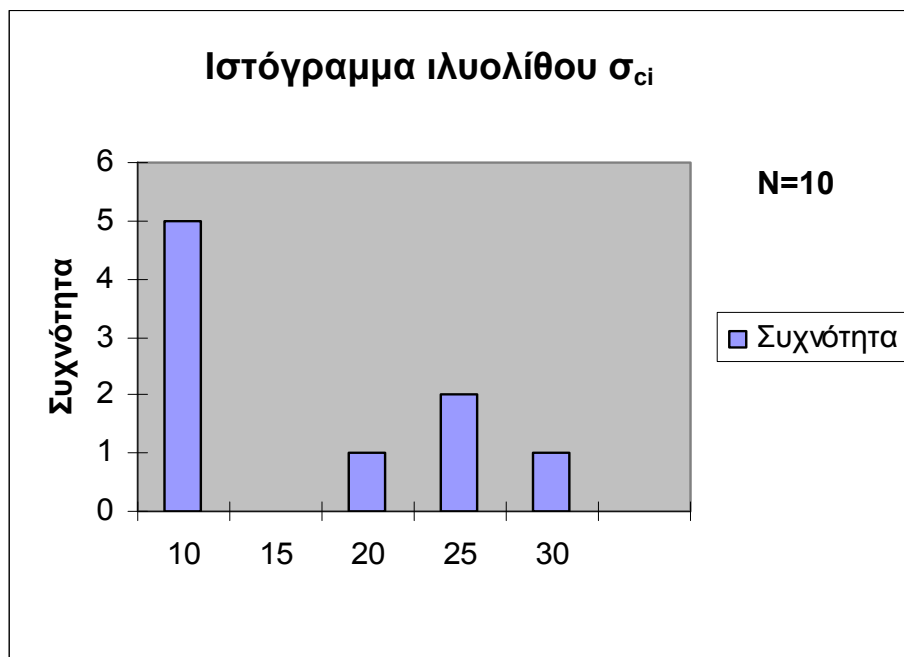
Επομένως πρέπει να αποκλείσουμε αυτές τις τιμές που πιθανώς να οδηγούν σε *εσφαλμένα συμπεράσματα* και να χρησιμοποιήσουμε εκ νέου τις διορθωμένες τιμές σ_{ci} σχηματίζοντας καινούργια ιστογράμματα.

5.8.1 Διορθωμένες τιμές μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} - ιστογράμματα

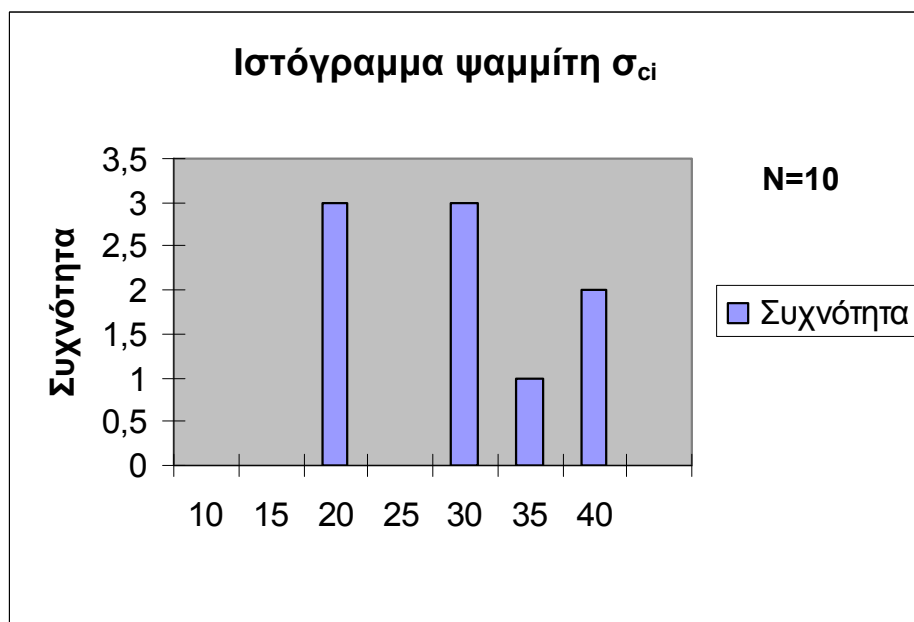
Παρακάτω φαίνονται οι διορθωμένες τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και τα αντίστοιχα ιστογράμματα.

Πίνακας 5.8 Διορθωμένες τιμές μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci}

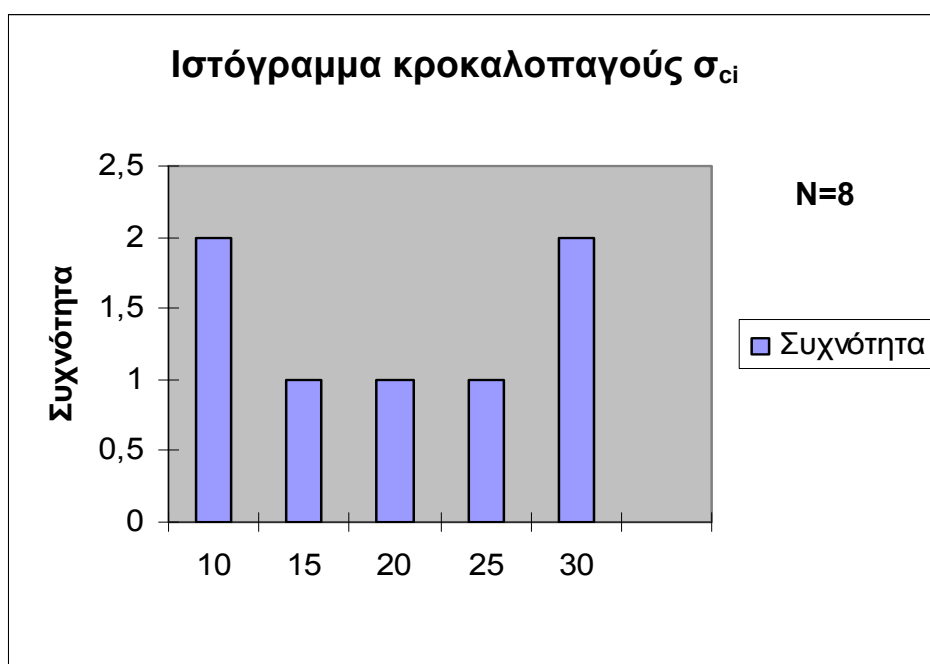
Γεωυλικό	Διορθωμένες τιμές σ_{ci}
Ιλυόλιθος	(Mpa)
	24,04
	9,43
	17,34
	20,17
	28,67
	20,04
	8,93
	6,14
	7,32
	7,65
Μέση τιμή ιλυολίθου	14,97
Ψαμμίτης	15,88
	17,70
	36,13
	28,18
	28,69
	34,62
	36,06
	15,44
	25,35
	19,92
Μέση τιμή ψαμμίτη	25,80
Κροκαλοπαγές	12,62
	20,71
	27,81
	29,97
	10,63
	6,42
	18,37
	9,81
Μέση τιμή κροκαλοπαγούς	17,04



Ιστόγραμμα 5.4. Διορθωμένη σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε ιλυολιθικά δείγματα



Ιστόγραμμα 5.5. Διορθωμένη σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε ψαμμιτικά δείγματα



Ιστόγραμμα 5.6. Διορθωμένη σχετική συχνότητα της αντοχής σ_{ci} σε δείγματα κροκαλοπαγών.

Πίνακας 5.7. Στατιστικά αποτελέσματα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci}

Γεωυλικό	Πλήθος δοκιμών	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μ.Ο.
Ιλυόλιθος	10	29	6	15
Ψαμμίτης	10	36	15	26
Κροκαλοπαγές	8	30	6	17

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τον πίνακα 5.7 ο μέσος όρος των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} έχει μειωθεί αισθητά ύστερα από τον αποκλεισμό των ακραίων τιμών.

Ωστόσο σύμφωνα με τα στοιχεία που προκύπτουν από την διάνοιξη 12 σηράγγων στην Εγνατία οδό μέσα σε μολασσικό περιβάλλον, προκύπτει ένα αξιόπιστο και μεγάλο πλήθος τιμών σ_{ci} που μας οδηγεί σε έγκυρα αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα έχουν γίνει 258 μετρήσεις σε ψαμμιτικά δείγματα όπου παρουσιάζουν την μεγαλύτερη τιμή σ_{ci} με ένα μέσο όρο 35Μpa. Πραγματοποιήθηκαν 152 μετρήσεις σε ιλυολιθικά δείγματα που παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές σ_{ci} με μέσο όρο 16Μpa. Τέλος στα κροκαλοπαγή δείγματα πραγματοποιήθηκαν 165 μετρήσεις και παρουσιάζουν μέσο όρο 23Μpa.

5.9 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά ανά τύπο βραχόμαζας

Μολονότι τα πετρώματα παρουσιάζουν διαφορετικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, οι συχνές αλλαγές και η ομοιόμορφη τεκτονική καταπόνηση δημιουργεί τεχνικογεωλογικά ένα ενιαίο σύνολο ιδιαίτερα σε μεγάλο βάθος, ενώ αντίθετα στην επιφάνεια λόγω της αποσάθρωσης παρατηρείται μια σχιστοποιημένη και αποδιοργανωμένη μορφή που μπορεί κανείς να την παρομοιάσει και με έδαφος. Όμως η ετερογένεια στη φύση των πετρωμάτων στο σύνολό της και η αλλαγή της επικράτησης τότε των ιλυόλιθων και τότε των ψαμμιτών (ή και κροκαλοπαγών) δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες όσον αφορά τις παραμέτρους αντοχής σ_i και E καθώς και της πετρογραφικής σταθεράς m_i , τελικώς. Επίσης οι αστοχίες δομικού χαρακτήρα επηρεάζονται ιδιαίτερα και από τις εναλλαγές των πετρωμάτων αυτών. Για το λόγο αυτό και για την αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών και του μετέπειτα γεωτεχνικού χαρακτήρισμού των μολασσικών βραχομαζών, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αυτές διακριτοποιήθηκαν και ομαδοποιήθηκαν σε συγκεκριμένους τύπους χαρακτηριστικά. Αυτοί οι τύποι είναι οι εξής:

- I. Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές ενστρώσεις ιλυολίθου**
- II. Ψαμμίτης με κατά θέσεις ενστρώσεις ιλυολίθου**
- III. Βραχόμαζα αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες**
- IV. Ιλυόλιθος κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμίτη**
- V. Ιλυόλιθος με σποραδικές ενστρώσεις ψαμμίτη**
- VI. Κροκαλοπαγές**

Τύπος I. Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές ενστρώσεις ιλυολίθου

Η βραχόμαζα είναι παχυστρωματώδης με πάχη στρωμάτων κλίμακας μέτρων. Έχει συμπαγή δομή γενικά, ενώ σποραδικά παρεμβάλλονται και ιλυολιθικά λεπτά στρώματα. Ο σχηματισμός είναι γενικώς υγιής με την αποσάθρωση να είναι μόνο πολύ κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Κύρια ασυνέχεια είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμονή ($>10m$) αλλά είναι ισχυρά σφραγισμένη (πέρα από τα πρώτα μέτρα) και ως επιφάνεια στο βάθος είναι τις περισσότερες φορές «παρθένα». Ο κερματισμός είναι πιο έντονος στην επιφάνεια, ενώ στο βάθος η βραχόμαζα εμφανίζεται να ομοιάζει με άρρηκτη με ελάχιστες ασυνέχειες.

Οι διακλάσεις έχουν γενικά επιφάνειες τραχείες ή ελαφρώς αποσαθρωμένες, εξαιρουμένης της στρώσης για την οποία η παρουσία ορισμένες φορές λεπτών ιλυολιθικών υμένων ή ενστρώσεων καθιστά την ποιότητα των ασυνεχειών λεία. Η απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγάλη και κυμαίνεται μεταξύ 0,5-2m και μόνο τοπικά σε συγκεκριμένες ζώνες κερματισμού μικρού πάχους είναι συχνότερες.

Συμπεριφορά στο πρσανές: Ο σχηματισμός αυτός λόγω της καλής ποιότητας, τον μικρό κερματισμό του και την μεγάλη απόσταση των ασυνεχειών του, μπορεί δύσκολα να ολισθήσει. Ωστόσο η κυριότερη μορφή αστοχίας που μπορεί να «δώσει» αυτός ο σχηματισμός είναι η επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση.

Τύπος II. Ψαμμίτης με κατά θέσεις ενστρώσεις ιλυολίθου

Η βραχώμαζα είναι μέσο έως παχυστρωματώδης και έχει συμπαγή έως μέτρια κερματισμένη δομή. Οι στρώσεις των ψαμμιτικών πάγκων έχουν συνήθως πάχος έως 2m, ενώ οι ιλυολιθικές ενστρώσεις συνήθως 20-30cm. Κύρια ασυνέχεια είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμόνη (>10m) αλλά είναι ισχυρά σφραγισμένη (πέρα από τα πρώτα μέτρα) μέχρι και αδιόρατη σε βάθος. Ο σχηματισμός είναι γενικά υγιής με την αποσάθρωση να περιορίζεται στα επιφανειακά τμήματα. Η αποσάθρωση πάντως είναι εντονότερη στα ιλυολιθικά στρώματα στην επιφάνεια. Μπορεί να παρουσιάζονται και καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή μέσα στην βραχώμαζα υπό μορφή ενστρώσεων ή φακών.

Όσον αφορά τον κερματισμό αυτός είναι ελάχιστος έως μέτριος. Σπάνια αυτός ο τύπος είναι έντονα κερματισμένος λόγω της τεκτονικής ηρεμίας στις μολασσικές λεκάνες. Ζώνες ρηγμάτων είναι περιορισμένου γενικά εύρους. Η απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγάλη και κυμαίνεται από 0,5-2m και μόνο τοπικά σε συγκεκριμένες ζώνες κερματισμού μικρού πάχους είναι συχνότερες με επιφάνειες κλειστές, ελαφρά αποσαθρωμένες. Οι ασυνέχειες είναι τραχείες έως ελαφρά τραχείες για τους ψαμμίτες, ενώ είναι λείες έως ολισθηρές στην περίπτωση μικροδιατμήσεων για τους ιλυολίθους.

Η αντοχή των άρρηκτων ψαμμιτικών τεμαχίων είναι μέτρια έως μεγάλη, αλλά στο σύνολο η μέση τιμή επηρεάζεται και απομειώνεται ανάλογα με την παρουσία ιλυολιθικών ενστρώσεων που έχουν μικρή έως μέτρια γενικά αντοχή.

Οι ιλυολιθικές ενστρώσεις επηρεάζουν πάντως και την ευστάθεια των ψαμμιτικών πάγκων που μπορεί υπό κατάλληλες κινηματικές συνθήκες να ολισθήσουν πάνω στις λείες αυτές επιφάνειες.

Συμπεριφορά στο πρανές: Ο τύπος II φέρει πολλές ομοιότητες συμπεριφοράς σε σχέση με τον τύπο I. Σε αυτόν τον τύπο είναι πιο εύκολο να γίνει μια επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση πάνω σε ένα φιλμ ιλυολίθου λόγω της μικρότερης τιμής της γωνίας τριβής του σε σχέση με τον ψαμμίτη.

Τύπος III. Βραχώμαζα αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες

Η βραχώμαζα είναι λεπτοστρωματώδης, έως μεσοστρωματώδης και έχει μέτρια κερματισμένη δομή. Το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται από 10-50cm περίπου. Κύρια ασυνέχεια είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμόνη (>10m) αλλά είναι ισχυρά σφραγισμένη (πέρα από τα πρώτα μέτρα) και ως επιφάνεια σε βάθος είναι «παρθένα». Ο σχηματισμός είναι γενικά υγιής με ελάχιστη αποσάθρωση. Η αποσάθρωση είναι εντονότερη στα ιλυολιθικά στρώματα αλλά εντοπίζεται στην επιφάνεια. Στο βάθος η αποσάθρωση μειώνεται σημαντικά.

Όσον αφορά τον κερματισμό, η βραχώμαζα είναι άρρηκτη έως ελάχιστα κερματισμένη. Η δομή είναι στρωματώδης στην επιφάνεια αλλά μετά από λίγα μέτρα στο βάθος εμφανίζεται ενιαία και συνεχής. Η εμμόνη των διακλάσεων είναι μικρή και εντοπίζεται κυρίως στους ψαμμίτες, αφού δεν συνεχίζονται διακριτά στα ιλυολιθικά στρώματα καθώς αυτά παραμορφώνονται πλαστικά.

Οι ασυνέχειες είναι τραχείες έως ελαφρά τραχείες για τους ψαμμίτες, ενώ είναι λείες έως ολισθηρές στην περίπτωση μικροδιατμήσεων για τους ιλυολιθικούς με μαλακό έως σκληρό υλικό πλήρωσης. Η ποιότητα αυτή των ασυνεχειών του ιλυολίθου μειώνεται περαιτέρω από την ενδεχόμενη παρουσία νερού που μπορεί να συγκεντρώνεται κατά μήκος αυτών ως αδιαπέρατο μέσο. Οι ιλυολιθικές αυτές ενστρώσεις επηρεάζουν και την δομική ευστάθεια των ψαμμιτικών πάγκων που μπορεί υπό κατάλληλες κινηματικές συνθήκες να ολισθήσουν πάνω στις λείες αυτές επιφάνειες.

Στην επιφάνεια ο σχηματισμός είναι έντονα στρωματώδης λόγω του φαινομένου της σχάσης και επίσης αποσαθρωμένη με την απόσταση των ασυνεχειών να είναι πολύ μικρή και να κυμαίνεται μεταξύ 0,05-0,30m. Χαρακτηριστική εικόνα του τύπου αυτού στην επιφάνεια όπου διακρίνεται η στρωματώδη, ετερογενής και αποσαθρωμένη δομή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

Συμπεριφορά στο πρανές: Στον τύπο III η ποσότητα του ιλυόλιθου έχει αυξηθεί σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τύπους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα λόγω της μεγαλύτερης αποσάθρωσης των ιλυολίθων αλλά και της ποιότητας των ασυνεχειών, ιδιαίτερα με την παρουσία νερού, να υπάρξει επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση.



Εικόνα 5.5 Χαρακτηριστική εικόνα εναλλαγών ψαμμίτη και ιλυολίθου με ισομερή παρουσία όπου διακρίνεται η έντονα αποσαθρωμένη δομή στην επιφάνεια (Τύπος III).
(από Β. Μαρίνος, 2007)

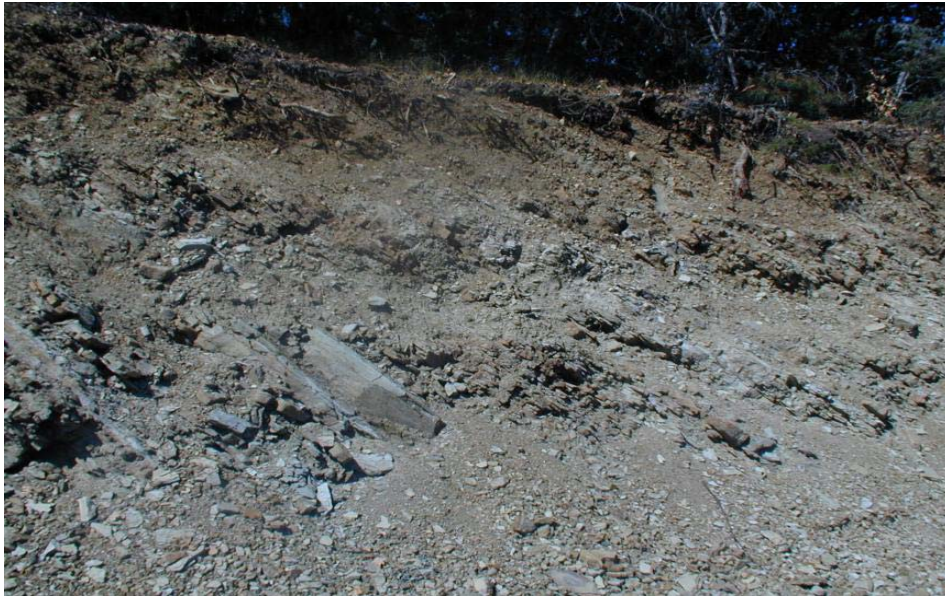
Τύπος IV. Ιλυόλιθος κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμίτη

Αποτελείται από υγιείς ιλυολίθους με κατά θέσεις εναλλαγές ψαμμιτών. Ο σχηματισμός εμφανίζει χαμηλό βαθμό αποσάθρωσης σε βάθος αλλά υψηλή κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Οι ιλυόλιθοι παρουσιάζονται με λεπτές έως μετρίου πάχους στρώσεις, ενώ παρεμβλλόμενοι ψαμμιτικοί πάγκοι έχουν μικρά συνήθως πάχη (~10-20cm). Κύρια ασυνέχεια είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμόνη (>10m) αλλά είναι ισχυρά σφραγισμένη (πέρα από τα πρώτα μέτρα) και ως επιφάνεια είναι «παρθένα».

Οι τιμές του RQD είναι σχεδόν μηδενικές στην επιφάνεια. Η αποδιοργανωμένη δομή που εμφανίζει ο σχηματισμός λόγω αποσάθρωσης δεν θα πρέπει να αποπροσανατολίζει στην γεωτεχνική αξιολόγηση των βραχομαζών αυτών στο βάθος όσον αφορά τη δομή τους. Σημειώνεται ότι η βαθμονόμηση των σχηματισμών αυτών σε δείγματα γεωτρήσεων πρέπει να γίνεται άμεσα διότι τα ιλυολιθικά δείγματα αλλοιώνονται πολύ γρήγορα λόγω του μηχανισμού της σχάσης και διασποράς που έχει αναλυθεί παραπάνω. Η όποια μικροδιάτμηση των ιλυολιθικών τεμαχών, περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών με αποτέλεσμα η στρώση κυρίως να εμφανίζεται γενικώς με λεία έως ολισθηρή επιφάνεια. Στην επιφάνεια η βραχώμαζα είναι στρωματώδης έως σχιστώδης και κάποιες φορές μοιάζει με εδαφικό μέσο. Η απόσταση των ασυνεχειών είναι πολύ μικρή και οι στρώσεις είναι σε πολύ μικρή απόσταση (0,05-0,1m) με επιφάνειες έντονα αποσαθρωμένες.

Η «βραχώμαζα» εμφανίζεται να είναι από πολύ κερματισμένη έως αποδιοργανωμένη. Χαρακτηριστική εικόνα του τύπου αυτού στην επιφάνεια όπου διακρίνεται η στρωματώδη, ετερογενής και έντονα αποσαθρωμένη δομή.

Συμπεριφορά στο πρανές: Ο μολασσικός αυτός σχηματισμός λόγω της ιδιαίτερης παρουσίας ιλυολίθου, και της αποσάθρωσης του, μπορεί να «δώσει» μια κυκλοειδή ολίσθηση, αλλά συνήθως αυτή είναι αρκετά επιδερμική γιατί η βραχώμαζα δεν είναι τόσο εδαφοποιημένη διότι υπάρχουν και μπλοκ ψαμμίτη.



Εικόνα 5.6 Χαρακτηριστική εικόνα ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη στην επιφάνεια. Διακρίνεται η στρωματώδης – σχιστώδης έως αποδιοργανωμένη δομή του σχηματισμού (Τύπος IV). (από Β. Μαρίνος, 2007)

Τύπος V. Ιλυόλιθος με πολύ σποραδικές ενστρώσεις ψαμμίτη

Η βραχώμαζα είναι μαζώδης χωρίς στρωσιγένεια και έχει συμπαγή γενικά δομή. Ο σχηματισμός είναι γενικά υγιής ενώ μπορεί να εμφανίζει γενικώς χαμηλό βαθμό αποσάθρωσης. Η αποσάθρωση είναι εδώ σε σχέση με του προτεινόμενους τύπους πολύ εντονότερη αλλά πάντα μόνο κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους.

Στην επιφάνεια η βραχώμαζα είναι συχνά σχιστοποιημένη έως εδαφοποιημένη από την έντονη αποσάθρωση λόγω του φαινομένου της σχάσης (ποσοστό αριλοποιημένων υλικών >50%) και με πολύ πτωχό δείκτη ποιότητας βραχώμαζας ($RQD < 25\%$). Η βραχώμαζα εμφανίζεται να είναι από πολύ κερματισμένη έως αποδιοργανωμένη. Η απόσταση των ασυνεχειών είναι πολύ μικρή ενώ οι στρώσεις είναι σε πολύ μικρή απόσταση με επιφάνειες έντονα αποσαθρωμένες οι οποίες είναι ανοικτές στην επιφάνεια με λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης.

Συμπεριφορά στο πρανές: Ο σχηματισμός αυτός περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό σε ιλυόλιθο, και εμφανίζεται εξαιρετικά αποσαθρωμένος σχιστοποιημένος και εδαφοποιημένος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να «δώσει» περιστροφικές ολισθήσεις.

Τύπος VI. Κροκαλοπαγές

Το κροκαλοπαγές είναι συμπαγές στο βάθος με ελάχιστη αποσάθρωση. Ο σχηματισμός των κροκαλοπαγών χαρακτηρίζεται από ασαφή ανάπτυξη των ορίων του με τους άλλους σχηματισμούς της μολάσσας, που οφείλεται στην εξαιρετικά ανήσυχη ιζηματογένεση με την οποία σχηματίστηκε. Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι πάντα ασθενής. Στις ασυνέχειες μπορεί να εκδηλώνεται υδροφορία με την μορφή τοπικών ροών. Στην επιφάνεια η βραχώμαζα αναμένεται να έχει ασθενή έως μέτρια αποσάθρωση και ανάλογη χαλάρωση. Μόνο μεμονωμένες διακλάσεις και ρήγματα έχουν μεγαλύτερη εμμονή.

Η αντοχή των κροκαλοπαγών και πόσο συμπαγής αυτός εμφανίζεται εξαρτάται βέβαια και από το υλικό συγκόλλησης τους. Έτσι όταν η συγκόλληση αποτελείται από ασβεστιτικό υλικό είναι πολύ συμπαγή και έχουν μεγάλη αντοχή. Αντίθετα, όταν αυτό είναι αργιλικό είναι πιο μικρή η αντοχή και η δομή είναι λιγότερο συμπαγής.

Συμπεριφορά στο πραινές: Η ποιότητα και η αντοχή ενός κροκαλοπαγούς όπως αναφέραμε εξαρτάτε από το υλικό συγκόλλησης. Έτσι στην περίπτωση που το υλικό συγκόλλησης είναι αργιλικό (μικρή αντοχή), μπορεί να εκδηλωθούν κυκλοειδής ολισθήσεις μικρού μεγέθους, ενώ αντίθετα όταν υπάρχει ασβεστιτικό υλικό το υλικό είναι πιο ψαθυρό οπότε μπορεί να εκδηλωθούν επίπεδες ή σφηνοειδής ολισθήσεις.

5.10 Ταξινόμηση της βραχόμαζας με βάση το γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI

5.10.1 Βαθμονόμηση της βραχόμαζας μολασσικών σχηματισμών στο βάθος

Όπως περιγράφηκε παραπάνω οι μολάσσεσες σχηματίζουν βραχόμαζες με πολύ διαφορετική δομή όταν εμφανίζονται στην επιφάνεια ή βρίσκονται κοντά σε αυτή σε σχέση με εκείνες που εντοπίζονται σε βάθος. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για να εκτιμηθούν οι ιδιότητες μιας μολασσικής βραχόμαζας.

Σε περιπτώσεις όπου στο βάθος συναντάται αδιατάρακτη και συνεχής βραχόμαζα (πχ. κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας) τότε γίνεται η χρήση του κλασσικού διαγράμματος GSI το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και όχι του φλύσχη που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες βαθμονομήσεις με χαμηλές τιμές, γεγονός που οδηγεί σε εσφαλμένους σχεδιασμούς σήραγγων ή σε περαιτέρω μέτρα αντιστήριξης χωρίς αυτά να χρειάζονται.

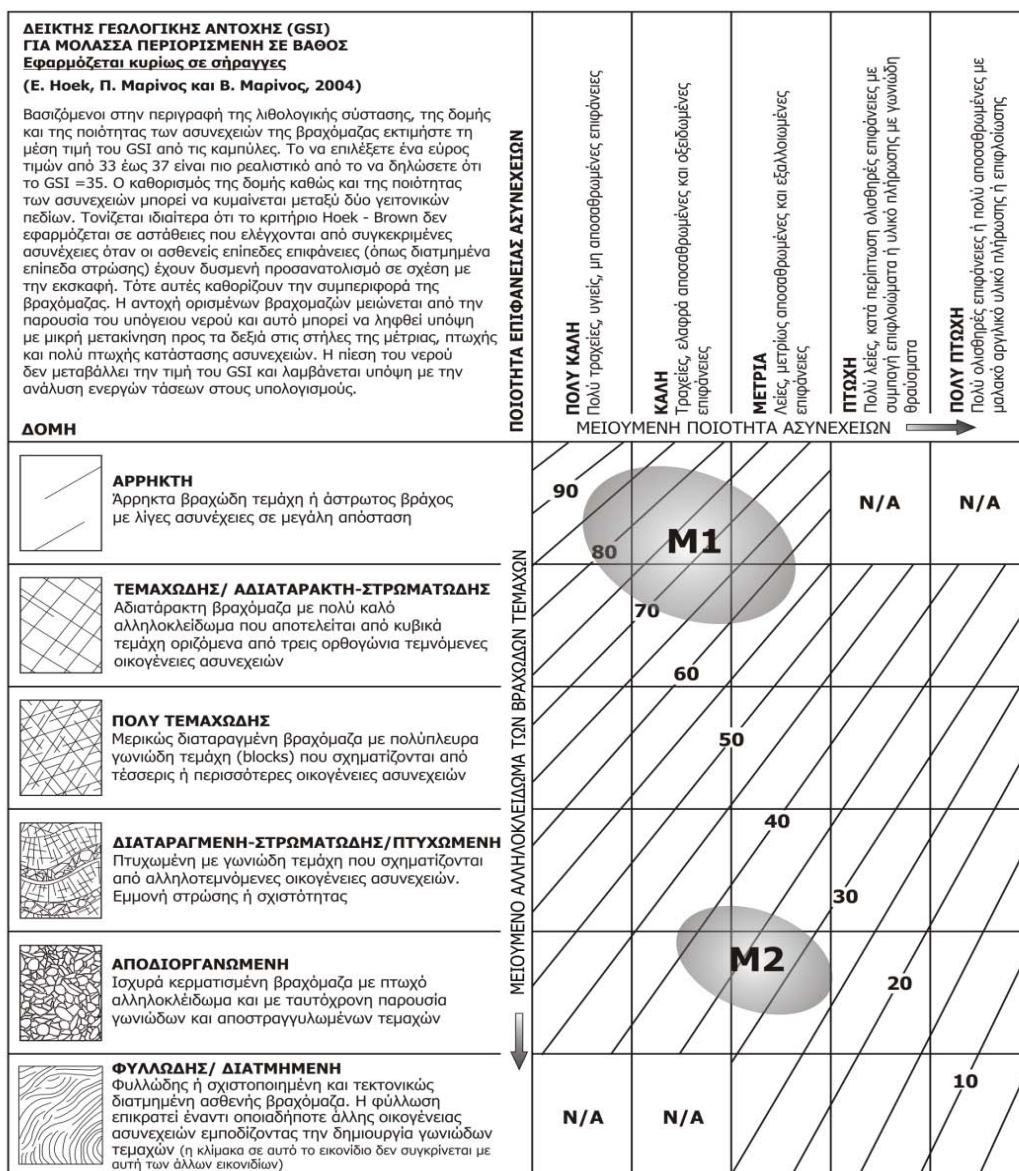
Ανεξάρτητα λοιπόν από τους λιθότυπους της μολασσικής βραχόμαζας όπως περιγράφηκε παραπάνω, όλες οι δομές πρέπει να βαθμονομηθούν ενιαία σε συνθήκες βάθους καθώς εμφανίζουν παρόμοια συνεχή δομή. Όλοι λοιπόν οι τύποι της μολάσσεσας σε βάθος βαθμονομούνται ενιαία σε δύο περιοχές του βασικού διαγράμματος GSI όπως φαίνεται παρακάτω.

Η πρώτη περιοχή M1 αφορά την «άρρηκτη» έως «μέτρια κερματισμένη» δομή με πολύ καλή ποιότητα ασυνεχειών έως και μέτρια-οριακά πτωχή ανάλογα με το αν επικρατεί ψαμμίτης ή ιλυόλιθος αντίστοιχα. Η τιμή του GSI που πρέπει να αποδοθεί στην βραχόμαζα είναι περίπου 50-60 ή περισσότερο δηλαδή πολύ υψηλές τιμές και μάλιστα η βραχόμαζα μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως άρρηκτη.

Η δεύτερη περιοχή M2 προτείνεται να καλύπτει στρωματώδεις- κερματισμένες δομές σε μικρά βάθη και επηρεάζονται σε ένα μικρό βαθμό από τις επιφανειακές συνθήκες αποσάθρωσης ή ζώνες κερματισμένες από ρήγματα σε βάθος. Τέτοιες καταστάσεις αντιστοιχούν σε τιμές GSI 25-40 δηλαδή πολύ χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την περιοχή M1.



Εικόνα 5.7 Χαρακτηριστική εμφάνιση μολασσικής βραχόμαζας η οποία είναι στρωματώδης και εν μέρει μόνο υπό περιορισμό λόγω μικρού βάθους (άνω περιοχή M2 στο διάγραμμα GSI). GSI=40-45. (από Β. Μαρίνος, 2007).



- M1** Μολάσση υπό περιορισμό σε βάθος, είτε ετερογενής με εναλλαγές ψαμμίτη ή/και ιλυόλιθου ή/και κροκαλοπαγούς είτε λιθολογικά ομοιογενής
- M2** Έντονα κερματισμένη ή λατυποπαγής μολάσση σε ζώνες ρηγμάτων

Σημειώσεις:

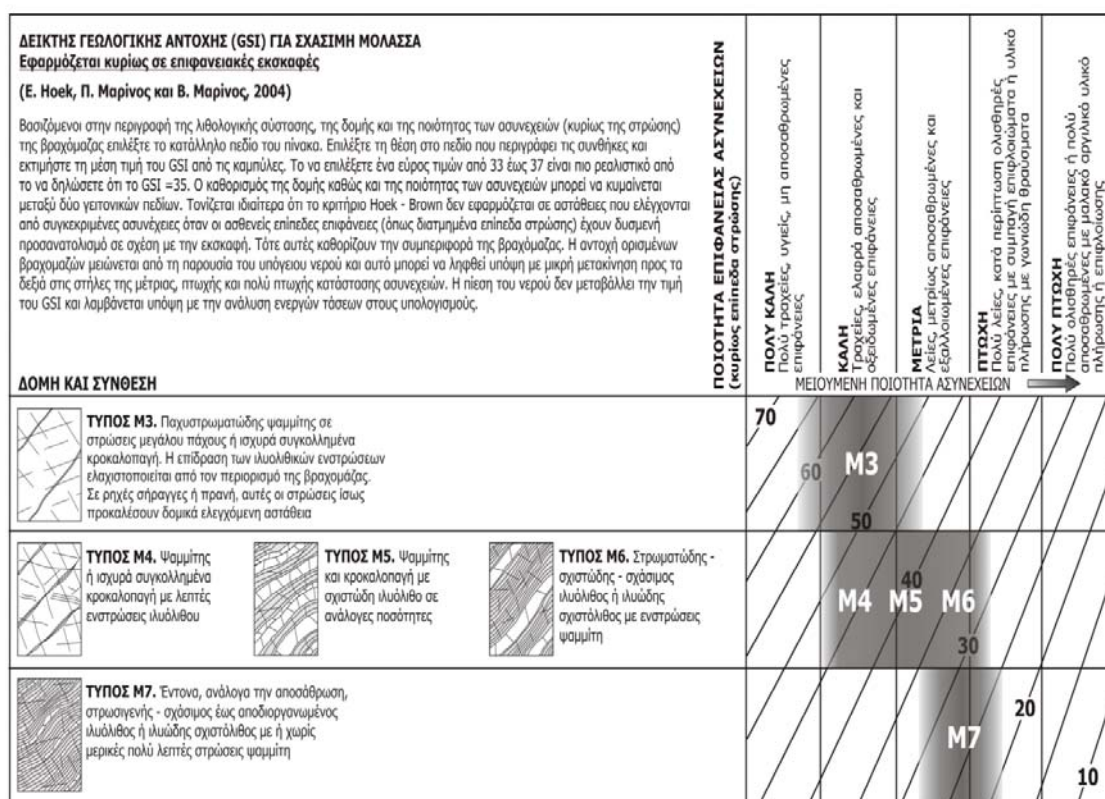
- Όταν δεν υπάρχουν ασυνέχειες στη βραχώδη, προτείνεται να χρησιμοποιούνται απευθείας εργαστηριακές δοκιμές
- Το διάγραμμα GSI δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για χαλαρά κροκαλοπαγή. Το υλικό τότε μπορεί να προσομοιωθεί ως ένα ελαφρώς συγκολλημένο ποτάμιων αποθέσεων (κυρίως χαλίκια) γεωυλικά

Σχήμα 5.1 Διάγραμμα GSI για μολάσση υπό περιορισμό (εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγες), (Hoek Marinos and Marinos, 2004).

5.10.2 Βαθμονόμηση της βραχώμαζας μολασσικών σχηματισμών στην επιφάνεια

Για επιφανειακές εμφανίσεις, όπου η δομή της μολάσσας έχει χαλαρώσει σύμφωνα με μηχανισμούς σχάσης κερματισμού και αποσάθρωσης που αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους, προτείνουμε τη χρήση ενός νέου διαγράμματος GSI. Αυτό το διάγραμμα, το οποίο εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα, βασίζεται στην λογική του διαγράμματος GSI για ετερογενή διαταραγμένα πετρώματα, όπως ο φλύσχη ύστερα από μείωση των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης και διάτμησης που διέπουν τη συμπεριφορά του φλύσχη. Η πρόταση αυτή δημοσιεύτηκε το 2004 (Hoek, Marinos and Marinos, 2004).

Η δομική διακριτοποίηση της ετερογένειας του σχηματισμού της μολάσσας είναι ορατή στις επιφανειακές εμφανίσεις και υπάρχουν ομοιότητες με τη δομή ορισμένων τύπων φλύσχη. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα GSI για τον φλύσχη, εξαιρουμένων των διατμημένων και παραμορφωμένων τύπων, και με μία μικρή μετατόπιση προς τα αριστερά των άλλων κατηγοριών του διαγράμματος φλύσχη. Αυτή η έκδοση του διαγράμματος, η οποία χρησιμοποιείται σε σχάσιμα μολασσικά πετρώματα, εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Οι ονομασίες M3-M7 του προτεινόμενου διαγράμματος GSI αντιστοιχούν στους βασικού λιθότυπους που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.2 Προτεινόμενο διάγραμμα GSI για σχάσιμη μολάσσα όπου οι επιφάνειες στρώσεων ιλυόλιθων – αργιλόλιθων είναι συχνές.
(περιοχές κοντά στην επιφάνεια, επιφανειακές εκσκαφές, πρανή).
(Marinos, Hoek and Marinos, 2004)

5.11 Ταξινόμηση ανά τύπο βραχώμαζας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η δομή των σχηματισμών σε βάθος είναι ανεξάρτητη των τύπων της μολασσικής βραχώμαζας έτσι όπως τους ορίσαμε και της ποσοστιαίας αναλογίας των συμμετεχόντων ψαμμιτικών και ιλυολιθικών γεωυλικών. Έτσι δεν έχει νόημα να βαθμονομηθούν ξεχωριστά. Για αυτό το λόγο προβάλλονται όλοι οι τύποι στην περιοχή M1 ή M2.

Για την μολάσσα κοντά στην επιφάνεια χρησιμοποιείται για την απομείωση των τιμών αντοχής και παραμορφωσιμότητας το νέο διάγραμμα και εδώ έχουμε διακριτοποίηση δομής στους διάφορους τύπους.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα φάσματα των τιμών GSI για κάθε τύπο μολάσσας που διακρίθηκε πιο πάνω, σε βάθος σε ενδιάμεσα βάθη αλλά και στην επιφάνεια.

Πίνακας 5.10. Πίνακας όπου παρουσιάζονται τα φάσματα των τιμών GSI για κάθε τύπο μολάσσας που διακρίθηκε παραπάνω, τόσο στο βάθος όσο και στην επιφάνεια.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

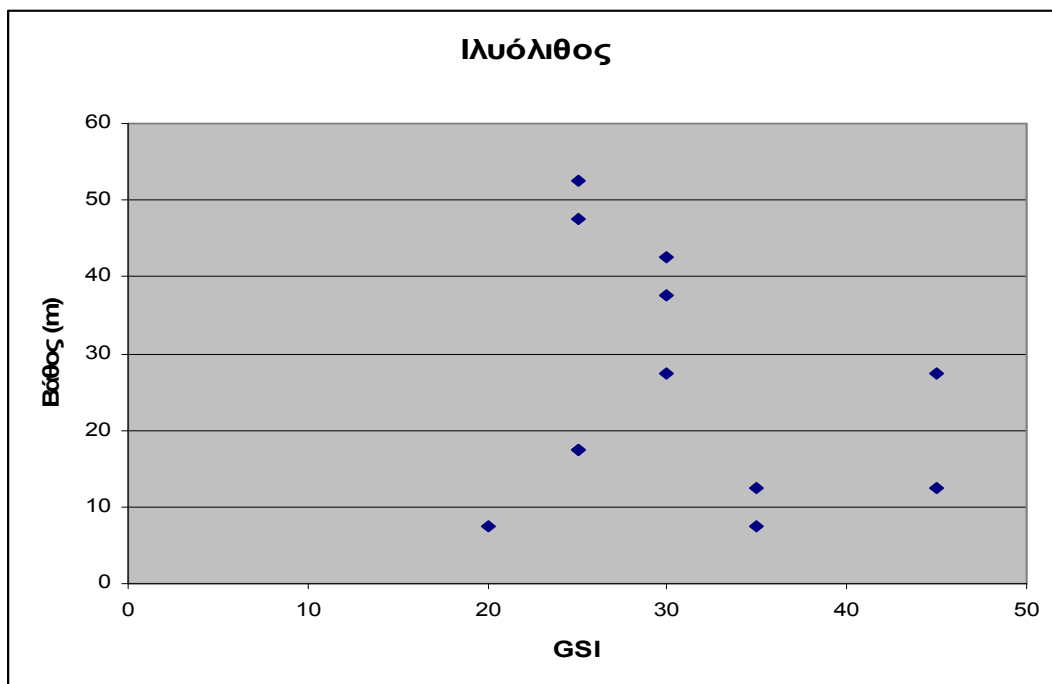
Τεχνογεωλογικός (Γεωτεχνικός) Τύπος Μολάσσας	Βάθος > 10 ή 15 m		Ζώνη κερματισμού ή ενδιάμεσα βάθη		Επιφανειακό τμήμα	
	Δομή	GSI	Δομή	GSI	Δομή	GSI
I 	M1 	70-85	M2 	30-40	M3 	45-60
II 	M1 	65-80	M2 	30-40	M4 	40-55
III 	M1 	65-80	M2 	25-35	M5 	35-45
IV 	M1 	55-70	M2 	25-35	M6 	30-40
V 	M1 	55-70	M2 	20-30	M7 	20-35
VI 	M1 	70-85	M2 	30-40	M4/ M5 	40-55

5.12 Διαγράμματα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI σε συνάρτηση με το βάθος

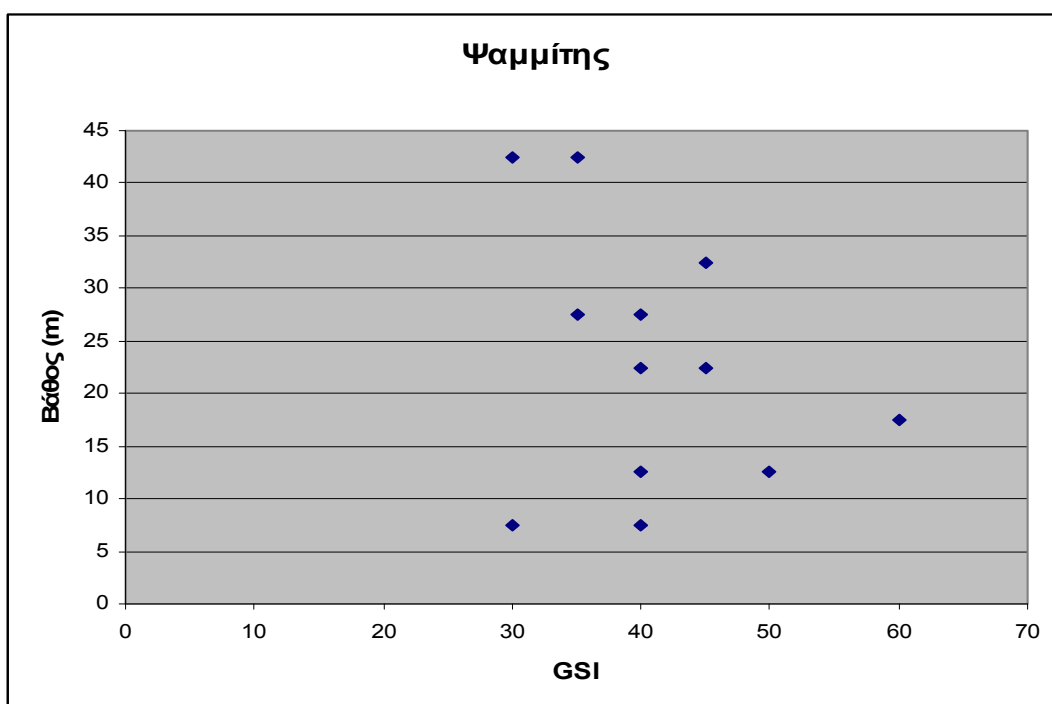
Οι τιμές του GSI με τις οποίες κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας 5.11 Πίνακας τιμών βάθους και δείκτη γεωλογική αντοχής GSI

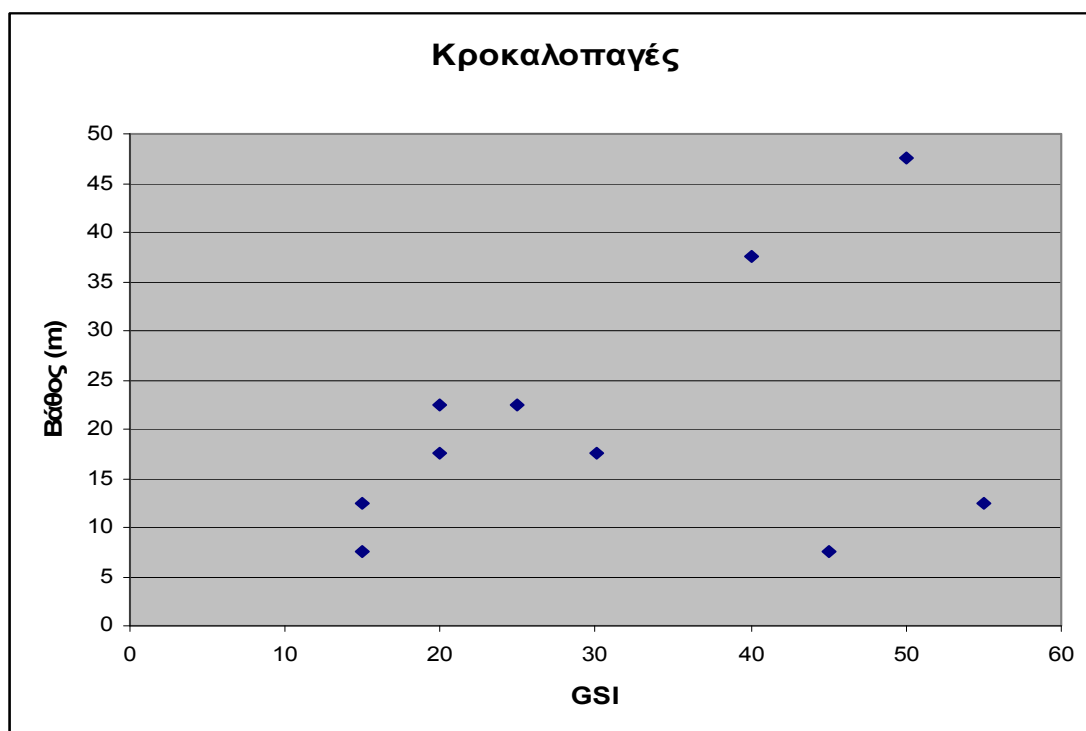
ΓΕΩΥΛΙΚΟ	Βάθος	GSI
Ιλυόλιθος	7,5	20
	12,5	45
	17,5	25
	27,5	30
	12,5	35
	37,5	30
	42,5	30
	47,5	25
	52,5	25
	7,5	35
	17,5	25
	27,5	45
Ψαμμίτης	Βάθος	GSI
	12,5	50
	17,5	60
	7,5	30
	22,5	40
	27,5	35
	42,5	35
	32,5	45
	27,5	40
	42,5	30
	22,5	45
	12,5	40
Ψαμμίτης/Κροκαλοπαγές-Κροκαλοπαγές	Βάθος	GSI
	7,5	45
	12,5	55
	17,5	30
	17,5	20
	22,5	25
	22,5	20
	7,5	15
	12,5	15
	37,5	40
	47,5	50



Διάγραμμα 5.10. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων του δείκτη γεωλογικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος σε ιλυόλιθο



Διάγραμμα 5.11. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων του δείκτη γεωλογικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος σε ψαμμίτη



Διάγραμμα 5.12. Ταξινόμηση αποτελεσμάτων του δείκτη γεωλογικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος σε κροκαλοπαγές

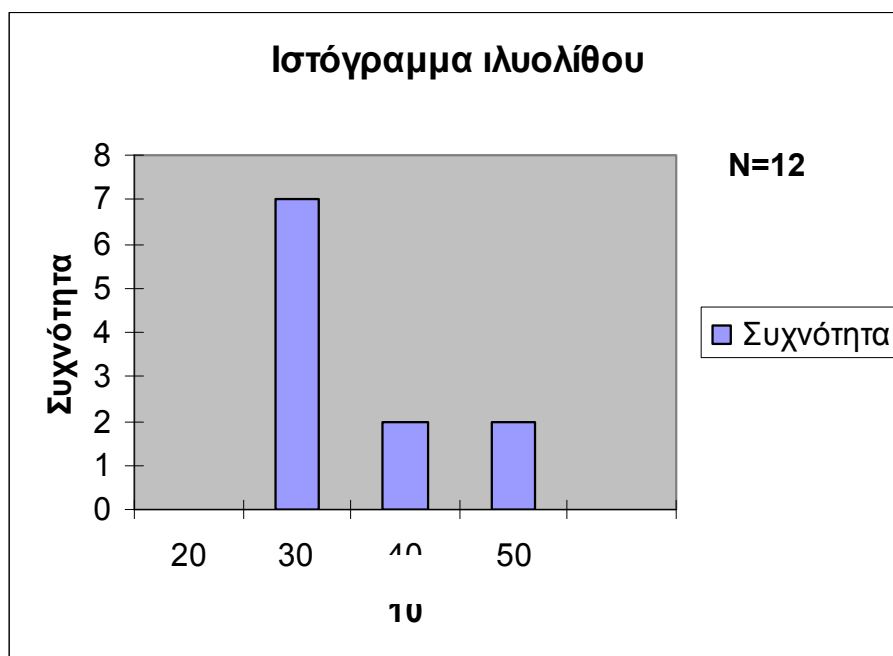
Πίνακας 5.12. Στατιστικά αποτελέσματα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI.

Γεωυλικό	Πλήθος δοκιμών	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μ.Ο.
Ιλυόλιθος	12	45	20	33
Ψαμμίτης	12	60	35	48
Κροκαλοπαγές	10	55	15	35

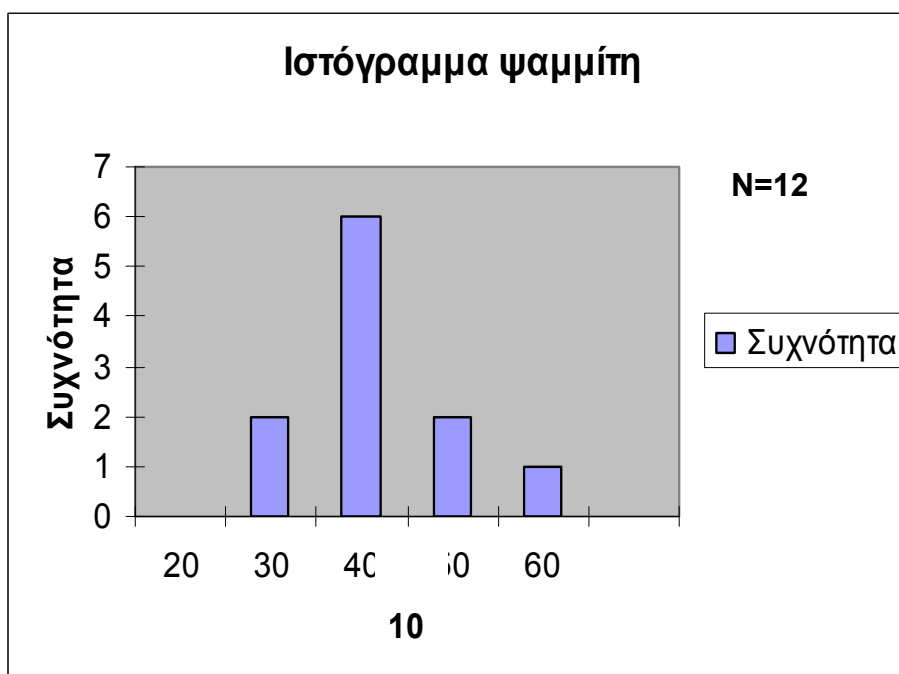
Οι παραπάνω τιμές GSI συμπεριλαμβάνονται στην μελέτη για την κατασκευή 2 σηράγγων στην Εγνατία Οδό μέσα σε μολассικό περιβάλλον. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μικρότερη τιμή του δείκτη γεωλογικής αντοχής για ιλυόλιθο βρίσκεται σε βάθος μικρότερο των 10m. Γεγονός που υποδηλώνει την μεγάλη διαφορά ποιότητας σε επιφανειακούς και βαθύτερους ιλυολιθικούς σχηματισμούς. Ο ψαμμίτης έχει τον μεγαλύτερο μέσο όρο GSI όπως έχει παρατηρηθεί και με το RQD και με το σ_{ci} . Τέλος το κροκαλοπαγές φαίνεται να μην δείχνει ξεκάθαρη εικόνα τιμών σε συνάρτηση με το βάθος.

5.13 Ιστογράμματα δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI

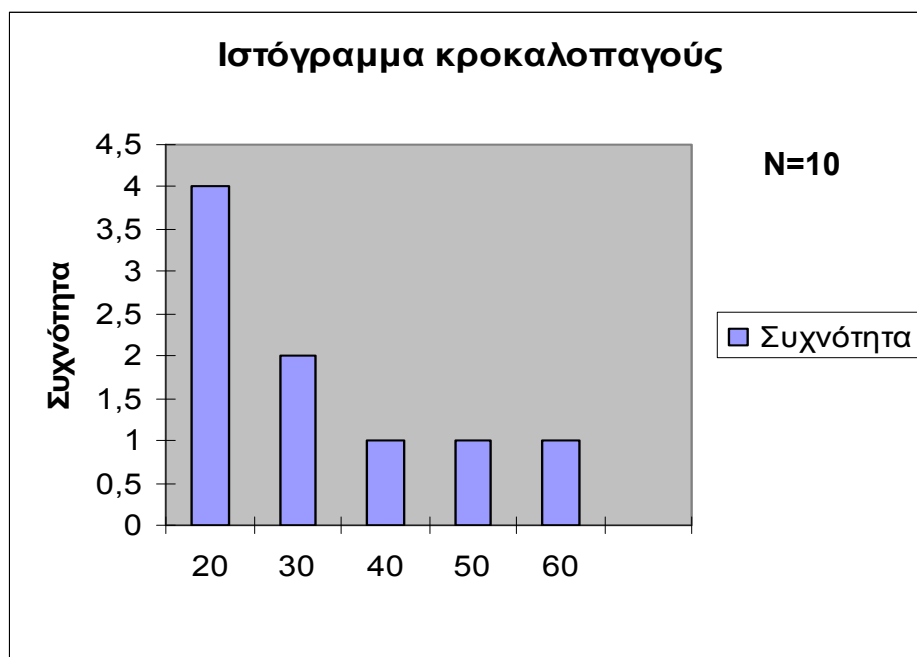
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η αθροιστική συχνότητα του δείκτη γεωλογικής αντοχής στον ιλυόλιθο στον ψαμμίτη και στο κροκαλοπαγές



Ιστόγραμμα 5.10. Σχετική συχνότητα του GSI σε ιλυολιθικά δείγματα



Ιστόγραμμα 5.11. Σχετική συχνότητα του GSI σε ψαμμιτικά δείγματα



Ιστόγραμμα 5.12. Σχετική συχνότητα του GSI σε δείγματα κροκαλοπαγών.

5.14 Συνοπτικά αποτελέσματα γεωτεχνικών παραμέτρων μολασσικής βραχώμαζας

Στις συμπαγείς βραχώμαζες ψαμμίτη ή ιλυολίθου όπου δεν υπάρχουν σημαντικές στρώσεις ή ασυνέχειες η βραχώμαζα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως άρρηκτη και οι τιμές σχεδιασμού για το συντελεστή αντοχής και παραμόρφωσης θα πρέπει να λαμβάνονται απευθείας από εργαστηριακές δοκιμές, με μία μικρή ενδεχόμενη μικρή μείωση της μετρούμενης τιμής για τα τυχόν μικροελαττώματα που μπορεί να υπάρχουν στην βραχώμαζα.

Λόγω της ετερογένειας που παρουσιάζεται στους σχηματισμούς της μολάσσας, δεν είναι δυνατόν να ληφθεί άμεσα από εργαστηριακές δοκιμές η τελική μέση ζυγισμένη τιμή του άρρηκτου τεμάχους. Για τον λόγο αυτό προτείνονται για κάθε τύπο της μολάσσας που αναφερθήκαμε αναλυτικά παραπάνω, κατάλληλες αναλογίες και ποσοστά απομείωσης για τα ψαμμιτικά και ιλυολιθικά του μέλη.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων αντοχής σ_c του πετρογραφικού δείκτη m_i και του μέτρου παραμορφωσιμότητας E του ιλυολίθου του ψαμμίτη και του κροκαλοπαγούς προκειμένου να εξαχθεί μία ζυγισμένη τιμή για κάθε τεχνικογεωλογικό τύπο βραχώμαζας της μολάσσας. Οι αναλογίες αυτές βασίστηκαν στις αρχές της κατά αναλογία προτεινόμενες από τους Marinou and Hoek (2001) για τις βραχώμαζες του φλύσχη, αλλά και την εμπειρία που αποκτήθηκε από τον σχεδιασμό σε σήραγγες σε περιβάλλον μολάσσας.

Πίνακας 5.13. Πίνακας προτεινόμενων γεωτεχνικών ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας για τους διάφορους τύπους μολασσικής βραχώμαζας.
(από Β. Μαρίνος, 2007)

ΤΥΠΟΣ Μολάσσας	GSI (για βραχώμαζες σε βάθος)	GSI (για βραχώμαζες στην επιφάνεια)	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_c και m_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση των παραμέτρων της "άρρηκτης" μολάσσας ανάλογα με τον τύπο της	Προτεινόμενες αναλογίες των μέτρων παραμορφωσιμότητας E_i των μελών της βραχώμαζας της μολάσσας για την εκτίμηση του μέτρου E_{im} της "άρρηκτης" βραχώμαζας της ανάλογα με τον τύπο της
I	70-85	45-60	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ψαμμίτη	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ψαμμίτη
II	65-80	40-55	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους μειωμένες κατά 20%
III	65-80	35-45	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IV	55-70	30-40	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
V	55-70	20-35	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ιλυόλιθο	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ιλυόλιθο
VI	70-85	40-55	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για το κροκαλοπαγές και απομειώστε ανάλογα με τα ανωτέρω αν εναλλάσσεται με άλλους σχηματισμούς	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για το κροκαλοπαγές και απομειώστε ανάλογα με τα ανωτέρω αν εναλλάσσεται με άλλους σχηματισμούς

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των γεωτεχνικών παραμέτρων της μολασσικής βραχώμαζας στους έξι διαφορετικούς τύπους που αναλύσαμε παραπάνω, όπως αυτά προκύπτουν από τις τιμές των εργαστηριακών και τα σχετικά διαγράμματα πάντα σύμφωνα με τις αναλογίες του παραπάνω πίνακα 5.13.

Στον πίνακα 5.14 που παραθέτουμε πιο κάτω εμφανίζονται οι χαρακτηριστικές **μέσες τιμές** των γεωτεχνικών ιδιοτήτων στον ιλυόλιθο, ψαμμίτη και στο κροκαλοπαγές. Λόγω της ιδιαιτερότητας και της ετερογένειας των μολασσικών σχηματισμών στην επιφάνεια και στο βάθος προκύπτουν δύο πίνακες, ο πίνακας 5.15 σε βάθη μεγαλύτερα από τα 10m. Και ο πίνακας 5.16 μέχρι το βάθος των 10m. Χαρακτηριστικές είναι οι διαφορές στον δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI. Οι γεωτεχνικές παράμετροι που μελετώνται είναι:

- Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI
- Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci}
- Η σταθερά m_i

Η περιγραφή των γεωτεχνικών παραμέτρων έγινε πιο πάνω εκτός από τις τιμές m_i Έτσι λοιπόν για το m_i έχουμε:

Οι τιμές m_i

Στο κριτήριο αστοχίας των Hoek and Brown η τιμή m_i αντανakλά τις ιδιότητες τριβής των συστατικών ορυκτών και κόκκων του άρρηκτου βράχου. Στα μολασσικά πετρώματα οι τιμές του m_i μπορεί να είναι (Marinos and Hoek, 2000):

Ψαμμίτης 17, ιλυόλιθος 7, για το κροκαλοπαγές δεν προτείνονται τιμές αφού αυτές εξαρτώνται από τα κατά περίπτωση υλικό συγκόλλησης. Πάντως σε συμπαγές κροκαλοπαγές η τιμή είναι περίπου 21.

Πίνακας 5.14. Χαρακτηριστικές **μέσες τιμές** γεωτεχνικών ιδιοτήτων για ιλυόλιθο, ψαμμίτη και κροκαλοπαγές

ΓΕΩΥΛΙΚΟ	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i
Ιλυόλιθος	33	15	7
Ψαμμίτης	48	26	17
Κροκαλοπαγές	35	17	21

Πίνακας 5.15 Χαρακτηριστικές τιμές γεωτεχνικών ιδιοτήτων για τους διάφορους τύπους μολασσικής βραχώμαζας σε **βάθος >10m**.

Τύπος μολάσσας	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i
I	70	26	17
II	65	24	15
III	65	21	12
IV	55	18	10
V	55	17	9
VI	70	19	21

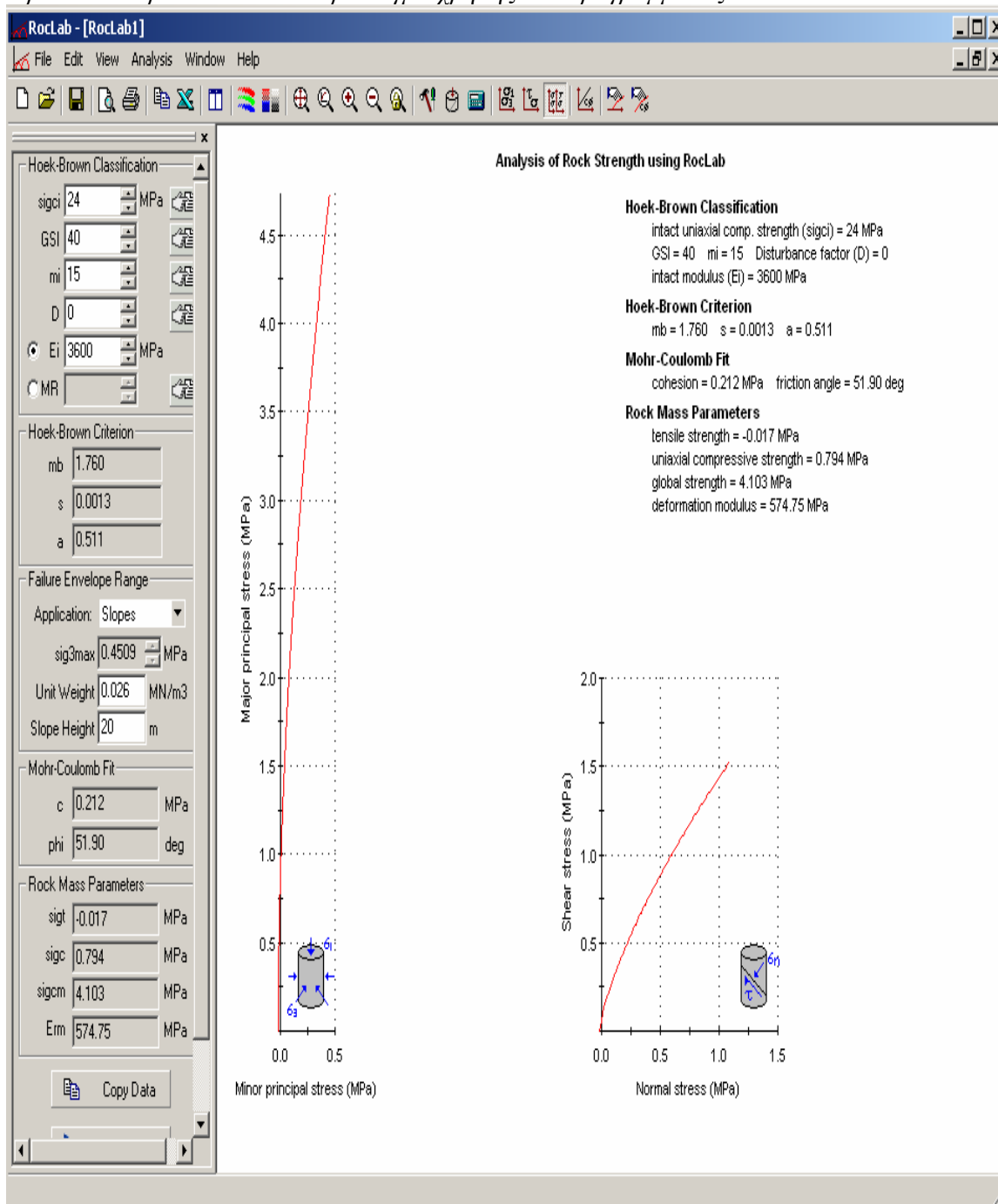
Πίνακας 5.16. Χαρακτηριστικές τιμές γεωτεχνικών ιδιοτήτων για τους διαφόρους τύπου μολασσικής βραχώμαζας σε **βάθος <10m**.

Τύπος μολάσσας	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i
I	45	26	17
II	40	24	15
III	35	21	12
IV	30	18	10
V	20	17	9
VI	40	19	21

Οι πίνακες 5.15 και 5.16 δημιουργήθηκαν με σκοπό να βρούμε την συνοχή c και την γωνία τριβής ϕ , στους 6 διαφορετικούς τύπους μολασσικής βραχώμαζας τόσο στο βάθος όσο και στην επιφάνεια.

Η συνοχή και η γωνία τριβής θα βρεθούν με την χρήση του προγράμματος Rocklab όπου στην ουσία επιλύει το κριτήριο Hoek and Brown.

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα χρήσης του προγράμματος Rocklab.



Εικόνα 5 Χρήση του προγράμματος Rocklab για τον υπολογισμό της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ .

5.15 Αποτελέσματα συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ για τους κυριότερους τύπους μολασσικής βραχώμαζας.

Στους πίνακες 5.17, 5.18, 5.19 και 5.20 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της συνοχής και της γωνία τριβής που προέκυψαν με την χρήση του προγράμματος Rocklab. Παρατηρούμε ότι έγινε διακριτοποίηση μέχρι το βάθος των 10m, όπου μετά από εκεί αλλάζει προς το καλύτερο η συμπεριφορά της βραχώμαζας. Οι παρακάτω τιμές θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών.

Πίνακας 5.17 Συνοπτικά αποτελέσματα συνοχής και γωνία τριβής για τους 6 βασικούς τύπους της μολάσσας για **βάθη >10m**.

Τύπος μολάσσας	C (KPa)	Φ (°)
I	627	59
II	480	57
III	450	54
IV	273	50
V	264	49
VI	479	59

Πίνακας 5.18 Συνοπτικά αποτελέσματα συνοχής και γωνίας τριβής για τους 6 βασικούς τύπους της μολάσσας για **βάθη <10m**.

Τύπος μολάσσας	C (KPa)	Φ (°)
I	255	55
II	212	52
III	169	48
IV	133	43
V	93	38
VI	206	53

Πίνακας 5.19. Συνοπτικά αποτελέσματα συνοχής και γωνίας τριβής από το μέσο όρο των τιμών των εργαστηριακών δοκιμών στους **εδαφικούς σχηματισμούς**(πίνακας 5.2).

Συνοχή c (KPa)	Γωνία τριβής ϕ (°)
42	24

Πίνακας 5.20. Συνοπτικά αποτελέσματα συνοχής και γωνία τριβής για **υλικό κατολίσθησης**.

Συνοχή c (KPa)	Γωνία τριβής ϕ (°)
0	18
25	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

6.1 Γενικά

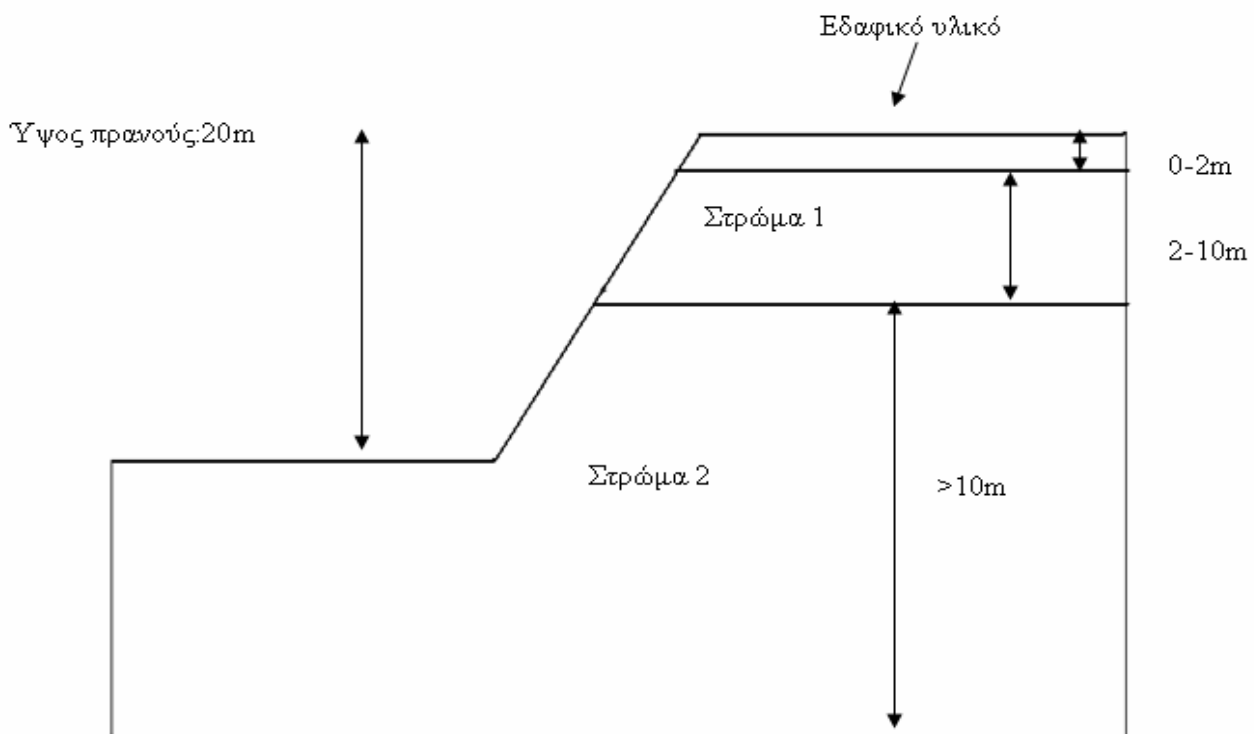
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των αναλύσεων ευστάθειας όπως αυτές προκύπτουν με την βοήθεια του προγράμματος *SLIDE 5.0* της *Rocscience*. Η τεχνική που ακολουθήθηκε για τις αναλύσεις ευστάθειας μολασσικών πρανών είναι η εξής:

- Αρχικά έγινε η επιλογή των τύπων μολασσικής βραχώμαζας που επιλέχτηκαν ώστε να υπάρχει μια πλήρη και σαφή εικόνα συμπεριφοράς της βραχώμαζας.
- Στη συνέχεια επιλέχτηκαν οι γωνίες κλίσης των πρανών και το ύψος του πρανούς.
- Επίσης σημαντικό ρόλο στο μοντέλο έχει και η στρωματογραφία, εξαιτίας της χαρακτηριστικής διαφοράς στην ποιότητα της μολασσικής βραχώμαζας στην επιφάνεια και στο βάθος.
- Ο παράγοντας νερού παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών. Οπότε και στην περίπτωση που εξετάζεται έπρεπε να συμπεριληφθεί για να υπάρχει μια αντικειμενικότητα στις αναλύσεις. Η επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανούς μελετάται με τον συντελεστή R_u .
- Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση στο μοντέλο κάποιων γεωτεχνικών παραμέτρων, συνοχής, γωνία τριβής και φαινόμενο βάρος.
- Τέλος, όλα τα παραπάνω έγιναν με σκοπό να βρεθεί ο συντελεστής ασφαλείας και να εξεταστούν οι περιπτώσεις αστοχίας πρανών.

Πιο συγκεκριμένα:

- Οι τύποι μολασσικής βραχώμαζας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο *ΤΥΠΟΣ II* που κατά κύριο λόγο αποτελείται από ψαμμίτη, ο *ΤΥΠΟΣ III* που αποτελείται από ίσες αναλογίες ιλυολίθου-ψαμμίτη, ο *ΤΥΠΟΣ V* που αποτελείται κατά κύριο λόγο από ιλυόλιθο. Σε μια ξεχωριστή περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πολύ ασθενής ιλυόλιθος με $\sigma_{ci}=5$, $m_i=7$ και τέλος μία περίπτωση υλικού προϋπάρχουσας κατολίσθησης με μηδενικές τιμές συνοχής. Όπως προαναφέραμε επιλέχτηκαν οι παραπάνω τύποι για να έχουμε αντικειμενικά και πραγματικά αποτελέσματα για την συμπεριφορά της βραχώμαζας (Σχήμα 6,1).
- Οι γωνίες κλίσης των πρανών που επιλέχτηκαν είναι 70, 60, 45 και 30 μοίρες και το ύψος του πρανούς είναι 20m.
- Στη στρωματογραφία του μοντέλου έπρεπε να δοθεί μια εικόνα πραγματικότητας των συνθηκών και της ποιότητας της βραχώμαζας. Έτσι σύμφωνα με τις γεωτρήσεις που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επιφάνεια αποτελείται από ένα εδαφικό μανδύα που φτάνει μέχρι και το βάθος των 2m. Το αμέσως επόμενο στρώμα είναι η πιο αποσθαρωμένη και σχιστοποιημένη βραχώμαζα που φτάνει μέχρι το βάθος των 10m. Τέλος υπάρχει και το στρώμα της συμπαγούς μολασσικής βραχώμαζας που είναι κάτω από το βάθος των 10m. Επίσης συμπεριλήφθηκε και μία περίπτωση όπου ο εδαφικός μανδύας φτάνει μέχρι το βάθος των 8m και πολύ διαταραγμένος και ασθενής ιλυόλιθος σε βάθος μεγαλύτερο των 8m που αντιπροσωπεύει την χειρότερη περίπτωση από άποψη αντοχής και επικινδυνότητας αστοχίας.

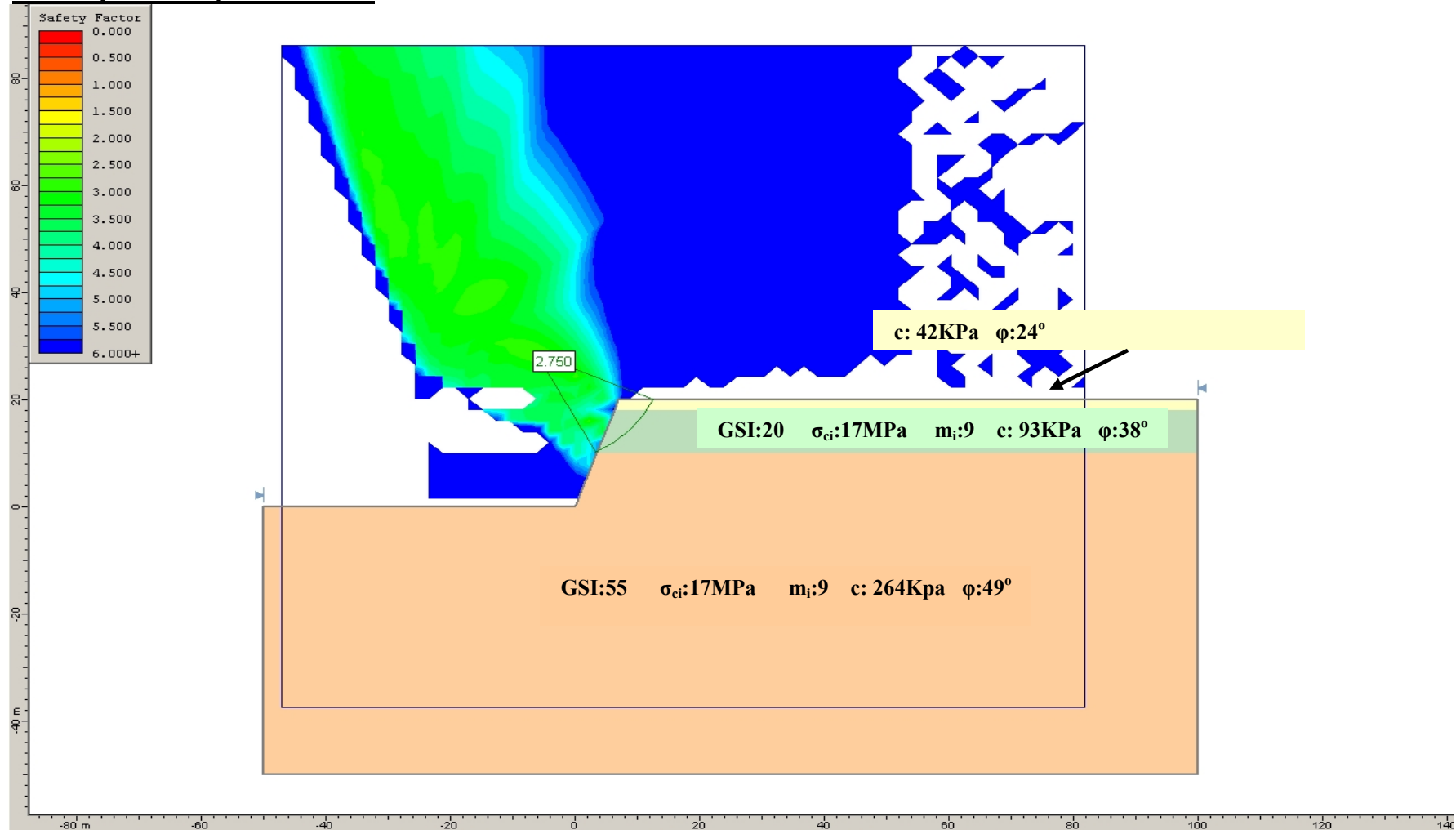
- Στην περίπτωση του παράγοντα του νερού χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθήκες. Στην πρώτη συνθήκη να είναι μικρή η επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανούς και στην δεύτερη συνθήκη να υπάρχει μεγάλη επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανούς. Έτσι λοιπόν, δόθηκαν τιμές σε έναν συντελεστή R_u που απεικονίζει την πίεση των πόρων του νερού. Οι τιμές που δόθηκαν είναι:
 $R_u=0.05$ και $R_u=0.4$ για μικρή και μεγάλη επίδραση του νερού αντίστοιχα. Στην περίπτωση του διαταραγμένου ιλυολίθου και στο υλικό της προϋπάρχουσας κατολίστησης χρησιμοποιήθηκε η τιμή $R_u=0.2$.
- Οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο είναι η συνοχή c η γωνία τριβής ϕ και το φαινόμενο βάρος γ και βρίσκονται στους πίνακες 5,17 5,18 5,19 και 5.20.
- Τέλος προκύπτουν οι συντελεστές ασφαλείας που καθορίζουν αν υπάρχει αστάθεια ($F<1$) ή ευστάθεια ($F>1$) στο πρανές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις ευστάθειας ήταν οι εξής:
 - i. Μέθοδος Bishop
 - ii. Μέθοδος Morgenstern-Price
 - iii. Μέθοδος Janbu
 - iv. Μέθοδος Spencer



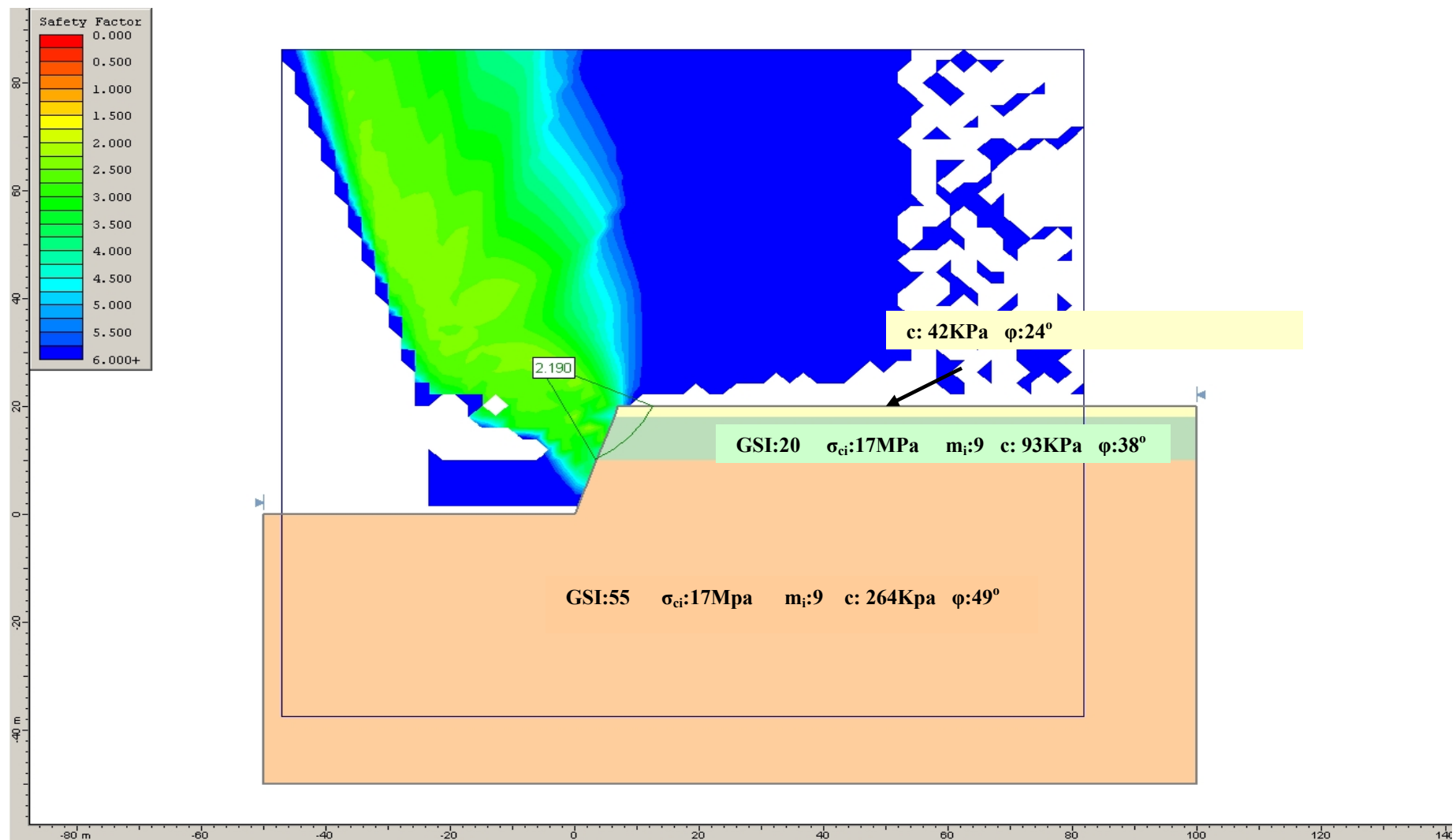
Σχήμα 6.1. Μοντέλο αναλύσεων ευστάθειας μολασσικής βραχόμαζας

Στην παράγραφο 6.2 γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ενδεικτικά κάποιων αναλύσεων. Το σύνολο των αναλύσεων βρίσκεται στο παράρτημα, στο τέλος της εργασίας.

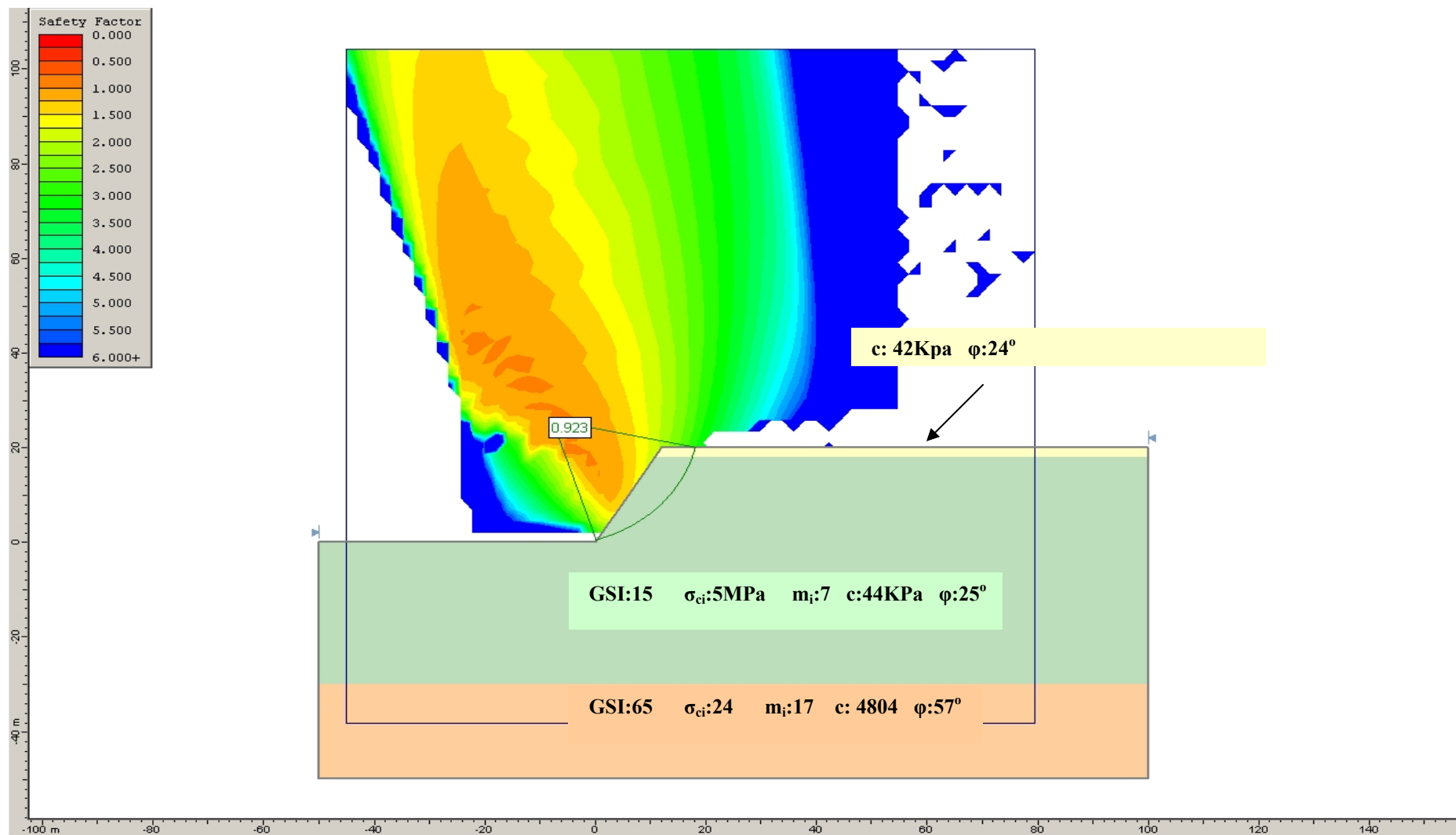
6.2 Παρουσίαση αναλύσεων



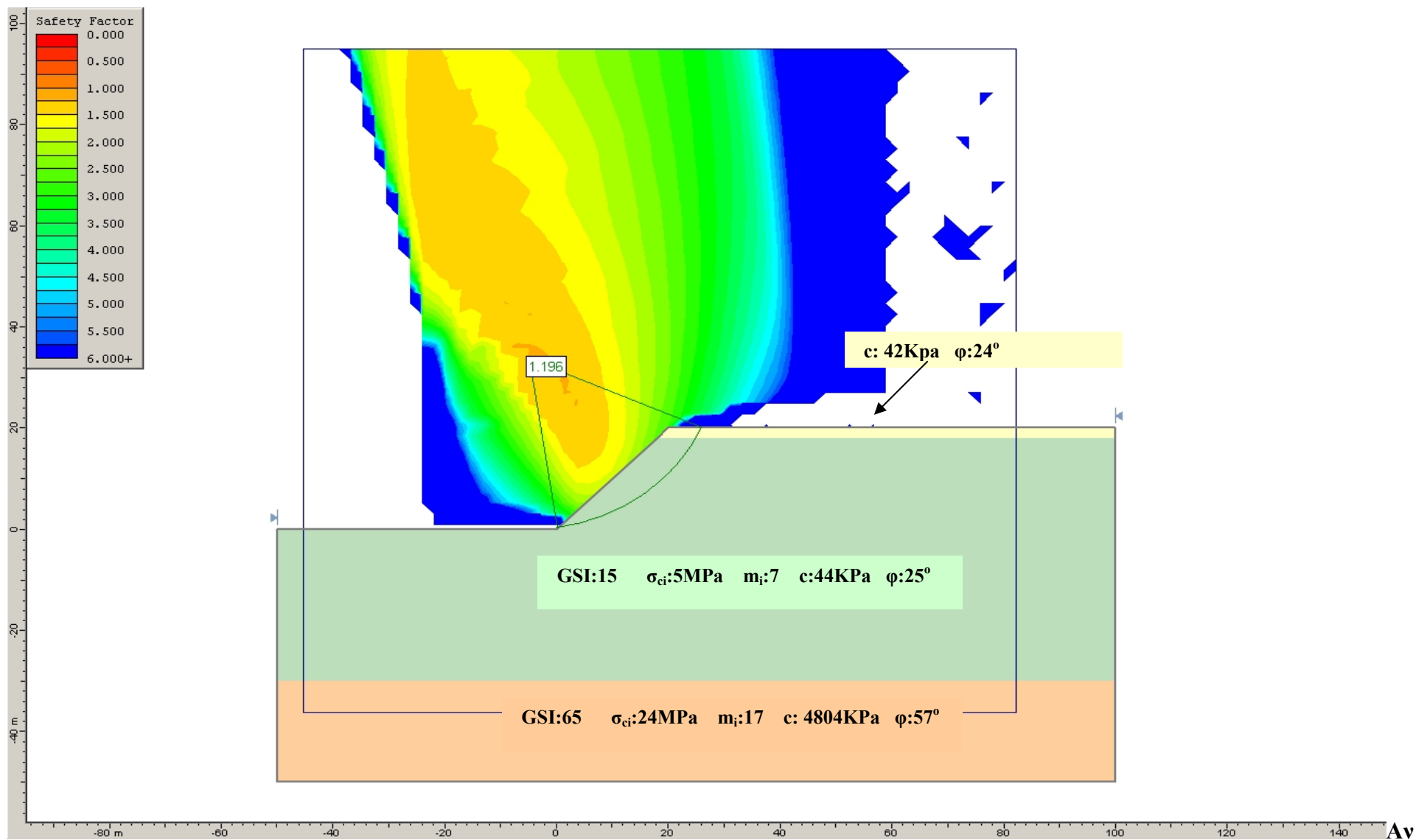
Ανάλυση 1. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.05$)



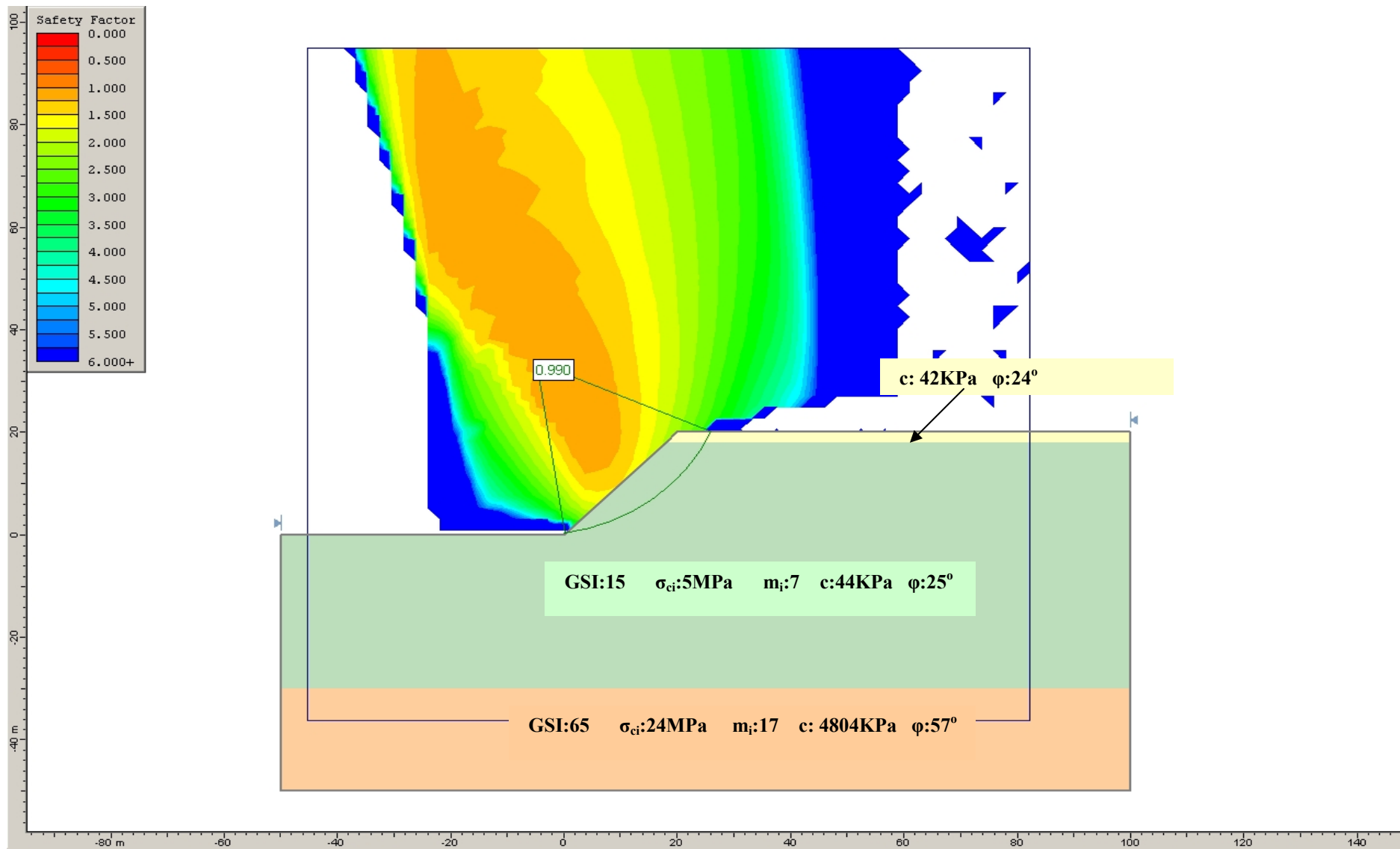
Ανάλυση 2. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.4$)



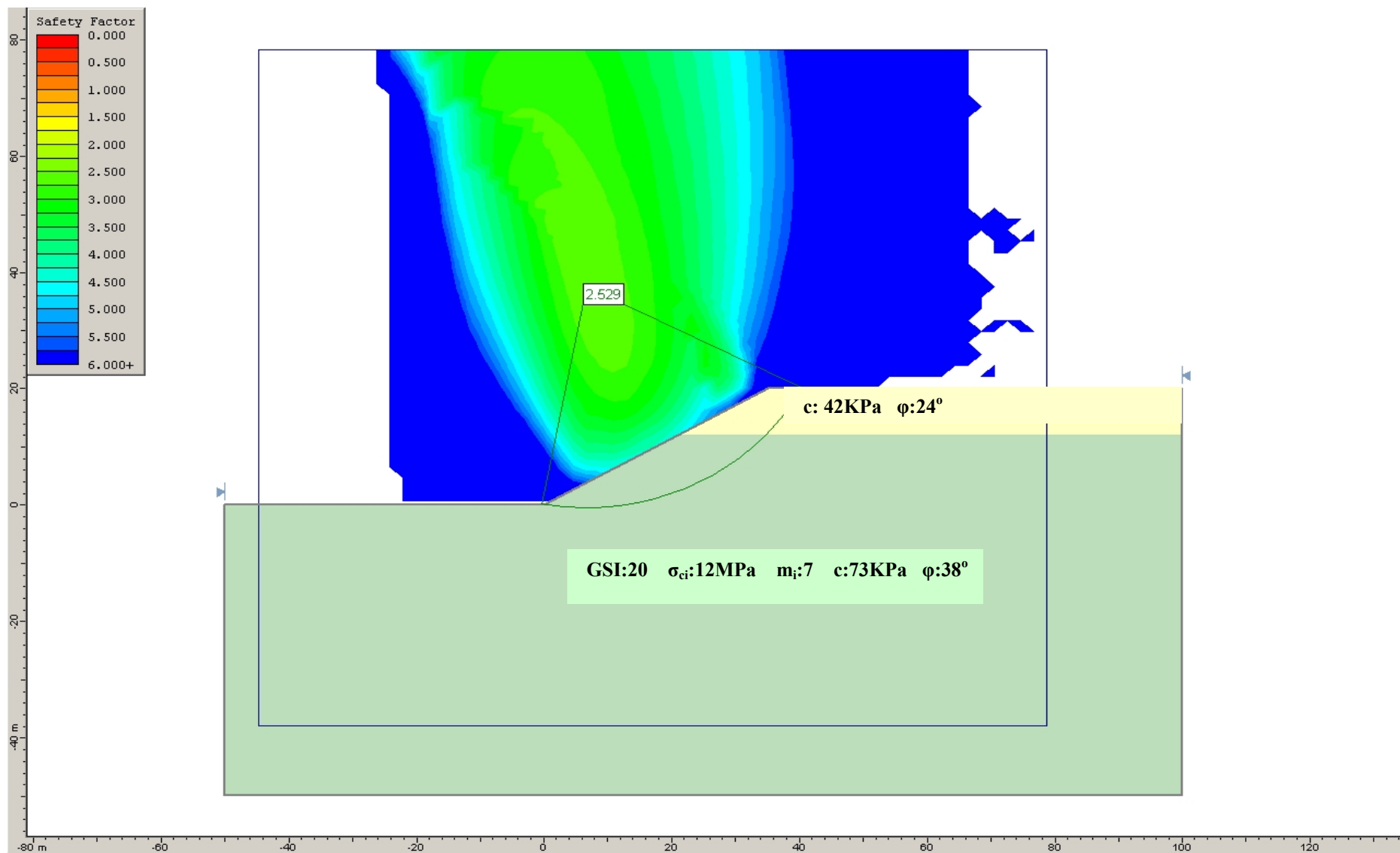
Ανάλυση 14. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλύολιθος, $R_u=0.2$).



Ανάλυση 21. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλυόλιθος, $R_u=0.2$).



Ανάλυση 37. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλυόλιθος, $R_u=0.4$).



Ανάλυση 35. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30 γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.2$)

ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ως επίλογο, θα αναφερθούν ορισμένα βασικά στοιχεία της παρούσας εργασίας και στη συνέχεια θα προβούμε στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η κατανόηση της μολασσικής βραχώμαζας και η κατάλληλη προσομοίωση του μοντέλου για την συμπεριφορά της ευστάθειας στο πρυνές.

Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια:

- Αρχικά έγινε μια εκτενή αναφορά, από θεωρητική άποψη κυρίως, σε ότι έχει σχέση με τις κατολισθήσεις, με τον τρόπο εκδήλωσης και τα είδη των κατολισθήσεων.
- Περιγράφηκαν οι αναλύσεις ευστάθειας σε εδαφικά και βραχώδη πρυνή και δόθηκε βάση στις κυριότερες γεωτεχνικές παραμέτρους της βραχώμαζας.
- Στη συνέχεια περιγράφηκαν οι κυριότεροι τύποι ολίσθησης και αστοχίας σε εδαφικά και βραχώδη πρυνή έγινε αναφορά σε μέτρα αντιστήριξης τα οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν στις τελικές αναλύσεις ευστάθειας πρυνών.
- Επίσης έγινε η γεωλογική περιγραφή της μολάσσας, λιθολογία, τεκτονισμός, αποσάθρωση και υδρογεωλογικό καθεστώς. Αναφέρεται και η εξάπλωση των σχηματισμών αυτών στον ελλαδικό χώρο. Τέλος έγινε και εκτενέστερη περιγραφή της γεωλογίας της μολάσσας στην περιοχή μελέτης (Παναγιά Γρεβενών).
- Μετά την γεωλογική μελέτη και ανάλυση, εξετάστηκε και η μηχανική συμπεριφορά της μολάσσας. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και τα εργαστηριακά δεδομένα από 4 μελέτες διάνοιξης σηράγγων μέσα στον σχηματισμό της μολάσσας, στην Εγνατία Οδό. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για τον σχηματισμό πινάκων, διαγραμμάτων και ιστογραμμάτων στα οποία περιλαμβάνονται οι κυριότεροι γεωτεχνικοί παράμετροι.. Αυτοί είναι:
 - Ο δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (RQD)
 - Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI)
 - Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή (σ_{ci})
 - Φαινόμενο ξηρό βάρος
 - Η συνοχή c
 - Η γωνία τριβής ϕ

Με βάση την αξιολόγηση των πινάκων, διαγραμμάτων και ιστογραμμάτων προέκυψαν τυπικές τιμές αντοχής που χρησίμευσαν για την κατανόηση της συμπεριφοράς της μολασσικής βραχώμαζας. Στη συνέχεια λόγω της ετερογένειας και της διαφορετικής συμπεριφοράς κρίθηκε σκόπιμο να γίνει διαχωρισμός της μολασσικής βραχώμαζας σε 6 διαφορετικούς τύπους ανάλογα με την τεχνικογεωλογική τους συμπεριφορά. Αυτοί είναι:

- I. Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές ενστρώσεις ιλυολίθου**
- II. Ψαμμίτης με κατά θέσεις ενστρώσεις ιλυολίθου**
- III. Βραχώμαζα αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες**
- IV. Ιλυόλιθος κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμίτη**
- V. Ιλυόλιθος με σποραδικές ενστρώσεις ψαμμίτη**
- VI. Κροκαλοπαγές**

- Ακολουθήθηκε η ανάλυση και η περιγραφή κάθε τύπου μολάσσας και επίσης έγινε εκτενή αναφορά στις γεωτεχνικές ιδιότητες και στην συμπεριφορά τους. Κατασκευάστηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες για κάθε τύπο μολασσικής βραχώμαζας οι οποίοι περιλάμβαναν το GSI , το σ_{ci} και το m_i .
- Χρησιμοποιώντας αυτές τιμές και με την χρήση του προγράμματος Rocklab έγινε ο υπολογισμός της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ .
- Τέλος οι παραπάνω τιμές χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις ευστάθειας πρανούς που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του προγράμματος SLIDE 5.0 της Rocscience.

Στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- Αρχικά έγινε η επιλογή των τύπων μολασσικής βραχώμαζας που επιλέχτηκαν ώστε να υπάρχει μια πλήρη και σαφή εικόνα συμπεριφοράς της βραχώμαζας.
- Στη συνέχεια επιλέχτηκαν οι γωνίες κλίσης των πρανών και το ύψος του πρανού.
- Επίσης σημαντικό ρόλο στο μοντέλο έχει και η στρωματογραφία, εξαιτίας της χαρακτηριστικής διαφοράς στην ποιότητα της μολασσικής βραχώμαζας στην επιφάνεια και στο βάθος.
- Ο παράγοντας νερού παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών. Οπότε και στην περίπτωση που εξετάστηκε έπρεπε να συμπεριληφθεί για να υπάρχει μια αντικειμενικότητα στις αναλύσεις. Η επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανού μελετάται με τον συντελεστή R_u .
- Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση στο μοντέλο κάποιων γεωτεχνικών παραμέτρων, συνοχή, γωνία τριβής και φαινόμενο βάρος.
- Τέλος, όλα τα παραπάνω έγιναν με σκοπό να βρεθεί ο συντελεστής ασφαλείας για να δούμε τις περιπτώσεις αστοχίας πρανών.

Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

- Οι τύποι μολασσικής βραχώμαζας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο *ΤΥΠΟΣ II* που κατά κύριο λόγο αποτελείται από ψαμμίτη, ο *ΤΥΠΟΣ III* που αποτελείται από ίσες αναλογίες ιλυολίθου-ψαμμίτη, ο *ΤΥΠΟΣ V* που αποτελείται κατά κύριο λόγο από ιλυόλιθο, μια ξεχωριστή περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε πολύ ασθενής ιλυόλιθος με $\sigma_{ci}=5$, $m_i=7$ και τέλος μία περίπτωση υλικού προϋπάρχουσας κατολίσθησης με μηδενικές τιμές συνοχής
- Οι γωνίες κλίσης των πρανών που επιλέχτηκαν είναι 70, 60, 45 και 30 μοίρες και το ύψος του πρανού 20m.
- Στη στρωματογραφία του μοντέλου έπρεπε να δοθεί μια εικόνα πραγματικότητας των συνθηκών και της ποιότητας της βραχώμαζας. Έτσι λοιπόν, η επιφάνεια αποτελείται από ένα εδαφικό μανδύα που φτάνει μέχρι και το βάθος των 2m. Το αμέσως επόμενο στρώμα είναι η πιο αποσαθρωμένη και σχιστοποιημένη βραχώμαζα που φτάνει μέχρι το βάθος των 10m. Τέλος υπάρχει και το στρώμα της συμπαγούς μολασσικής βραχώμαζας που είναι κάτω από το βάθος των 10m. Επίσης συμπεριλήφθηκε και μία περίπτωση όπου ο εδαφικός μανδύας φτάνει μέχρι το βάθος των 8m και πολύ διαταραγμένος και ασθενής ιλυόλιθος σε βάθος μεγαλύτερο των 8m που αντιπροσωπεύει την χειρότερη περίπτωση από άποψη αντοχής και επικινδυνότητας αστοχίας.
- Στην περίπτωση του παράγοντα του νερού χρησιμοποιήσαμε δύο συνθήκες. Στην πρώτη συνθήκη να είναι μικρή η επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανού και στην δεύτερη συνθήκη να υπάρχει μεγάλη επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανού. Έτσι λοιπόν, δόθηκαν τιμές σε έναν συντελεστή R_u που απεικονίζει την πίεση των πόρων του νερού. Οι τιμές που δόθηκαν είναι

$R_u=0.05$ και $R_u=0.4$ για μικρή και μεγάλη επίδραση του νερού αντίστοιχα. Στην περίπτωση του ασθενούς ιλυολίθου και στο υλικό της προϋπάρχουσας κατολίσθησης χρησιμοποιήθηκε η τιμή $R_u=0.2$.

- Οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο δηλαδή η συνοχή c η γωνία τριβής ϕ και το φαινόμενο βάρος γ , βρίσκονται στους πίνακες 5,17 5,18 και 5,19 και 5.20.
- Τέλος προκύπτουν οι συντελεστές ασφαλείας που καθορίζουν αν υπάρχει αστάθεια ($F<1$) ή ευστάθεια ($F>1$) στο πρυνές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις ευστάθειας ήταν οι εξής:
 - i. Μέθοδος Bishop
 - ii. Μέθοδος Morgenstern-Price
 - iii. Μέθοδος Janbu
 - iv. Μέθοδος Spencer

Παρακάτω παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των αναλύσεων ευστάθειας για κυκλοειδής και περιστροφικές ολισθήσεις.

Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων ευστάθειας

Ανάλυση α/α	Μοντέλο ανάλυσης	Νερό- R_u	Κλίση Πρανούς	Συντελεστής ασφαλείας F (Μέθοδος Bishop)
1	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.05	70°	2.75
2	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.4	70°	2.19
3	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.05	70°	5.44
4	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.4	70°	4.38
5	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.05	70°	4.56
6	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.4	70°	3.77
7	Εδαφικός μανδύας – διαταραγμένος ιλυόλιθος	0.2	70°	0.75
8	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.05	60°	3.33
9	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.4	60°	2.75
10	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.05	60°	6.48
11	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.4	60°	5.38
12	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.05	60°	5.50
13	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.4	60°	4.69
14	Εδαφικός μανδύας - διαταραγμένος ιλυόλιθος	0.2	60°	0.92
15	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.05	45°	4.22
16	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.4	45°	3.53
17	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.05	45°	8.0
18	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.4	45°	6.82
19	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.05	45°	6.93
20	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.4	45°	5.94
21	Εδαφικός μανδύας – διαταραγμένος ιλυόλιθος	0.2	45°	1.19
22	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.05	30°	5.83
23	Εδαφικός μανδύας - Τύπος V	0.4	30°	4.80
24	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.05	30°	10.5
25	Εδαφικός μανδύας - Τύπος II	0.4	30°	8.89
26	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.05	30°	9.49
27	Εδαφικός μανδύας - Τύπος III	0.4	30°	7.99
28	Εδαφικός μανδύας – διαταραγμένος ιλυόλιθος	0.2	30°	1.61
29	Ασθενής βραχώμαζα	0.2	70°	1.19
30	Υλικό κατολίσθησης	0.2	70°	0.03
31	Ασθενής βραχώμαζα	0.2	60°	1.42
32	Υλικό κατολίσθησης	0.2	60°	0.07
33	Ασθενής βραχώμαζα	0.2	45°	1.94
34	Υλικό κατολίσθησης	0.2	45°	0.20
35	Ασθενής βραχώμαζα	0.2	30°	2.52
36	Υλικό κατολίσθησης	0.2	30°	0.44
37	Εδαφικός μανδύας - διαταραγμένος ιλυόλιθος	0.4	45	0.99
38	Ασθενής βραχώμαζα	0.4	60°	1.32
39	Ασθενής βραχώμαζα	0.4	70°	0.91

Γενικά συμπεράσματα για τον πίνακα 6.1

- Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι ο τύπος II και ο τύπος III παρουσιάζουν μεγάλους συντελεστές ασφαλείας ακόμα όταν η πίεση των πόρων του νερού είναι μεγάλη, ($Ru=0.4$) και όταν υπάρχει μεγάλη γωνία κλίσης. Αυτό δηλώνει ότι αυτοί οι μολассικοί τύποι δεν μπορούν να δώσουν περιστροφικές ολισθήσεις καθώς η παρουσία των ιλυολίθων δεν είναι τόσο σημαντική. Οπότε δεν υπάρχει έντονα σχιστοποιημένη και αποσαθρωμένη δομή ακόμα και στα επιφανειακά τμήματα.
- Επίσης ο τύπος V παρόλου που έχει αρκετά χαμηλότερη αντοχή, παρατηρούμε ότι ευσταθεί σε 70° κλίση γωνία πρανούς και σε μεγάλη πίεση πόρων. Ωστόσο η μείωση του συντελεστή ασφαλείας είναι αισθητή σε σχέση με τον τύπο II και III.
- Στην περίπτωση που τοποθετηθεί στο μοντέλο ένας πολύ σχιστοποιημένος ιλυόλιθος με αποδιοργανωμένη δομή (προυπάρχον υλικό κατολίσθησης), μπορεί να παρατηρηθεί ότι στις 70° και στις 60° έχουμε περιστροφική ολίσθηση. Αντίθετα μετά στις 45° αρχίζει να ευσταθεί οριακά. Στις 30° υπάρχει μια ικανοποιητική ευστάθεια του πρανούς. Ωστόσο σε αυτές τις περιπτώσεις επιλέχτηκε μία ενδιάμεση τιμή για την πίεση των πόρων του νερού ($Ru=0.2$). Με αύξηση της πίεσης των πόρων σε $Ru=0.4$ υπάρχει αστοχία και στις 45° . (Αναλύσεις 7, 14, 21, 28 και 37).
- Στις αναλύσεις 28-36 παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει διότι στο μοντέλο, τοποθετήθηκε μεγαλύτερο πάχος εδαφικών υλικών (8m), και ελήφθησαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές αντοχής για ιλυόλιθο. (Αναλύσεις 29,31,33,35). Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι με πίεση πόρων $Ru=0.2$ σε όλες τις γωνίες κλίσεων, τα πρανά ευσταθούν.
- Τέλος επιλέχτηκε και μία ακόμη κατηγορία όπου πάλι το εδαφικό υλικό έχει μεγάλο πάχος (8m), αλλά έχει και μηδενική συνοχή, δηλαδή έχει ήδη κατολισθήσει. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκαν εξαιρετικά μικρή συντελεστές ασφαλείας, γεγονός που υποδηλώνει σημαντικές κυκλοειδής ολισθήσεις.

Γενικώς στον σχηματισμό της μολάσσας ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του είναι η ετερογένεια στην λιθολογία, η οποία επηρεάζει σημαντικά και την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της. Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει διαχωρισμός της μολассικής βραχώμαζας σε γεωλογικούς και τεχνικογεωλογικούς τύπους και να μην μελετάται ενιαία καθώς θα προκύψουν εσφαλμένα συμπεράσματα.

Ανάλογα με το ποσοστό σε ιλυόλιθο, το βαθμό αποσάθρωσης την ποιότητα των ασυνεχειών και φυσικά το σύνολο της αντοχής της βραχώμαζας μπορούν να υπάρξουν διάφοροι τύποι αστοχίας. Παρακάτω παρατίθεται μια συγκεντρωτική «εικόνα» για τον κάθε τύπο μολассικής βραχώμαζας στην συμπεριφορά του στο πρανές.

Πιθανοί τύποι αστοχιών σε κάθε τύπο μολάσσας



Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης. (Τύπος Ι).

Υγιής σχηματισμός σε σχέση με την αποσάθρωση. Οι ασυνέχειες είναι τραχείες και οι απόστασες τους είναι μεγάλες

Ενδεχόμενη αστοχία: (επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση)

Ενδεικτικές τιμές

GSI: 50 (περιοχή M3)

σ_{ci} : 26

m_i : 17



Ψαμμίτης με κατά θέσεις ενστρώσεις ιλυολίθου (Τύπος ΙΙ).

Γενικά υγιής με ελάχιστη αποσάθρωση.

Οι ασυνέχειες είναι τραχείες και η απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγάλη.

Ενδεχόμενη αστοχία: (επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση).

Ενδεικτικές τιμές

GSI: 45 (Περιοχή M4)

σ_{ci} : 24

m_i : 15



Ισομερής εναλλαγή ψαμμίτη-ιλυολίθου (Τύπος ΙΙΙ). Γενικά υγιής με ελάχιστη αποσάθρωση

Οι ασυνέχειες είναι ελαφρώς τραχείες για τους ψαμίτες και λείες για τους ιλυόλιθους.

Ενδεχόμενη αστοχία: (επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση)

Ενδεικτικές τιμές

GSI: 35 (Περιοχή M5)

σ_{ci} : 21

m_i : 12



Ιλυόλιθος με κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμίτη (Τύπος IV)
Έντονη αποσάθρωση
Η απόσταση των ασυνεχειών είναι πολύ μικρή.

Ενδεχόμενη αστοχία: (περιστροφική ολίσθηση επιδερμικού χαρακτήρα).

Ενδεικτικές τιμές
GSI: 30 (Περιοχή M6)
 σ_{ci} : 18
 m_i : 10



Ιλυόλιθος με πολύ σποραδικές ενστρώσεις ψαμμίτη (Τύπος V).
Πολύ έντονη αποσάθρωση.
σχιστοιποιημένη έως εδαφοποιημένη βραχώμαζα

Ενδεχόμενη αστοχία: (περιστροφική ολίσθηση).

Ενδεικτικές τιμές
GSI: 20 (Περιοχή M7)
 σ_{ci} : 15
 m_i : 9



Κροκαλοπαγες (Τύπος VI).
Ασθενή έως μέτρια αποσάθρωση

Ενδεχόμενη αστοχία: (επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση ή επιδερμικού χαρακτήρα περιστροφική ολίσθηση ανάλογα με το υλικό συγκόλλησης).

Ενδεικτικές τιμές
GSI: 40 (Περιοχή M4-M5)
 σ_{ci} : 19
 m_i : 21

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

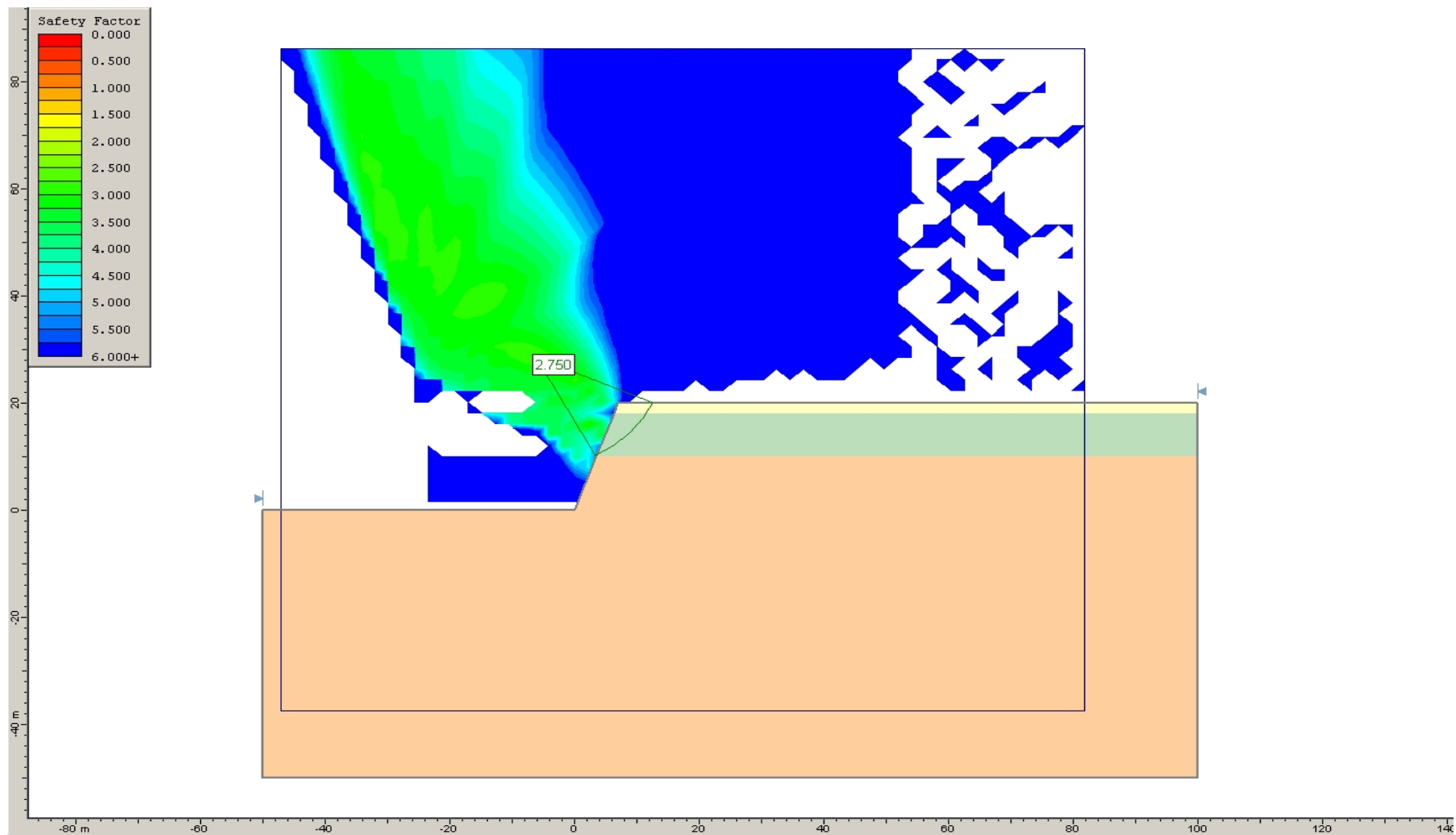
- Δημόπουλος Γ. (2008), Τεχνική Γεωλογία
- Καββαδάς, Μ. (2005) Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων ΕΜΠ
- Κούκης, Σαμπατάκης, (2007) Γεωλογία Τεχνικών Έργων
- Μουντράκης Δημοσθένης, (2010). Γεωλογία και Γεωτεχνική εξέλιξη της Ελλάδας
- Σοφιανός, (2008) Σχεδιασμός υπόγειων έργων ΕΜΠ
- Τσιραμπίδης Ανανίας, (2008), Ιζηματογενή Πετρώματα
- Ελπίδα-Ιουλίου Αλέξη, (2010). Μεταπτυχιακή εργασία, εκτίμηση μέτρου παραμορφωσιμότητας ασθενών βραχώμαζων, σύγκριση μεθοδολογιών με δεδομένα σιράγγων και επίδραση στον σχεδιασμό υπογείων έργων.
- Δίπλας Ηλίας, (2004). Διπλωματική εργασία, οι αναλύσεις ευστάθειας πρανών-οι κατολισθήσεις της εθνικής οδού Πούντας-Καλαβρύτων.
- Παυλίδης Κωνσταντίνος, (2009). Μεταπτυχιακή εργασία ανάλυση ευστάθειας πρανών στο τμήμα Ρεντίνας Στρυμόνα της Εγνατίας Οδού.
- Β. Μαρίνος, (2007). Διδακτορικό. Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σιράγγων. Γεωτεχνικός τομέας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
- Μπάτσου Ιωάννα, (2009). Διπλωματική εργασία, η αστοχία των πρανών και κατολισθητικά φαινόμενα. Μηχανισμοί πρόκλησής τους και αντιμετώπιση.
- Ψάλτου Εμμανουήλ, (2009). Πτυχιακή εργασία, πίνακες και διαγράμματα ευστάθειας γαιωδών πρανών ορυγμάτων με αναβαθμούς.
- Β. Μαρίνος, (2011). Παρουσιάσεις στο διαδίκτυο γεωλογικές περιβαλλοντικές μελέτες τεχνικών έργων
- Λουπασάκης (2011). Διαφάνειες διαλέξεων εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων, Κωνσταντίνου
- ΑΙ Σοφιανός και ΠΠ Νομικός, (2008). Προχωρημένη μηχανική πετρωμάτων.
- Μαρίνος Β. Μαρίνος Π. Hoek E. (2004). Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος
- Marinos P.V, Tsiambaos G, (2010). Strength and deformability of specific sedimentary and ophiolitic rocks, (Πρακτικά 12^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Πάτρα).

Μελέτες:

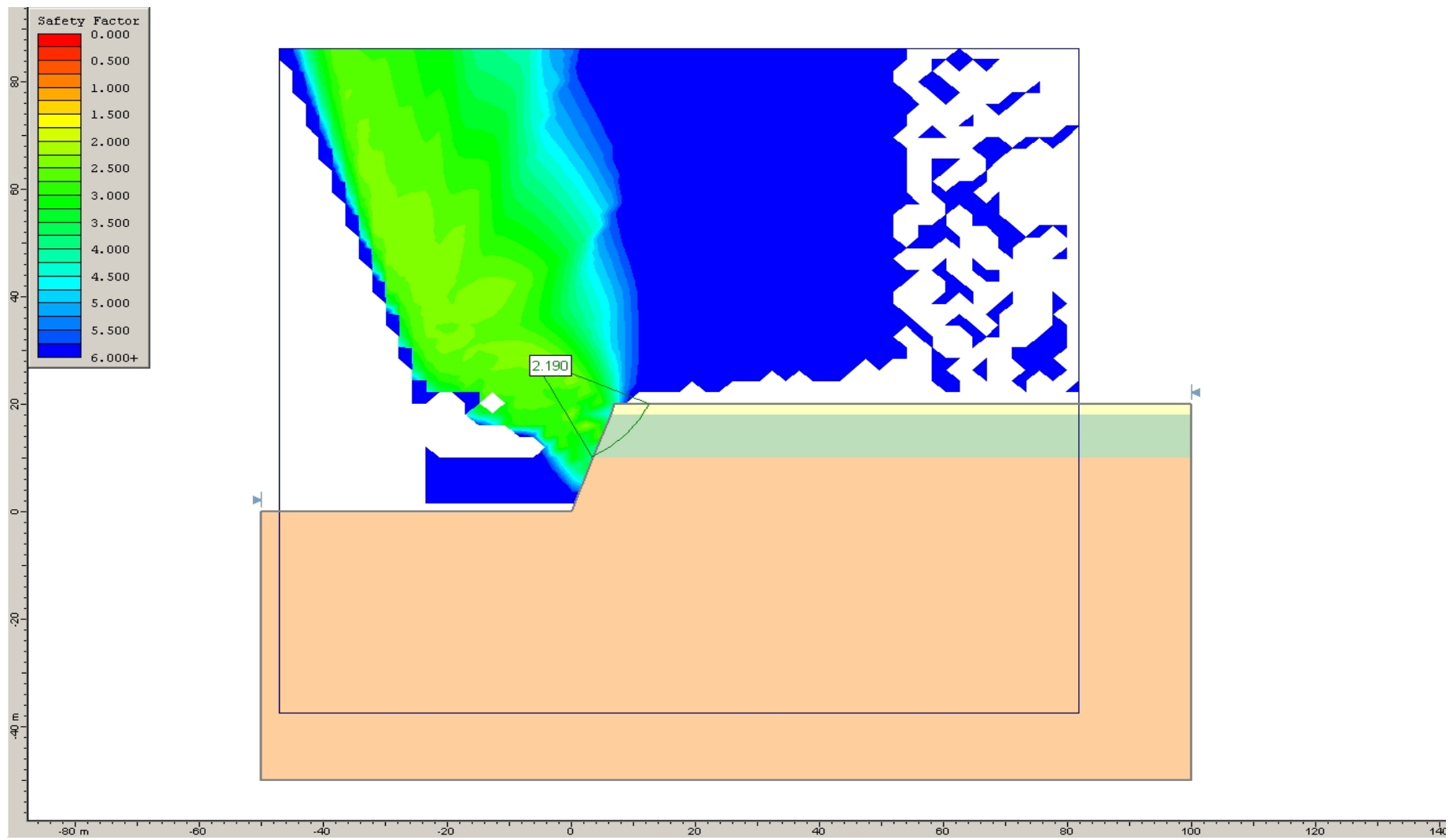
- Οριστική Γεωλογική, Γεωτεχνική και στατική μελέτη Σήραγγας Καρατζά, Τμήμα Παναγιά-Γρεβενά, τεχνική έκθεση σχεδιασμού στομίων εξόδου σήραγγας Καρατζά.(Εγνατία Οδός).
- Οριστική Γεωλογική, Γεωτεχνική και στατική μελέτη Σήραγγας Αγία Παρασκευή (Σ1), και Σήραγγα Αγναντερού (Σ2) Τμήμα Παναγιά-Γρεβενά. (Εγνατία Οδός).
- Οριστική Γεωλογική, Γεωτεχνική και στατική μελέτη των δίδυμων Σηράγγων, Πριόνια και Βελανίδια τ ου τμήματος Παναγιά-Γρεβενά (Εγνατία Οδός).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

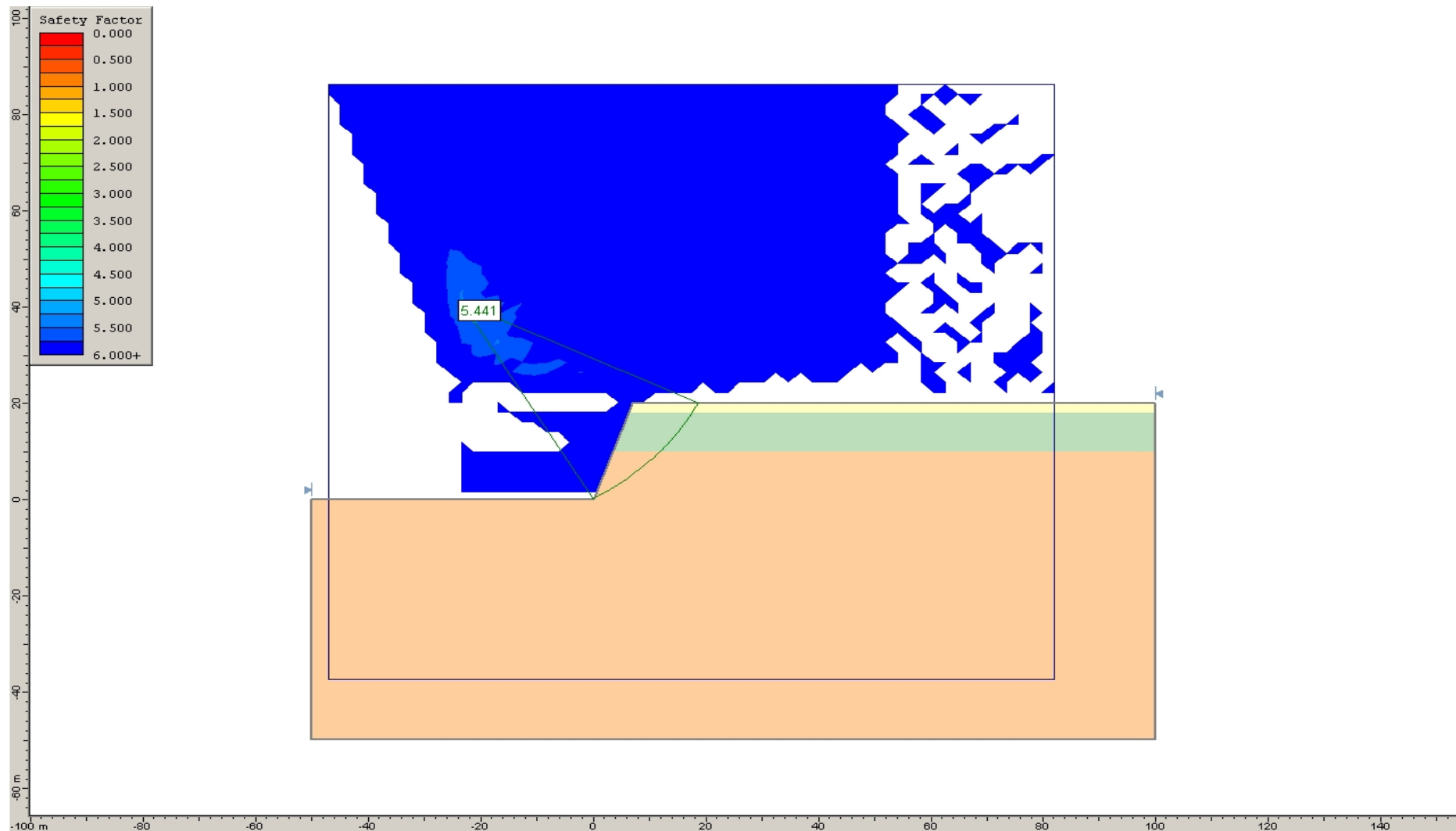
- i. Αναλύσεις ευστάθειας πρανών έναντι περιστροφικών ολισθήσεων (Slide 5.0).
- ii. Υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής, συνοχής c και γωνία τριβής ϕ (Rocklab).



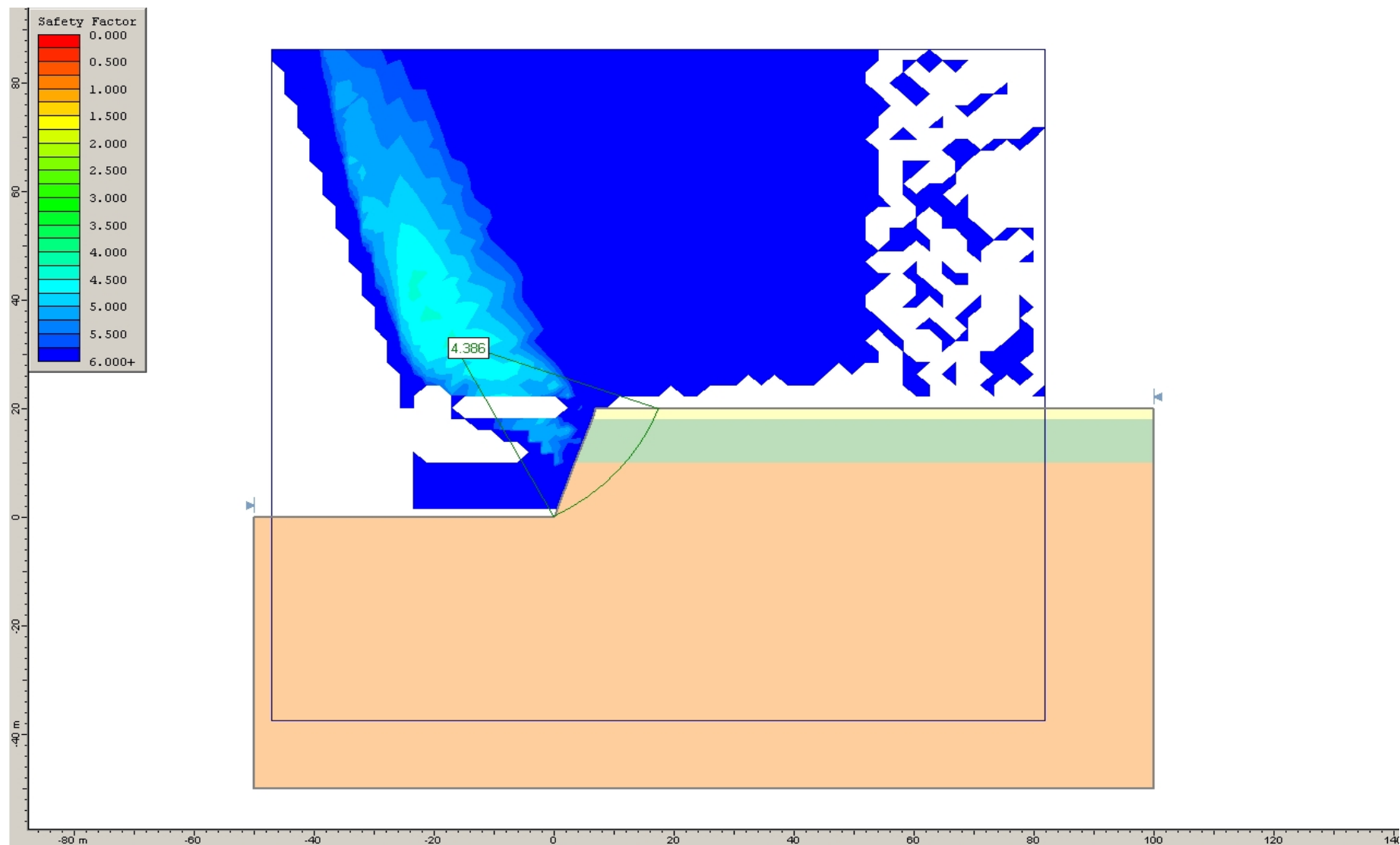
Ανάλυση 1. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.05$)



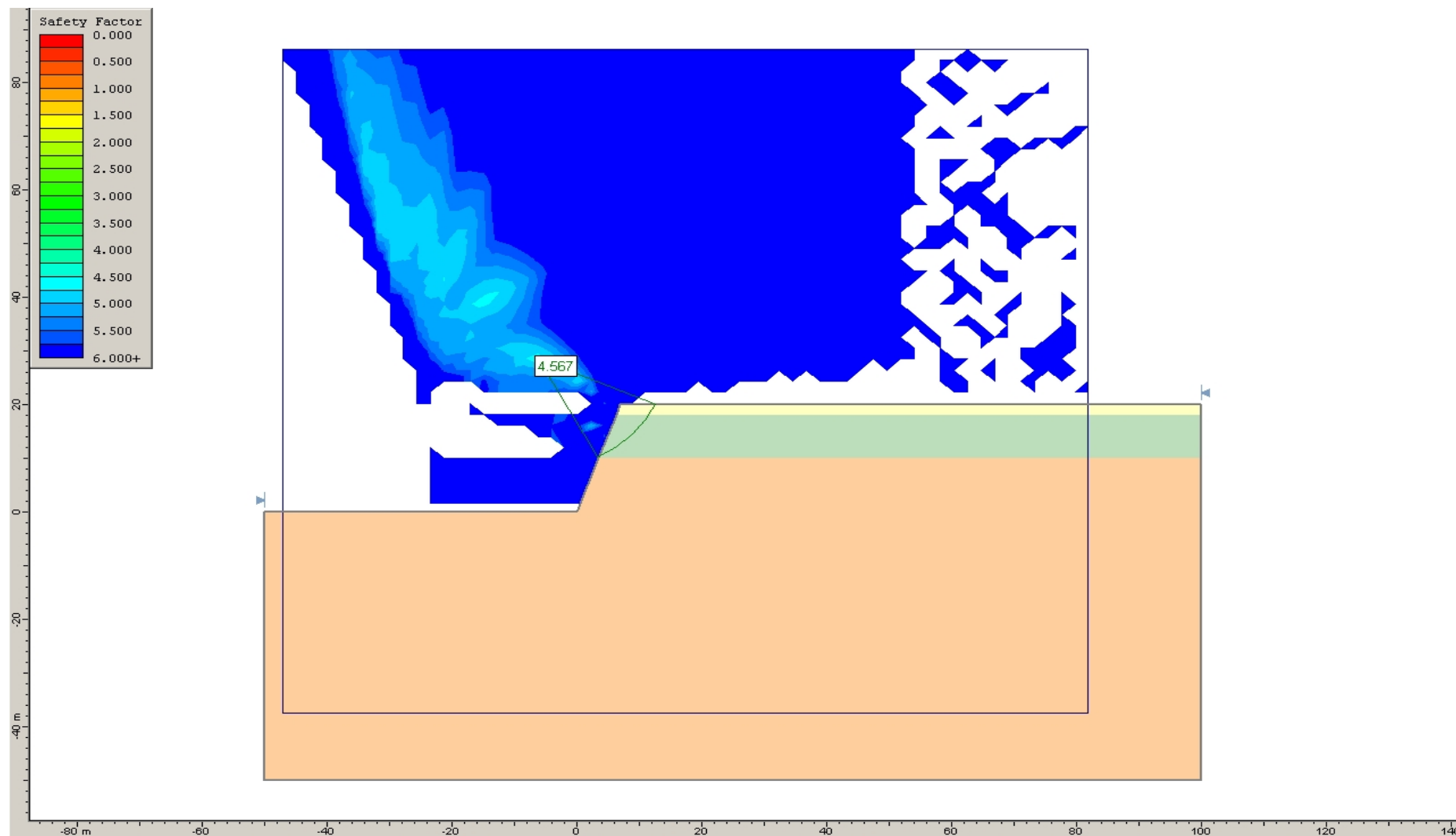
Ανάλυση 2. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.4$)



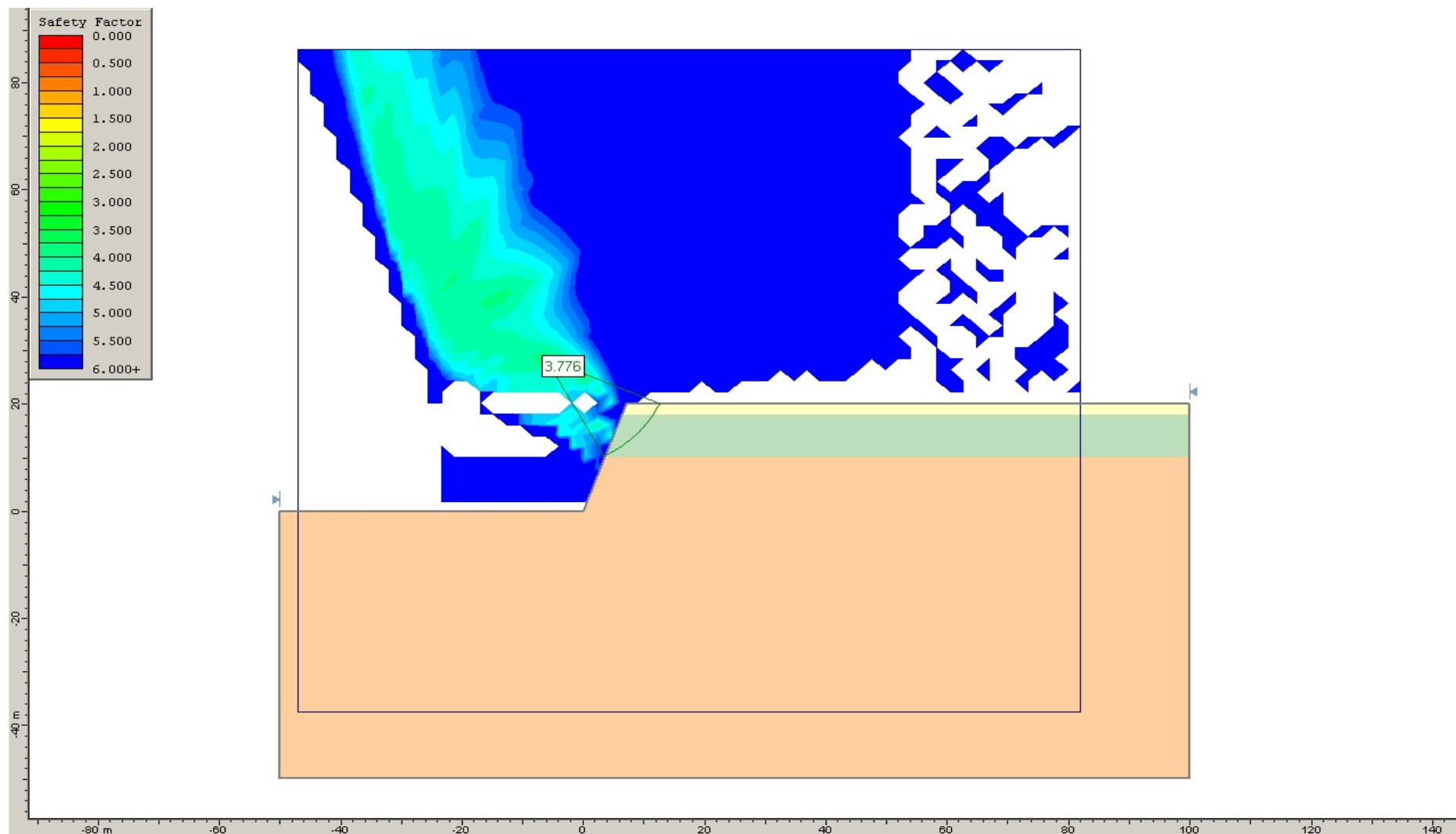
Ανάλυση 3 Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.05$)



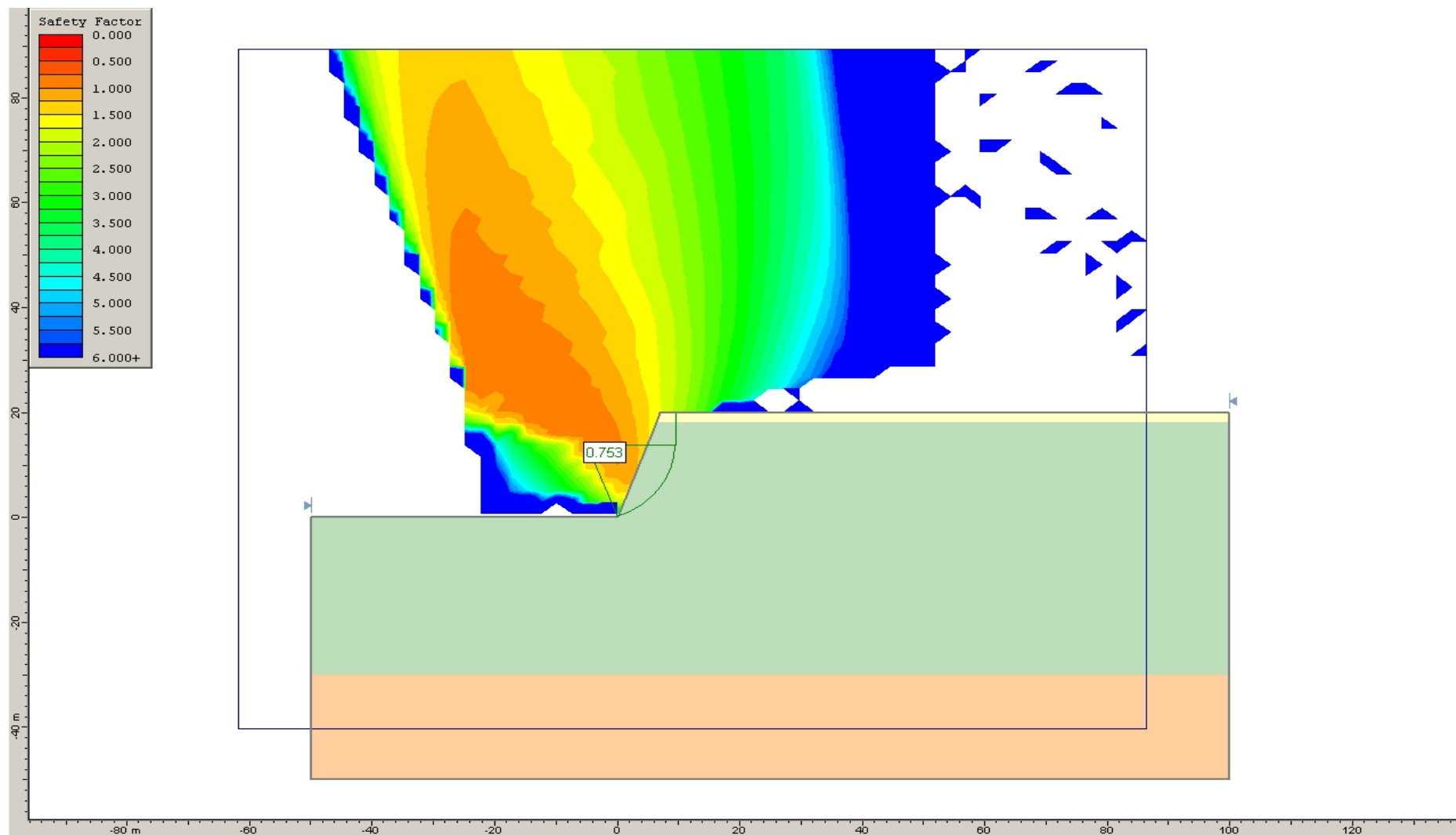
Ανάλυση 4. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.4$)



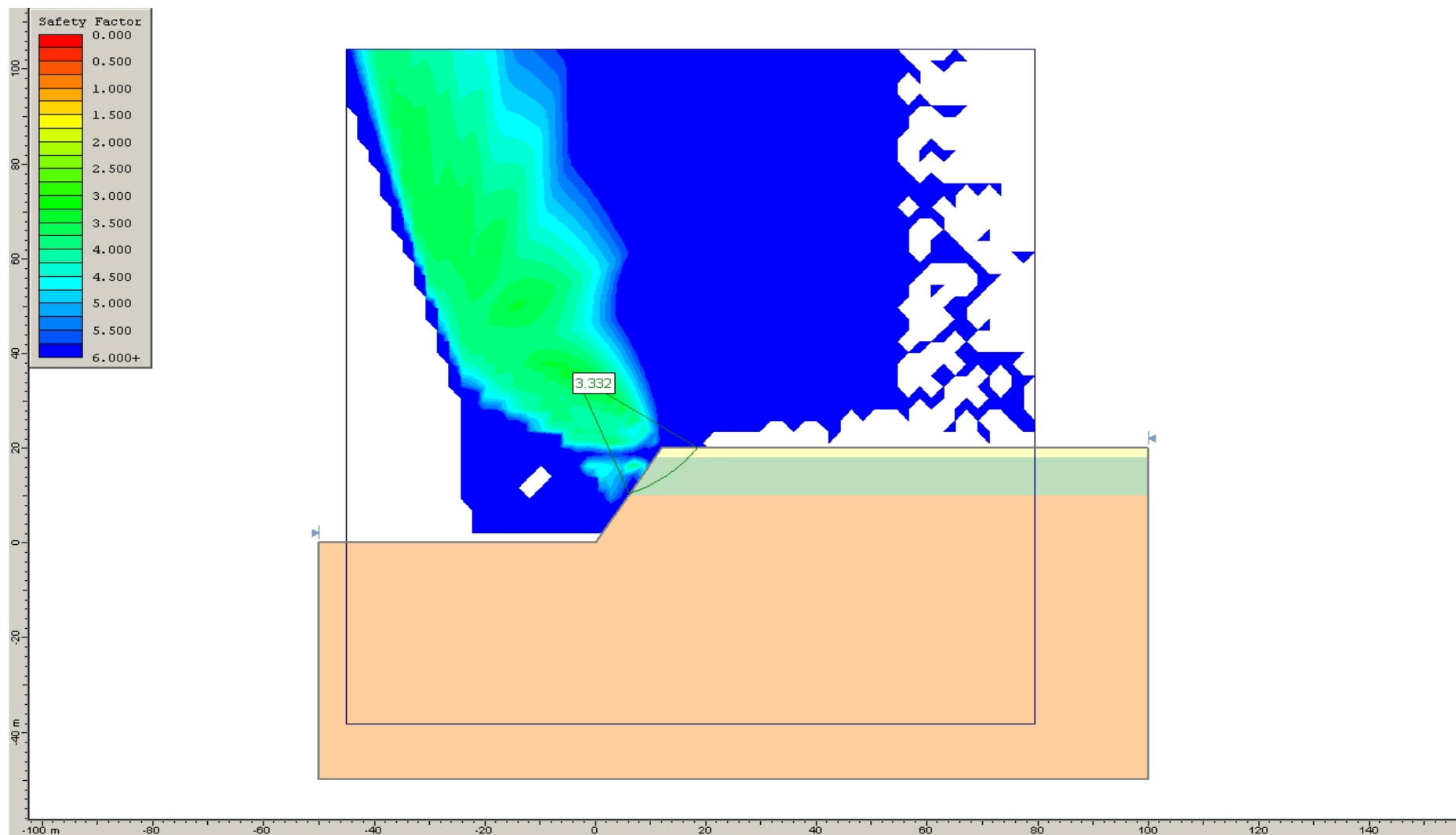
Ανάλυση 5. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.05$)



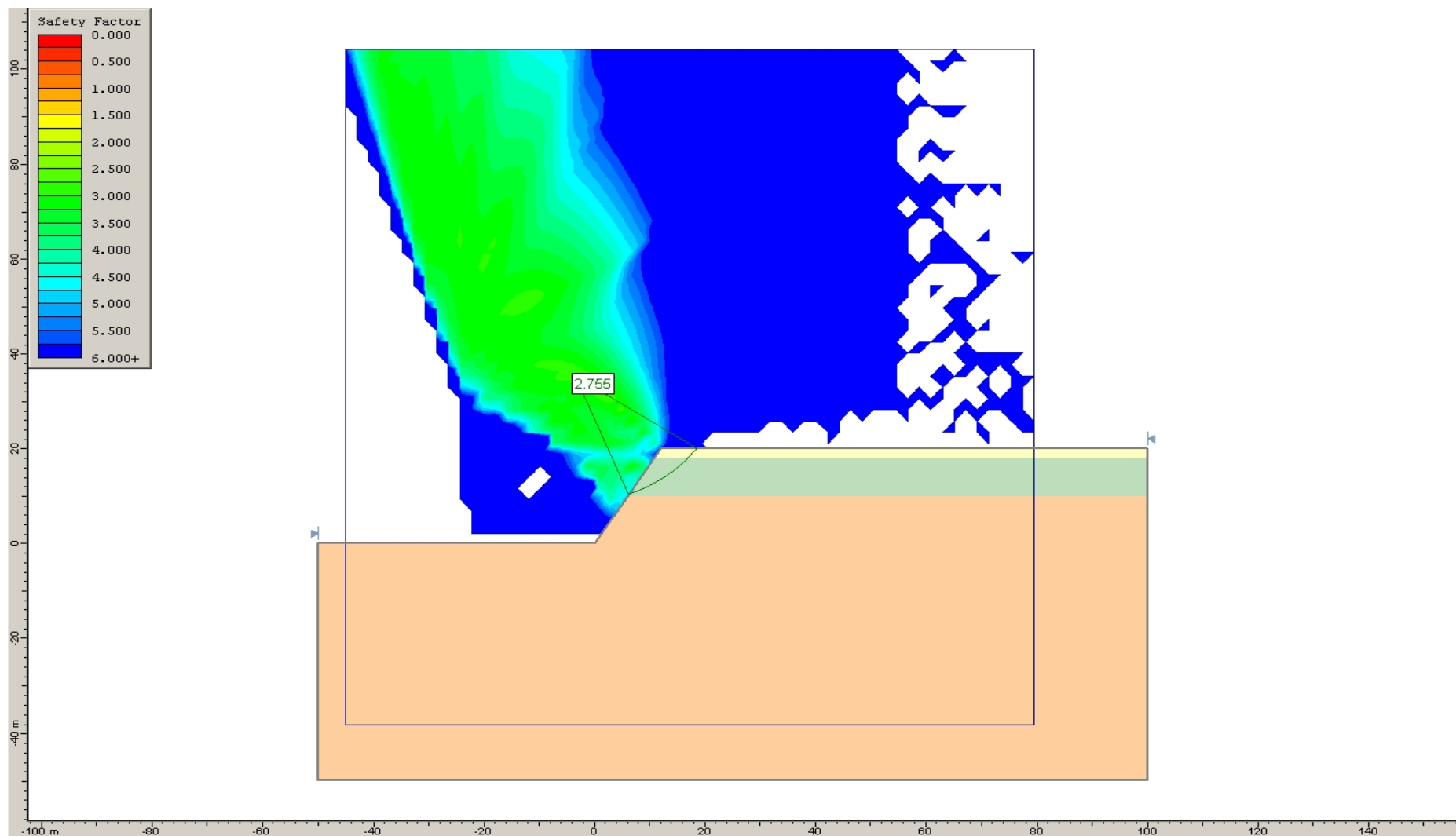
Ανάλυση 6. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.4$)



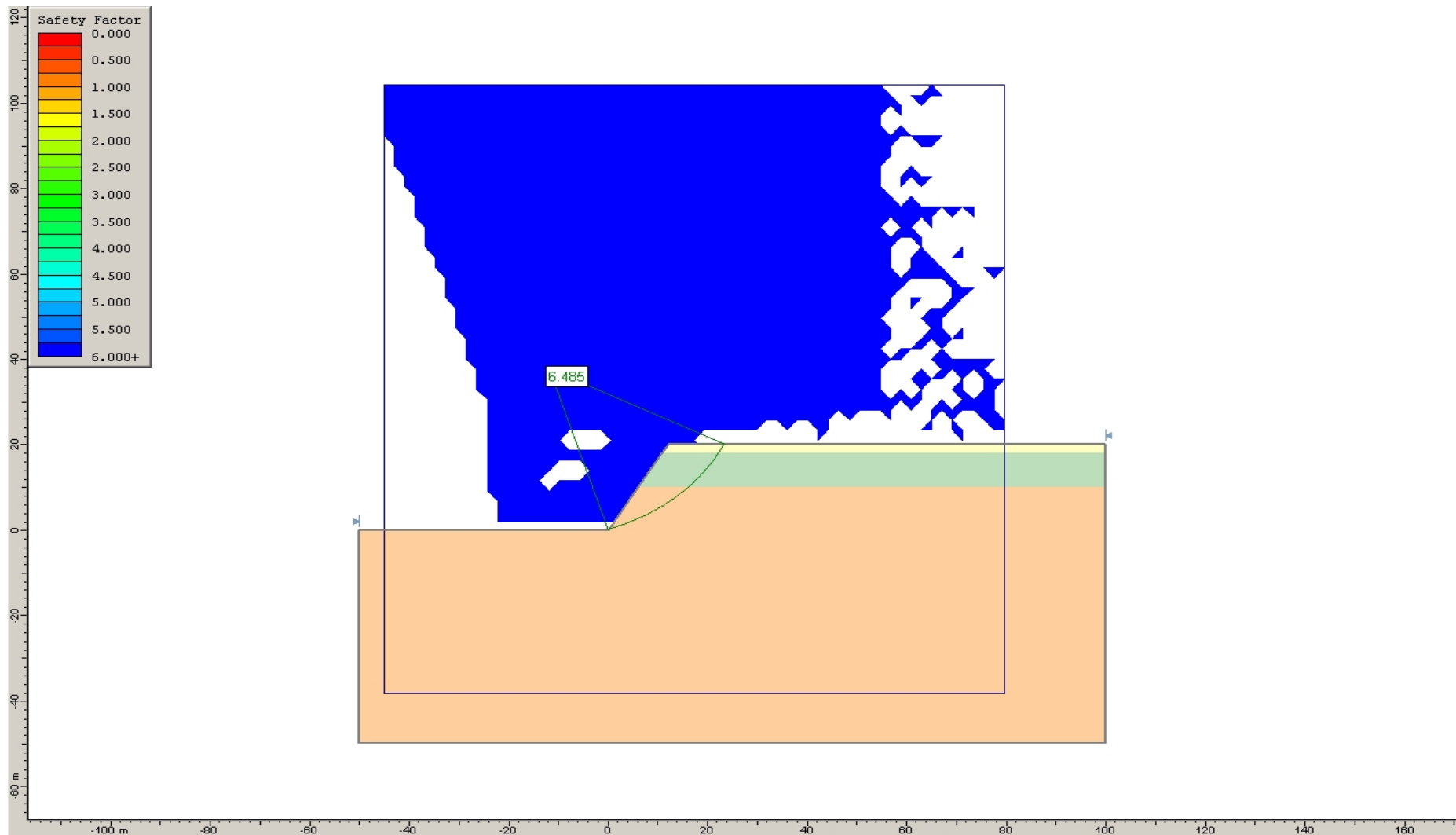
Ανάλυση 7. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλύολιθος, $R_u=0.2$)



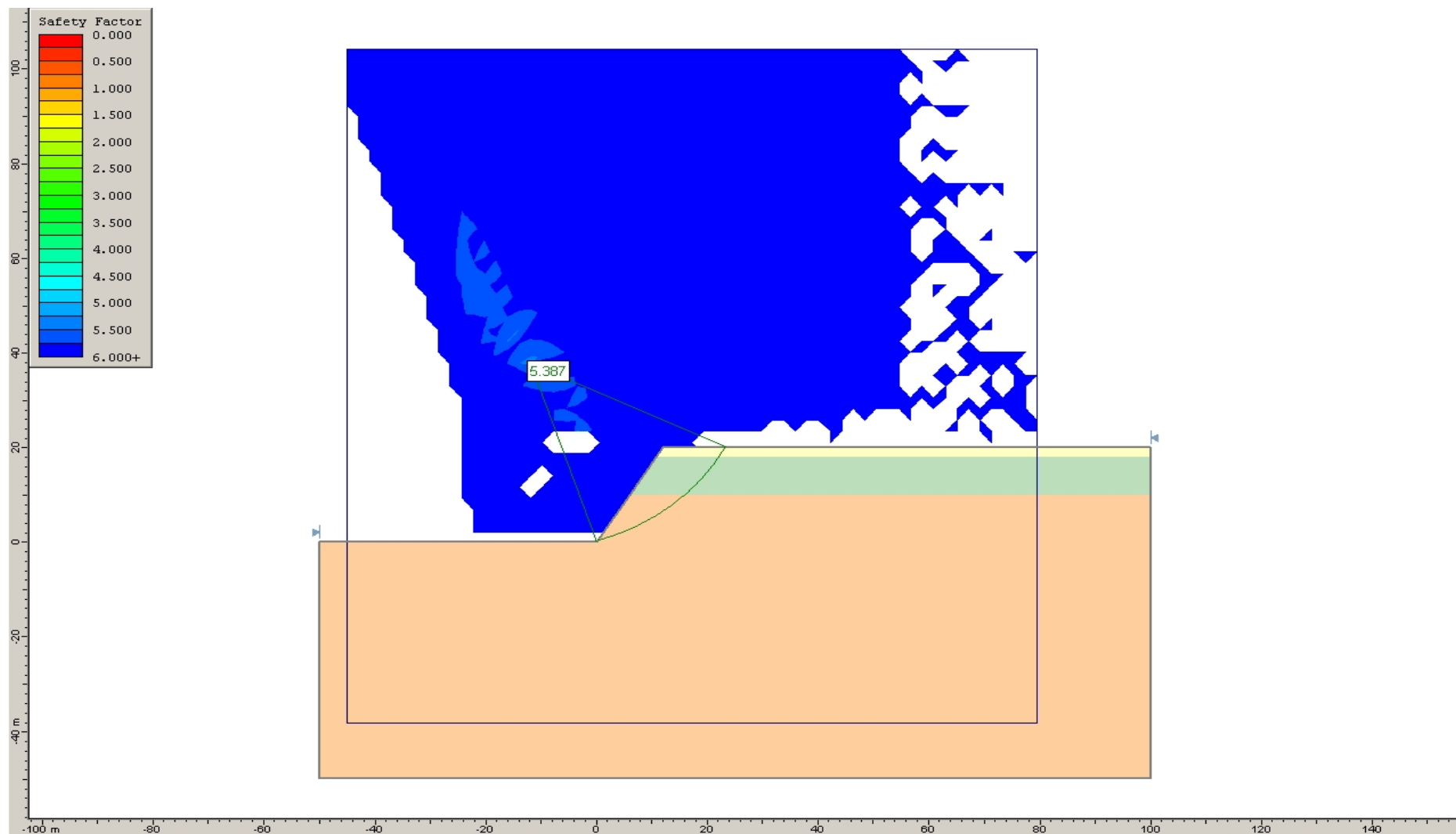
Ανάλυση 8. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.05$)



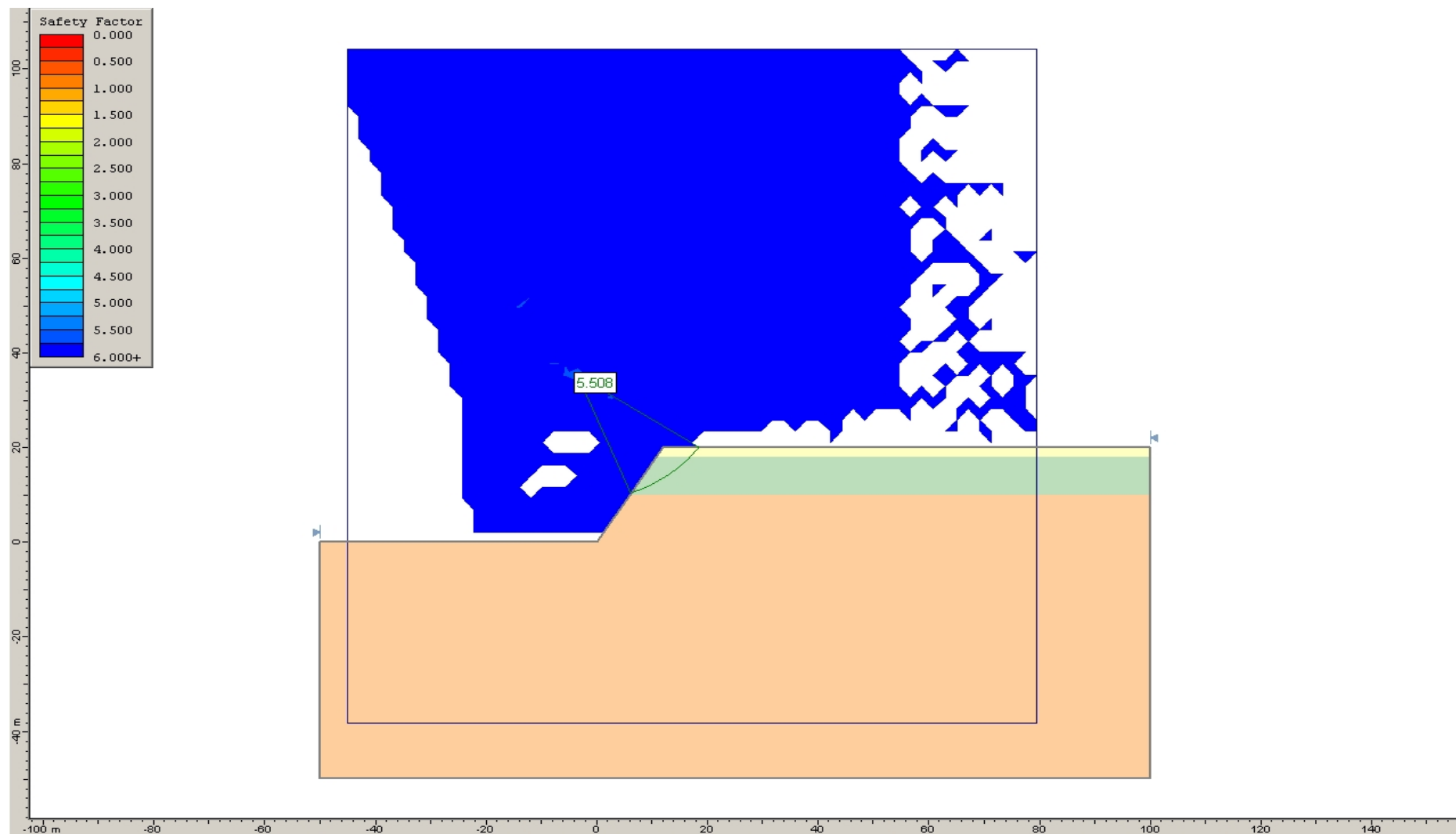
Ανάλυση 9. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.4$)



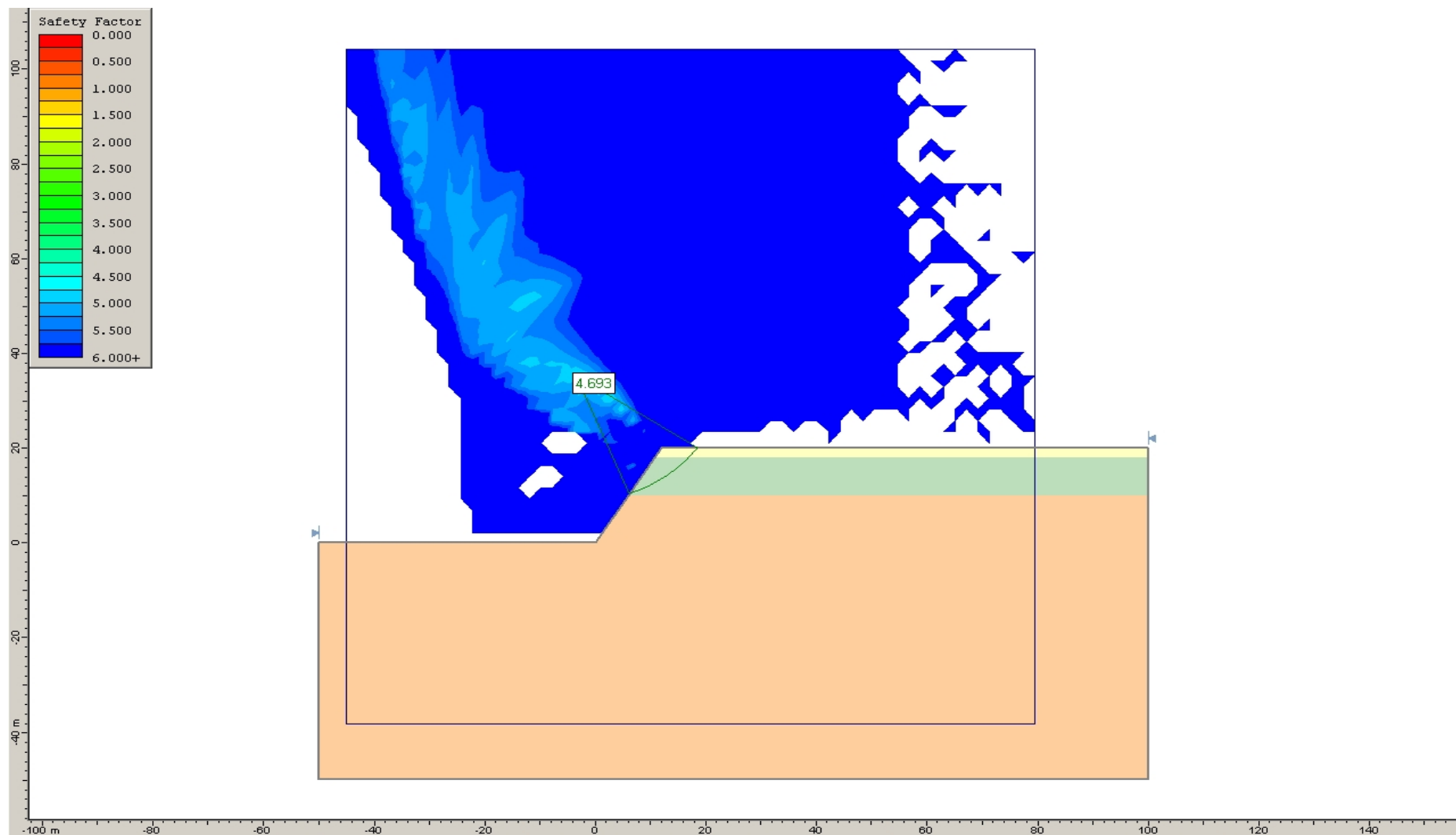
Ανάλυση 10. Ανάλυση ευστάθειας πρανού σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.05$)



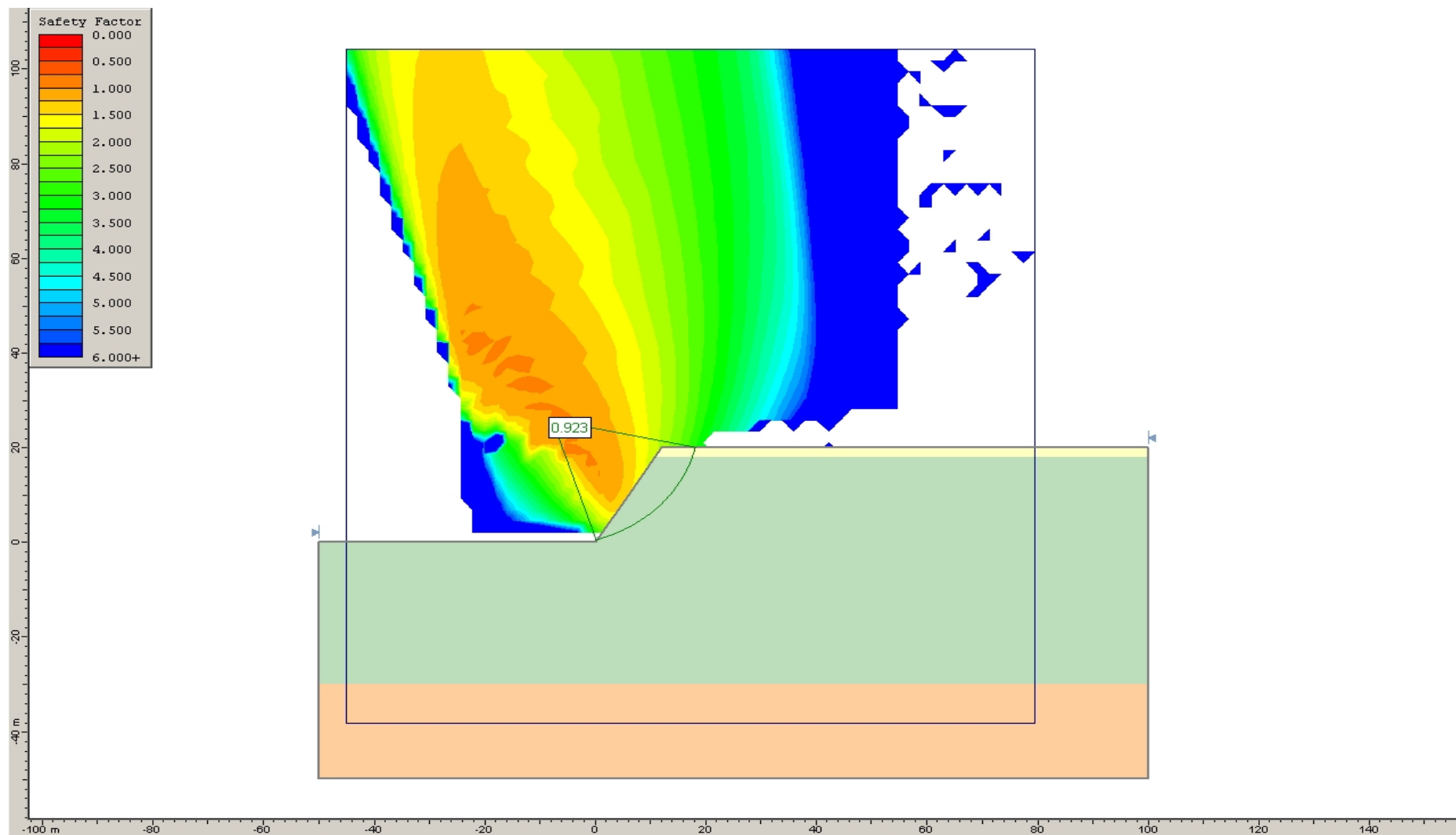
Ανάλυση 11. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.4$)



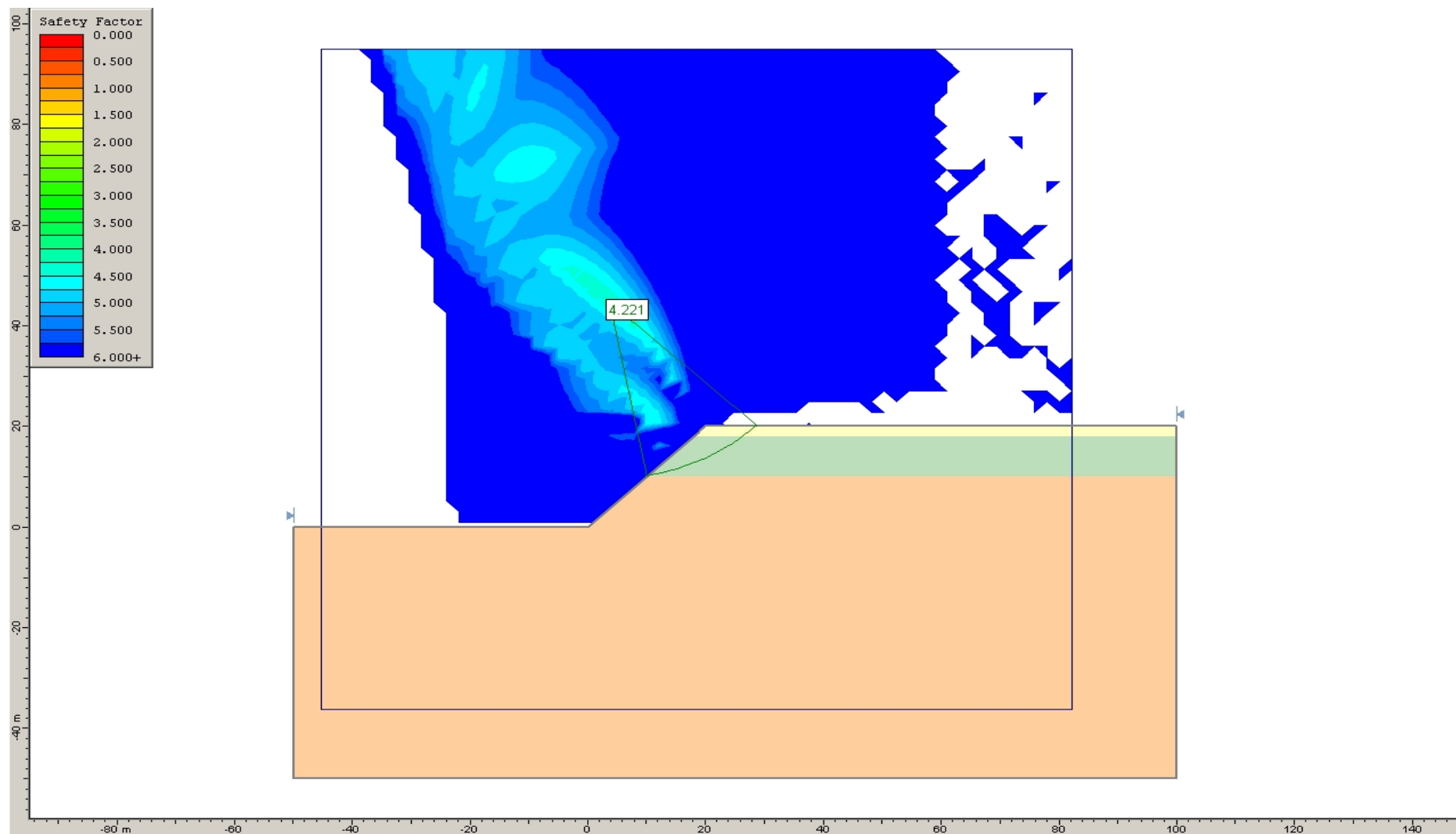
Ανάλυση 12. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.05$)



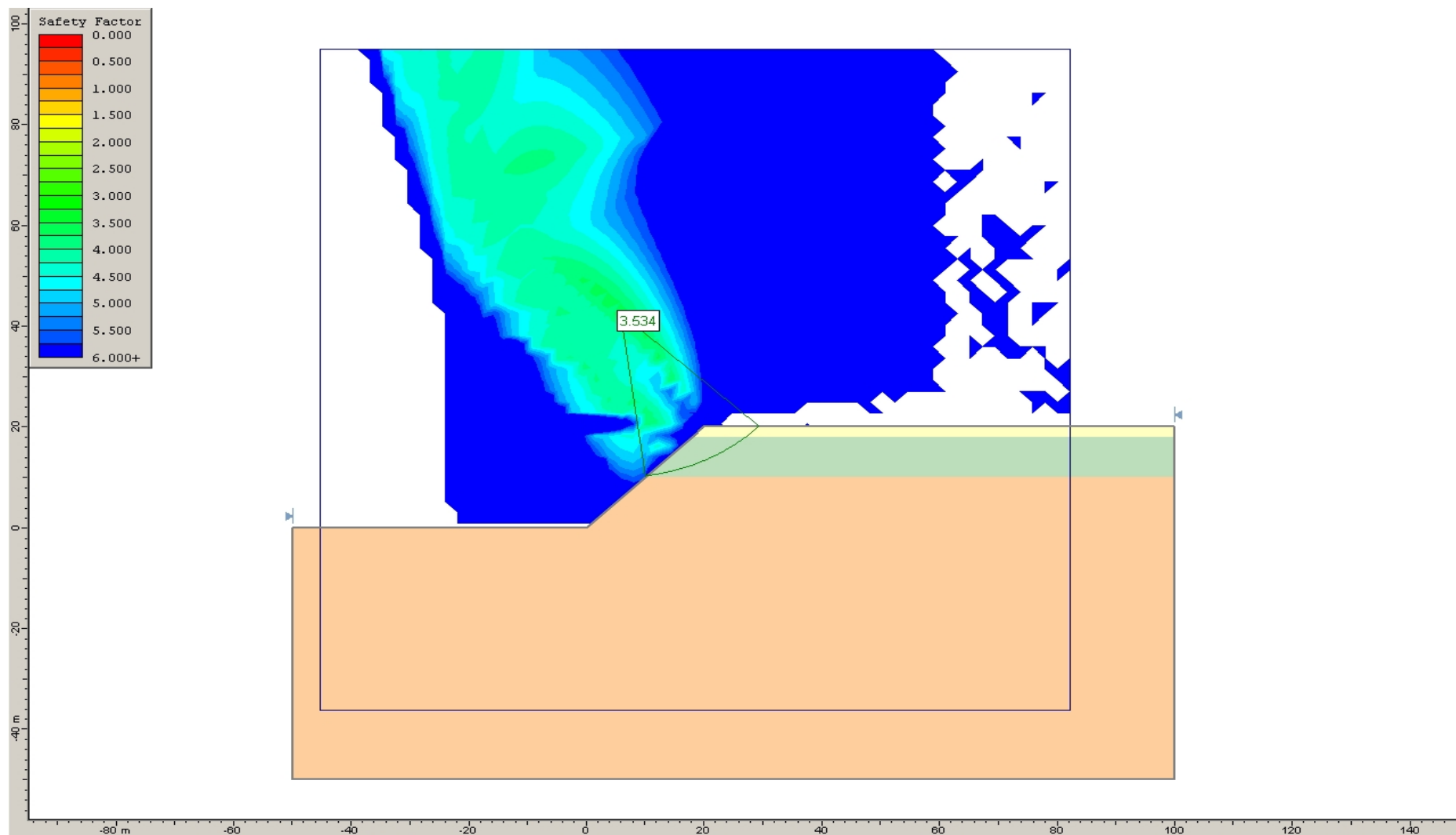
Ανάλυση 13. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Τύπος ΙΙΙ, $R_u=0.4$)



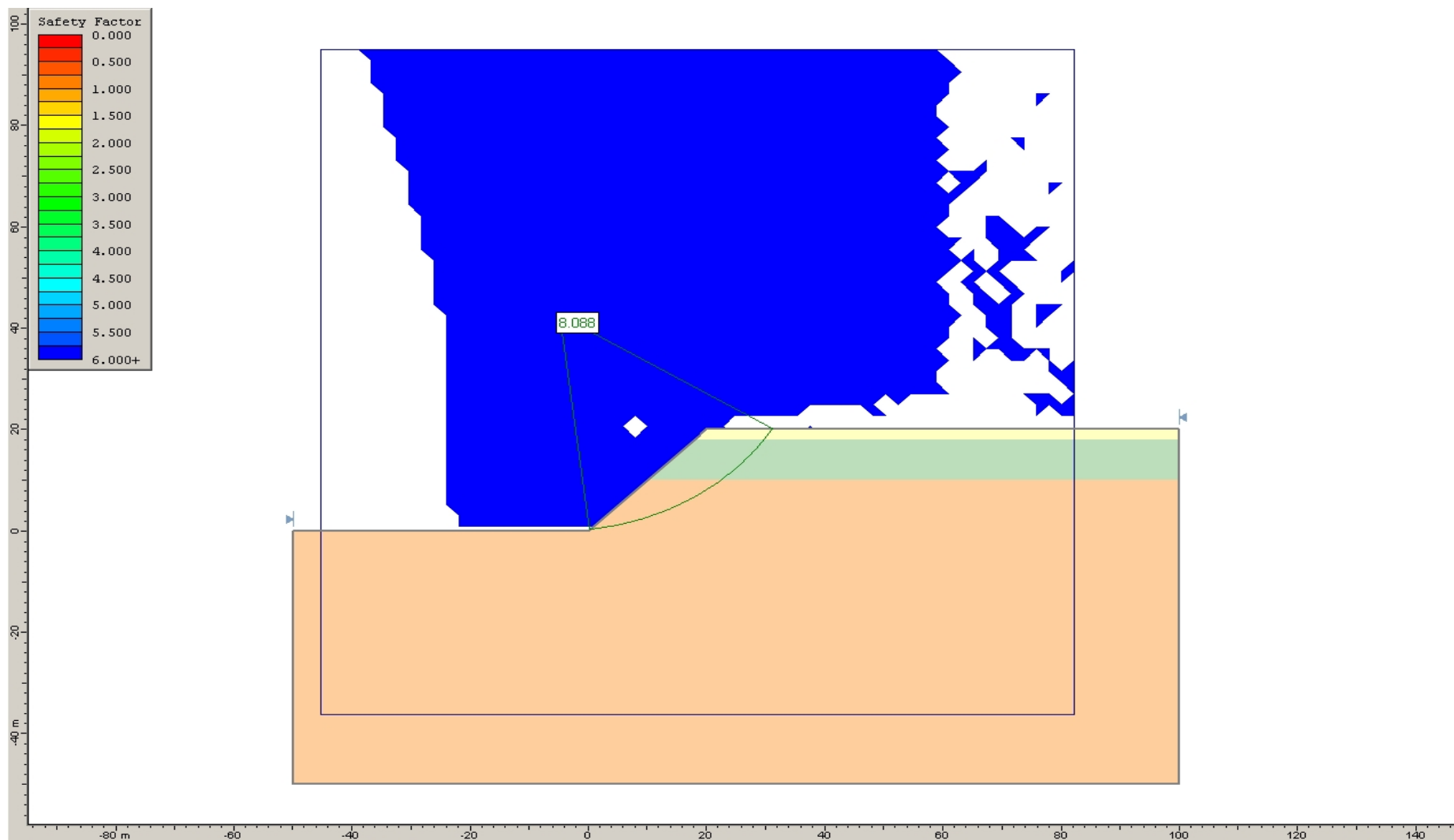
Ανάλυση 14. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλύολιθος, $R_u=0.2$)



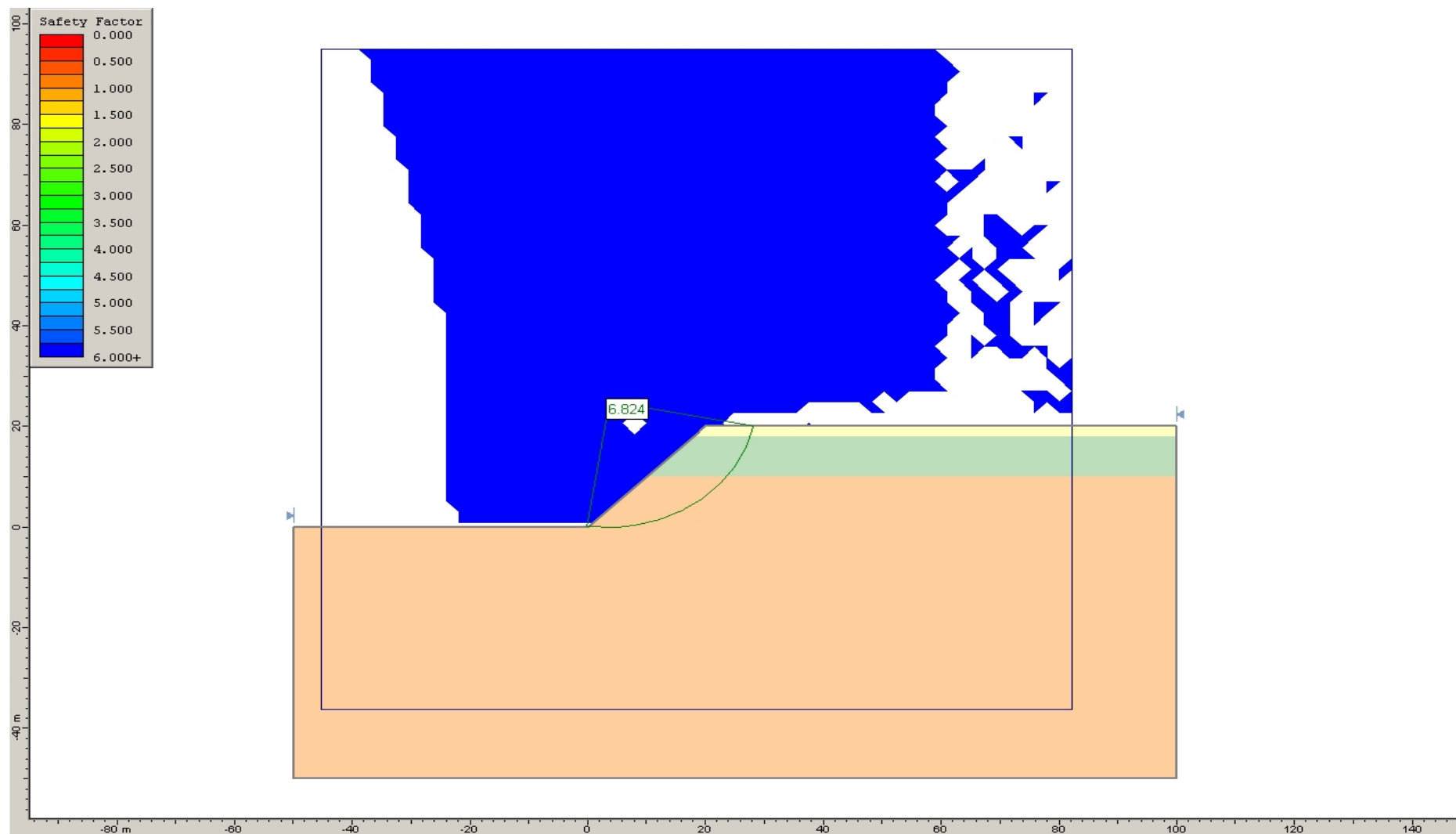
Ανάλυση 15. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.05$)



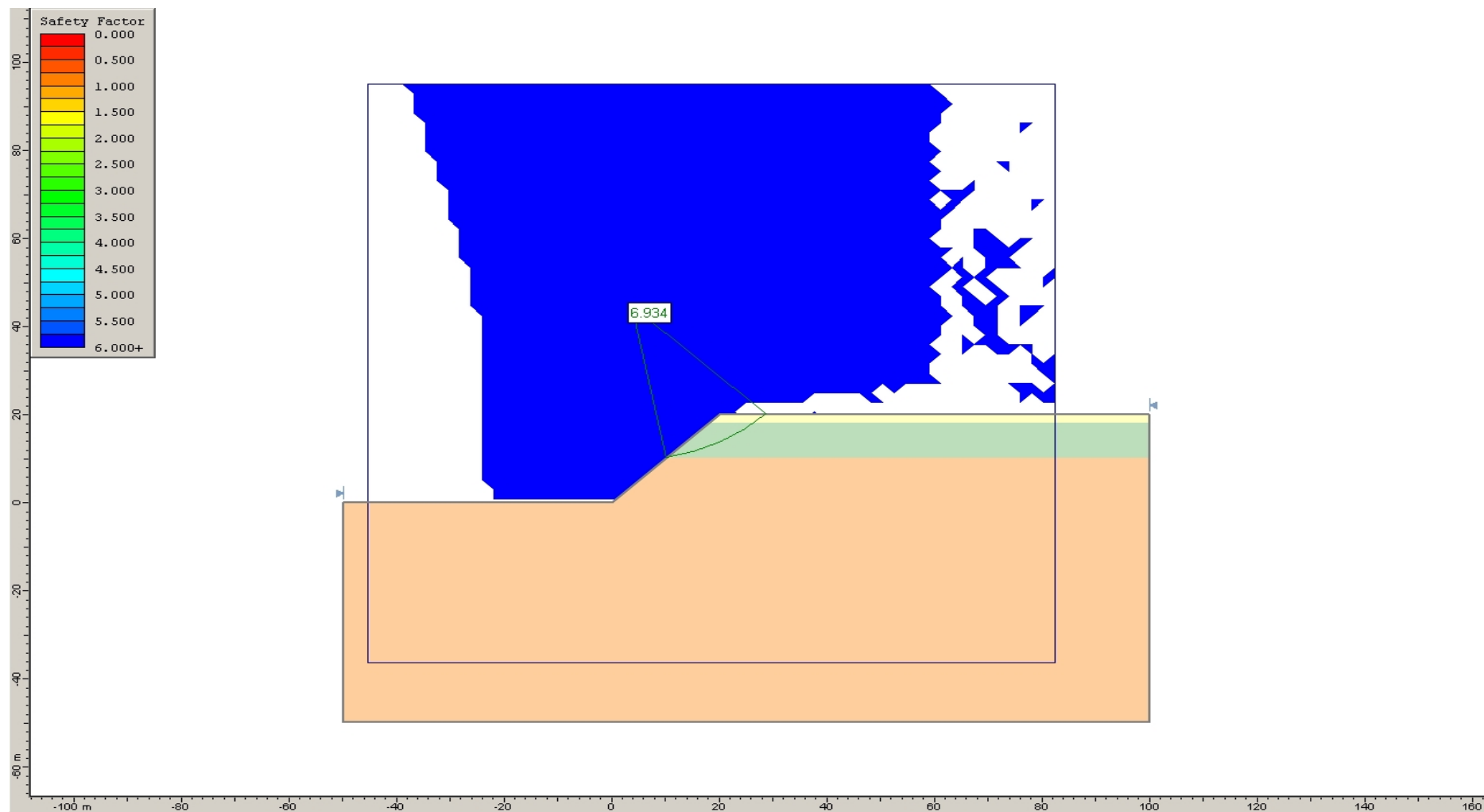
Ανάλυση 16. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.4$)



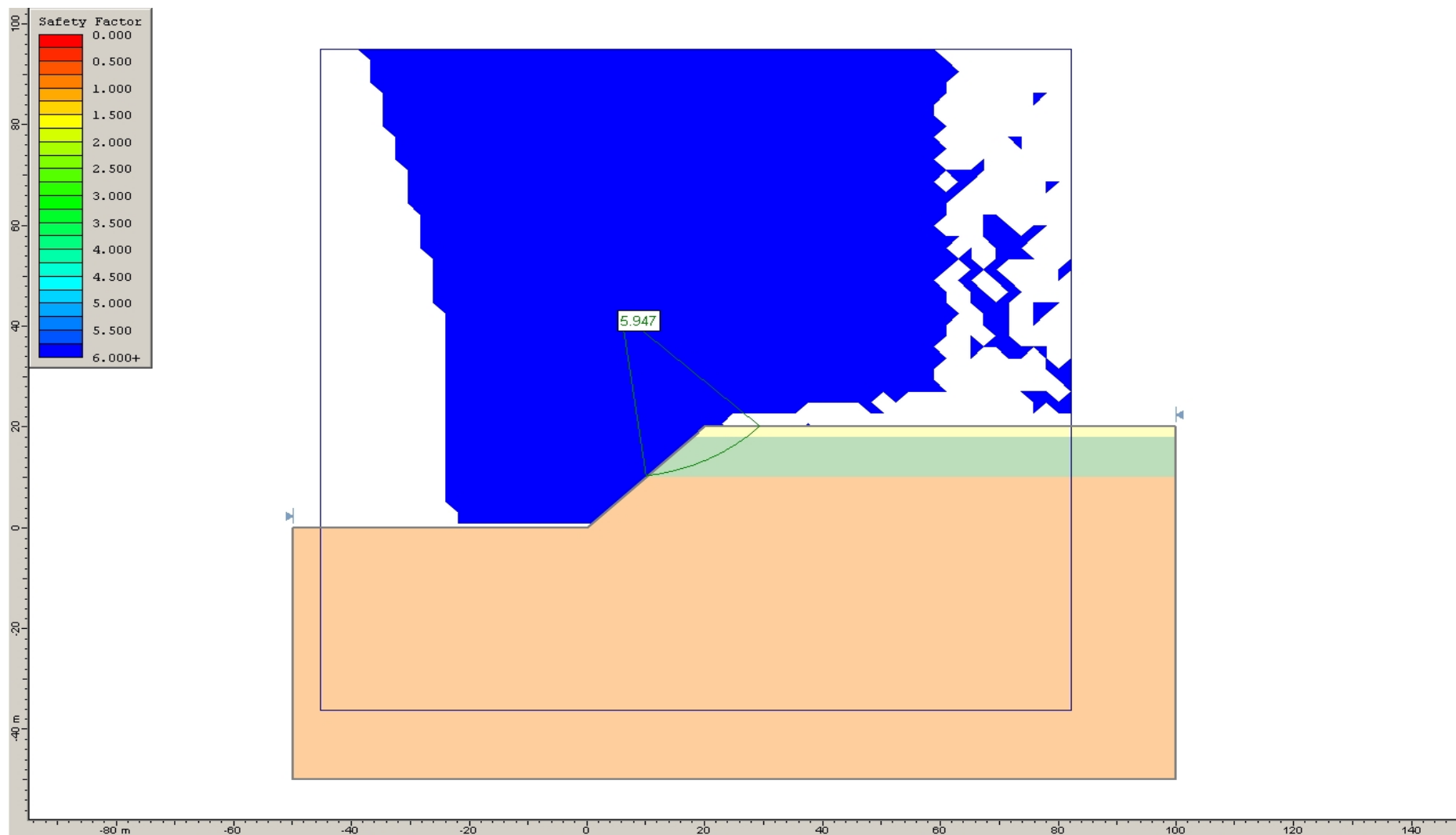
Ανάλυση 17. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.05$)



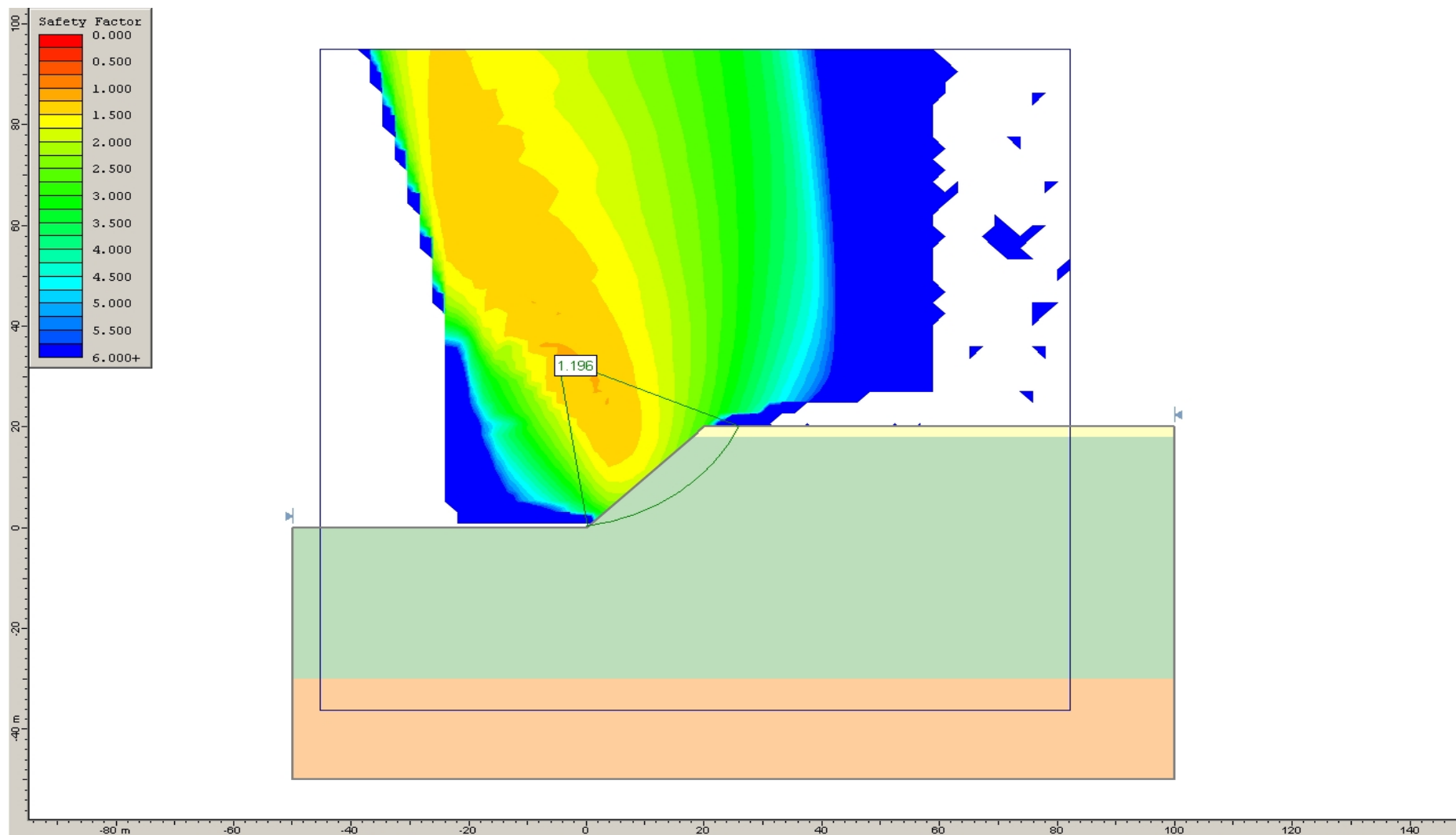
Ανάλυση 18. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.4$)



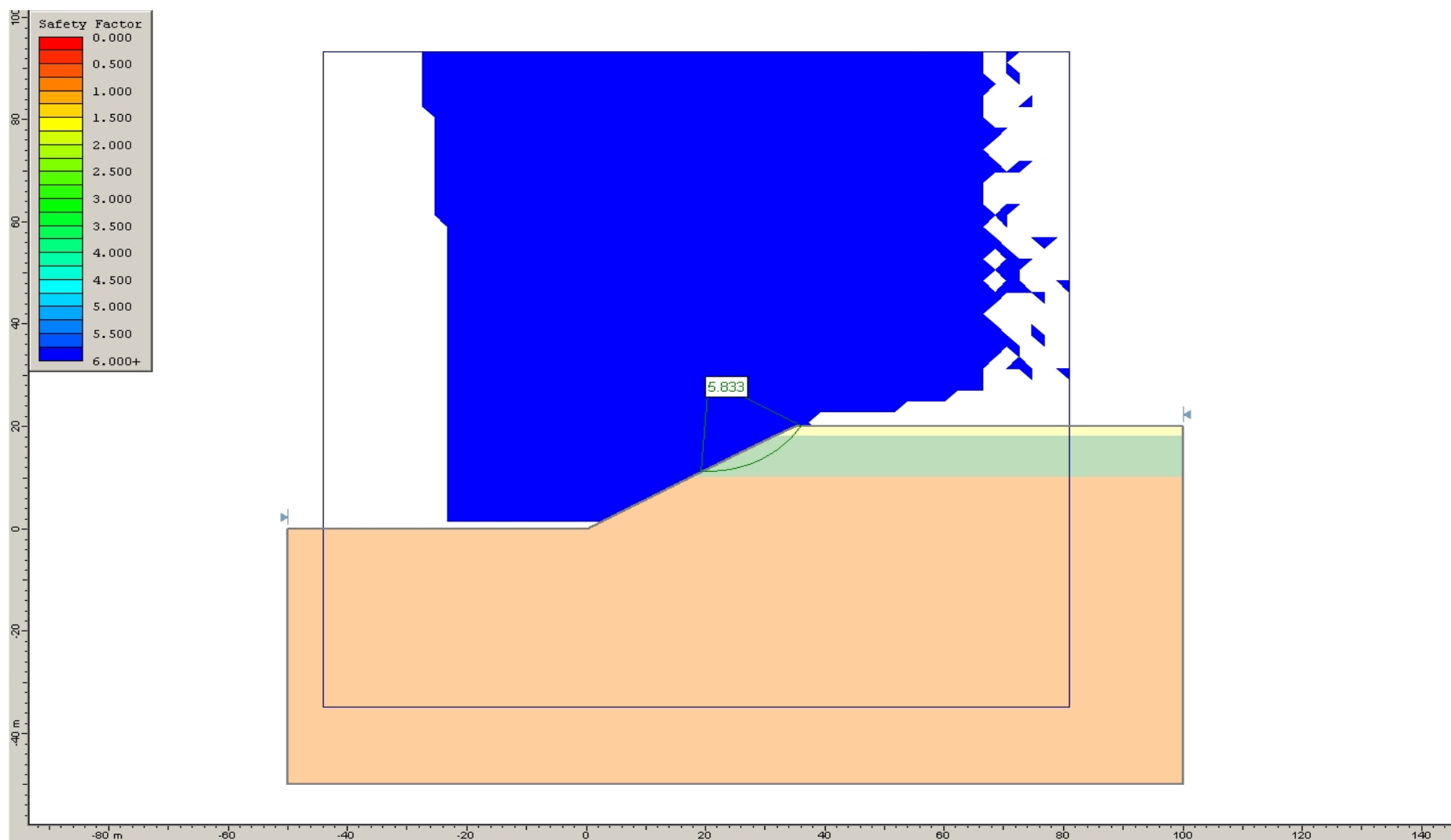
Ανάλυση 19. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος ΙΙΙ, $R_u=0.05$)



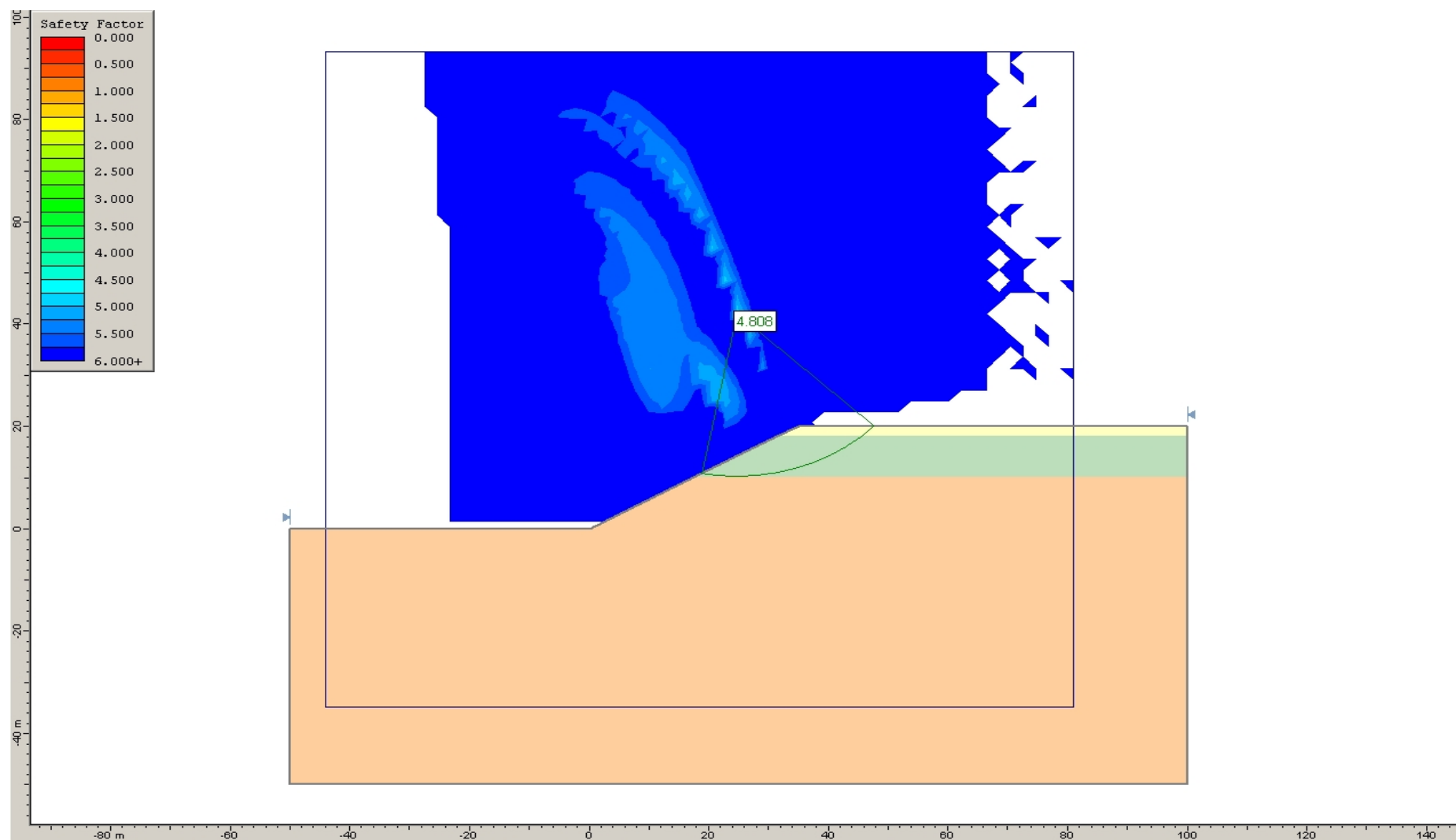
Ανάλυση 20. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.4$)



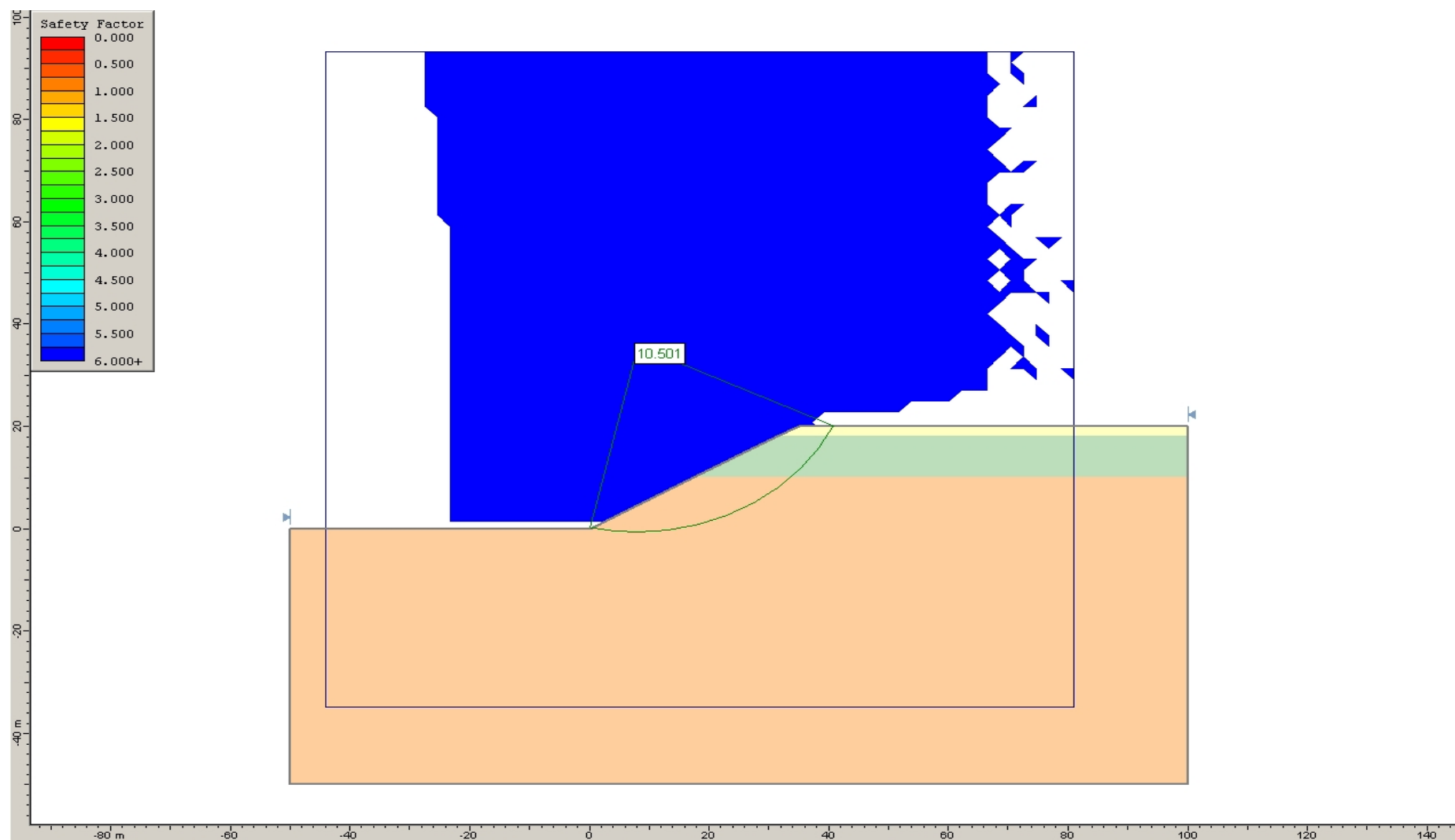
Ανάλυση 21. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Διαταραγμένος ιλύολιθος, $R_u=0.2$)



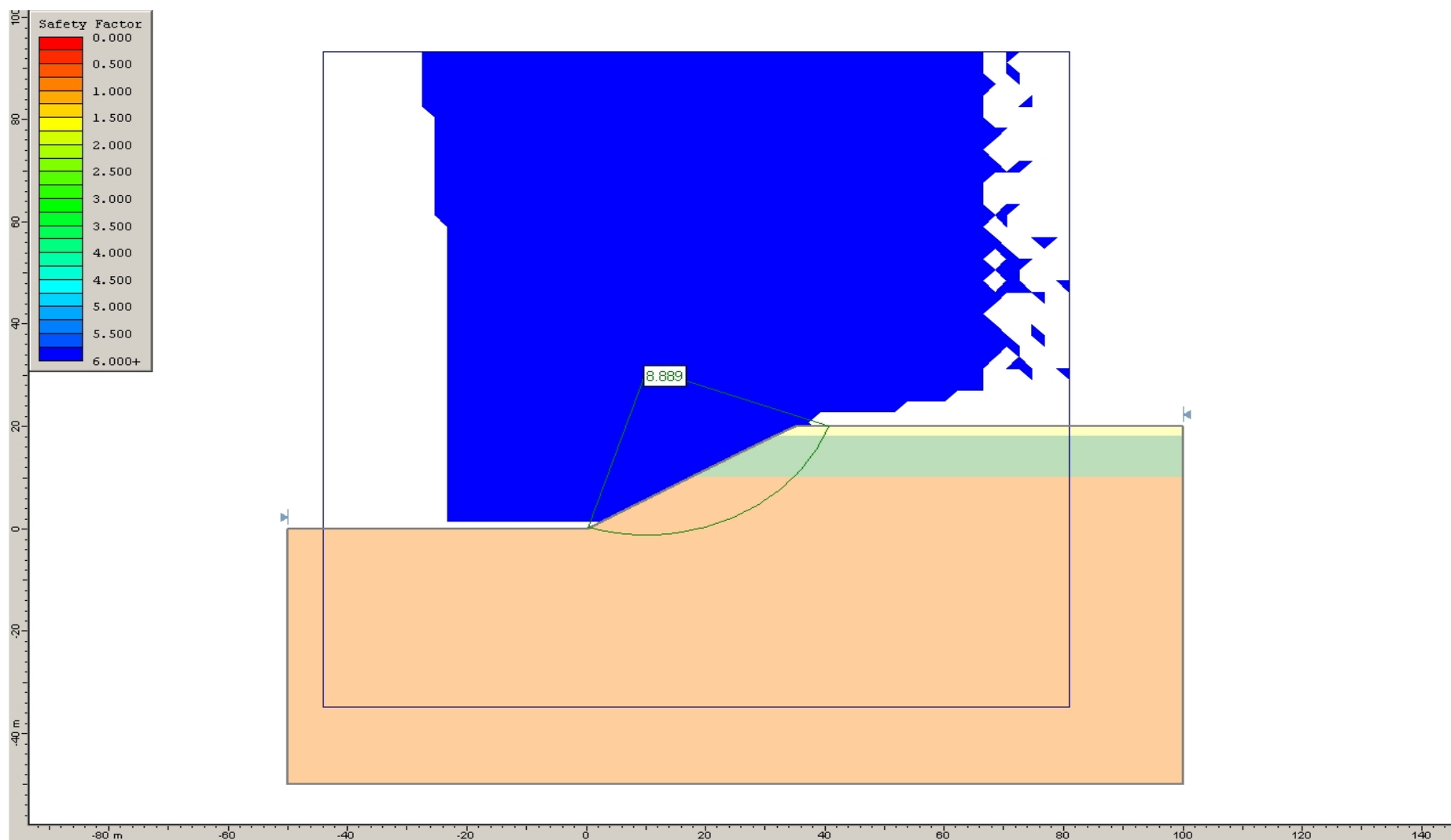
Ανάλυση 22. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.05$)



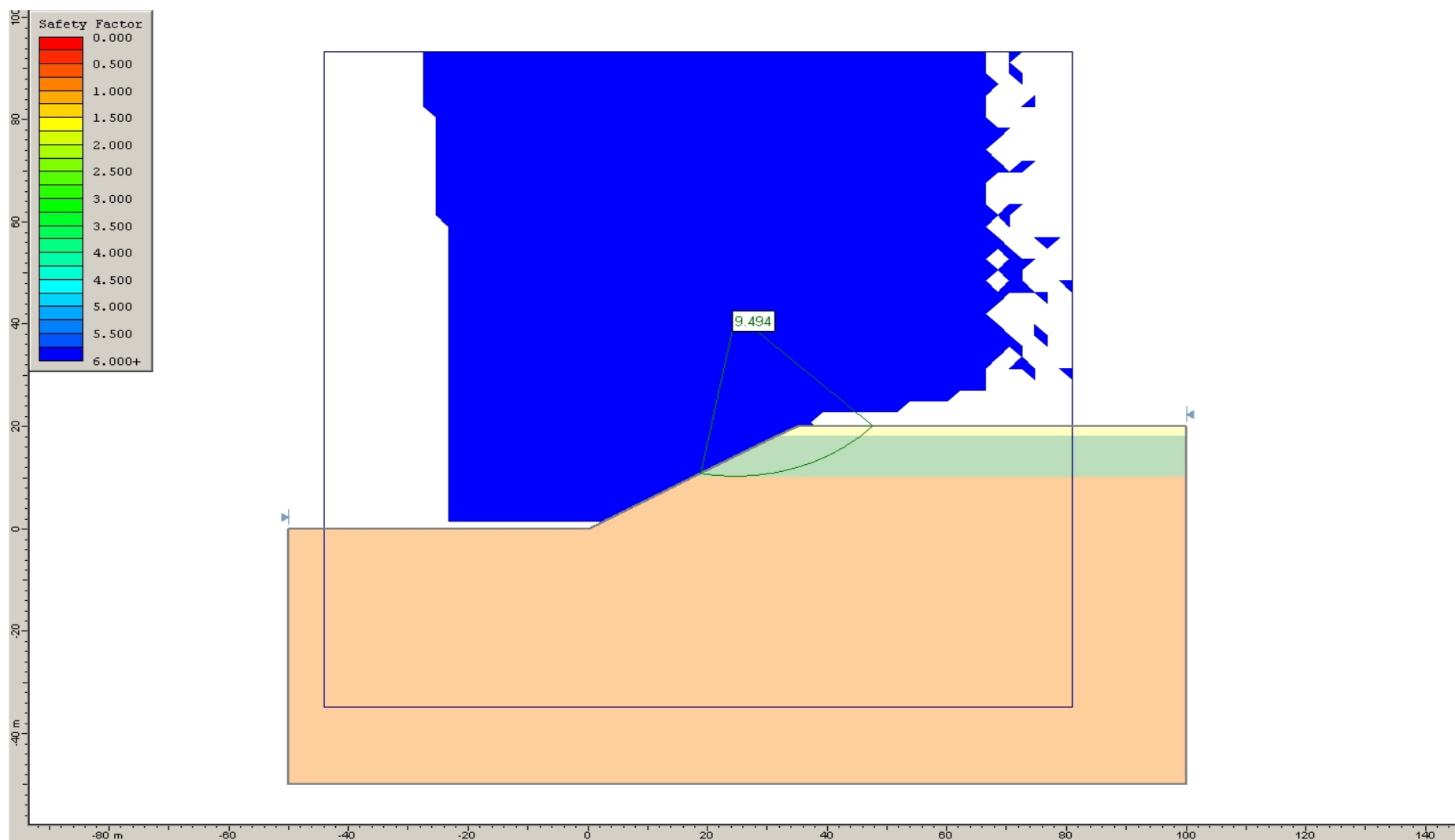
Ανάλυση 23. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος V, $R_u=0.4$)



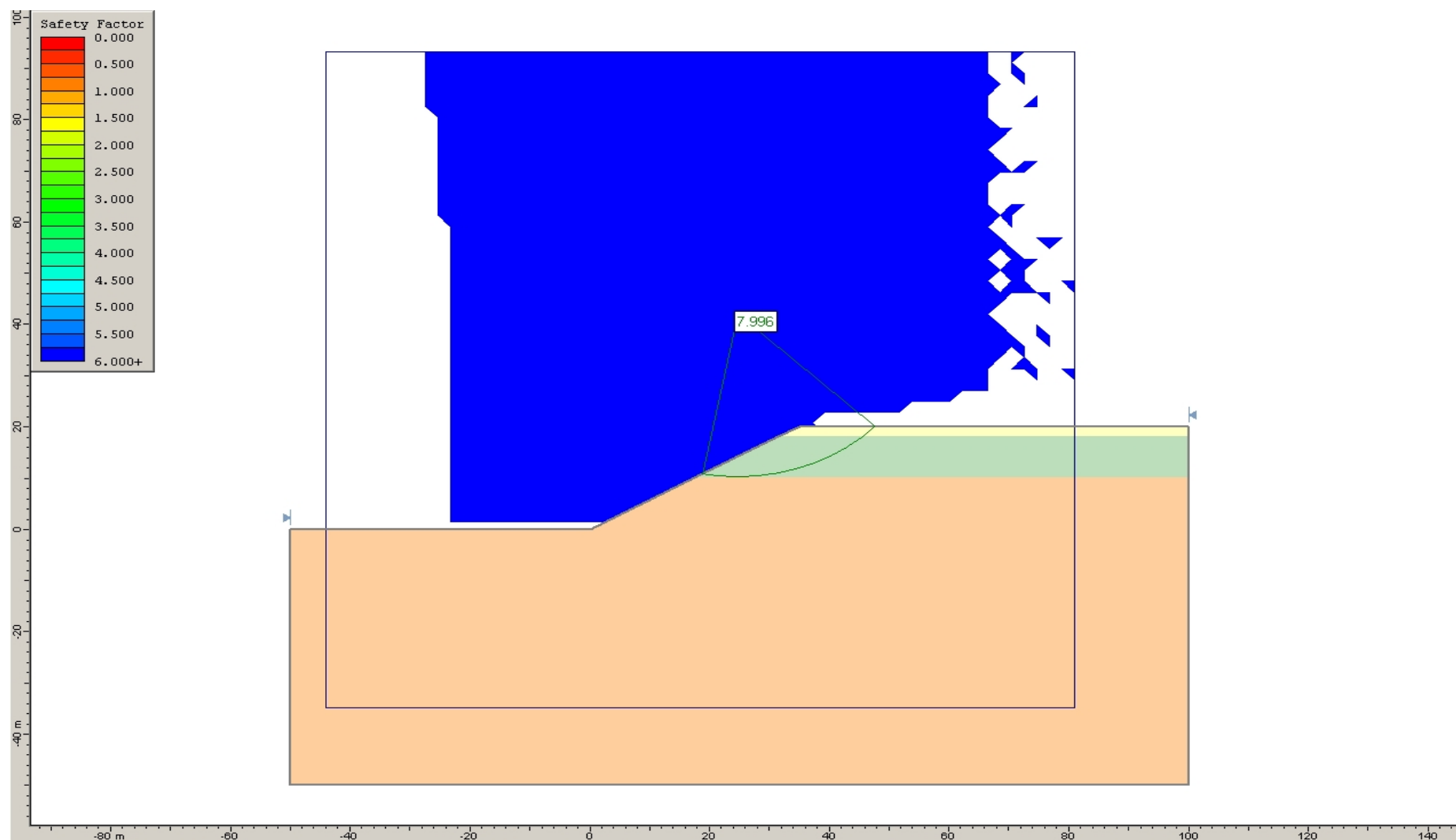
Ανάλυση 24. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.05$)



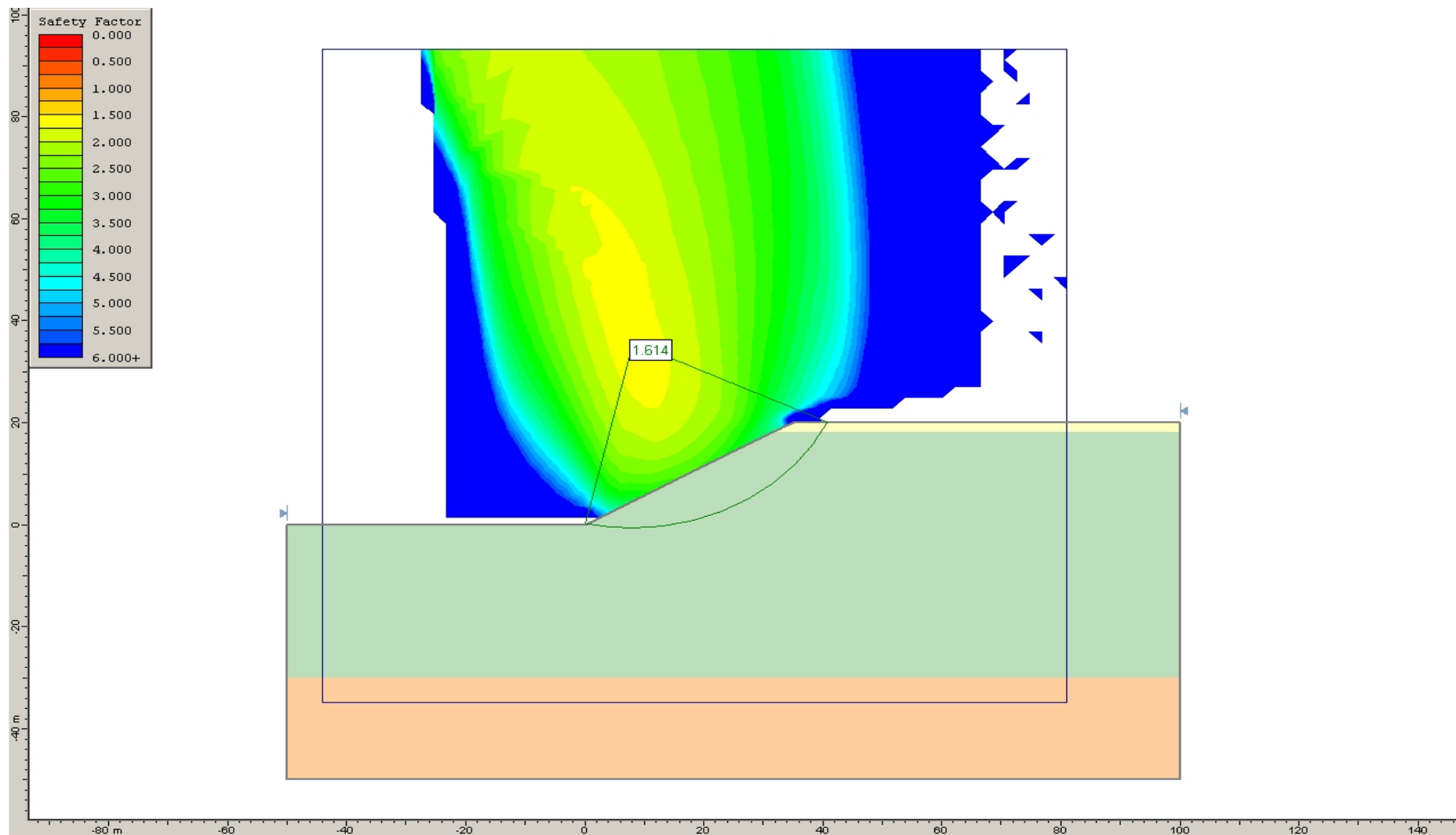
Ανάλυση 25. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος II, $R_u=0.4$)



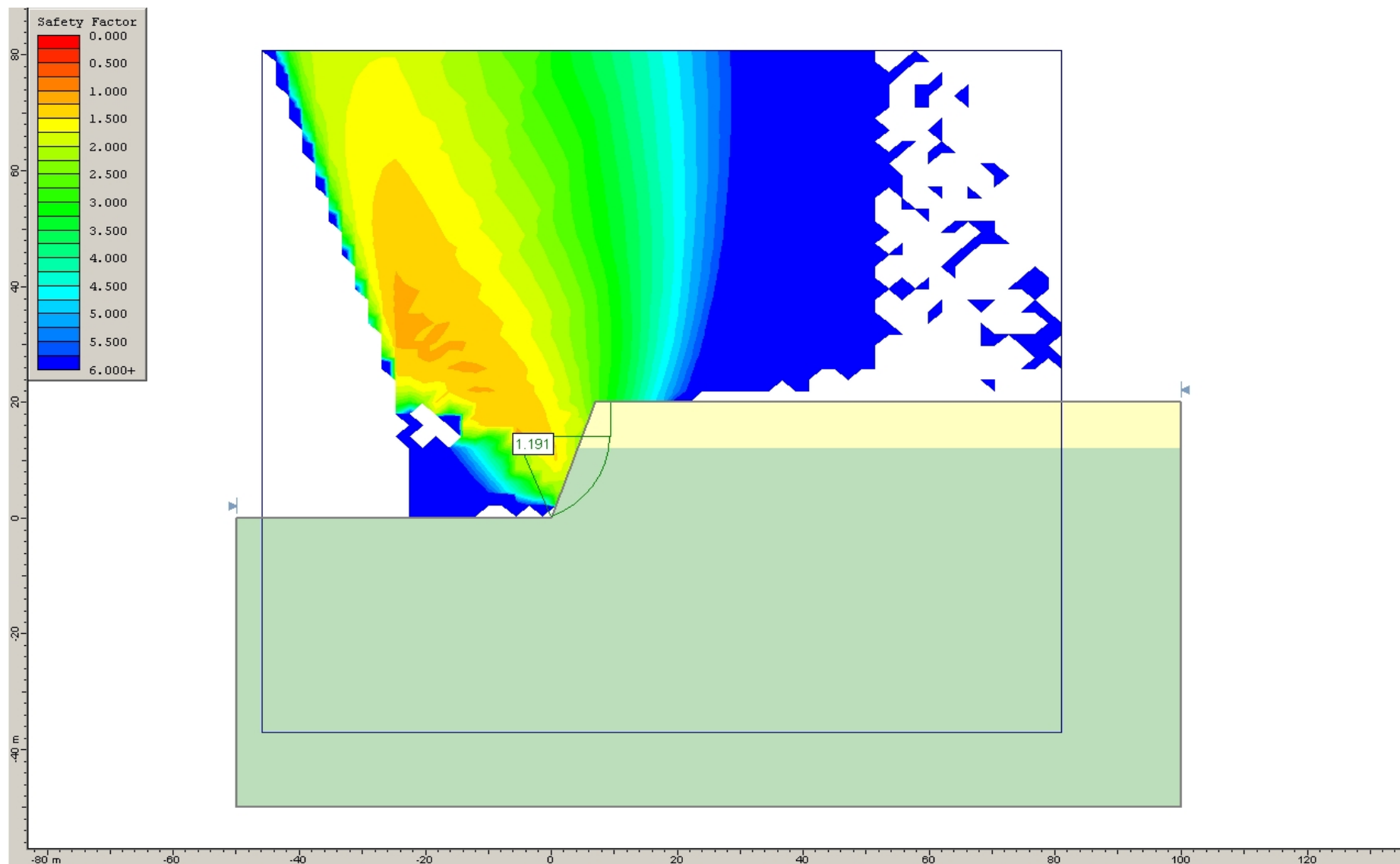
Ανάλυση 26. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.05$)



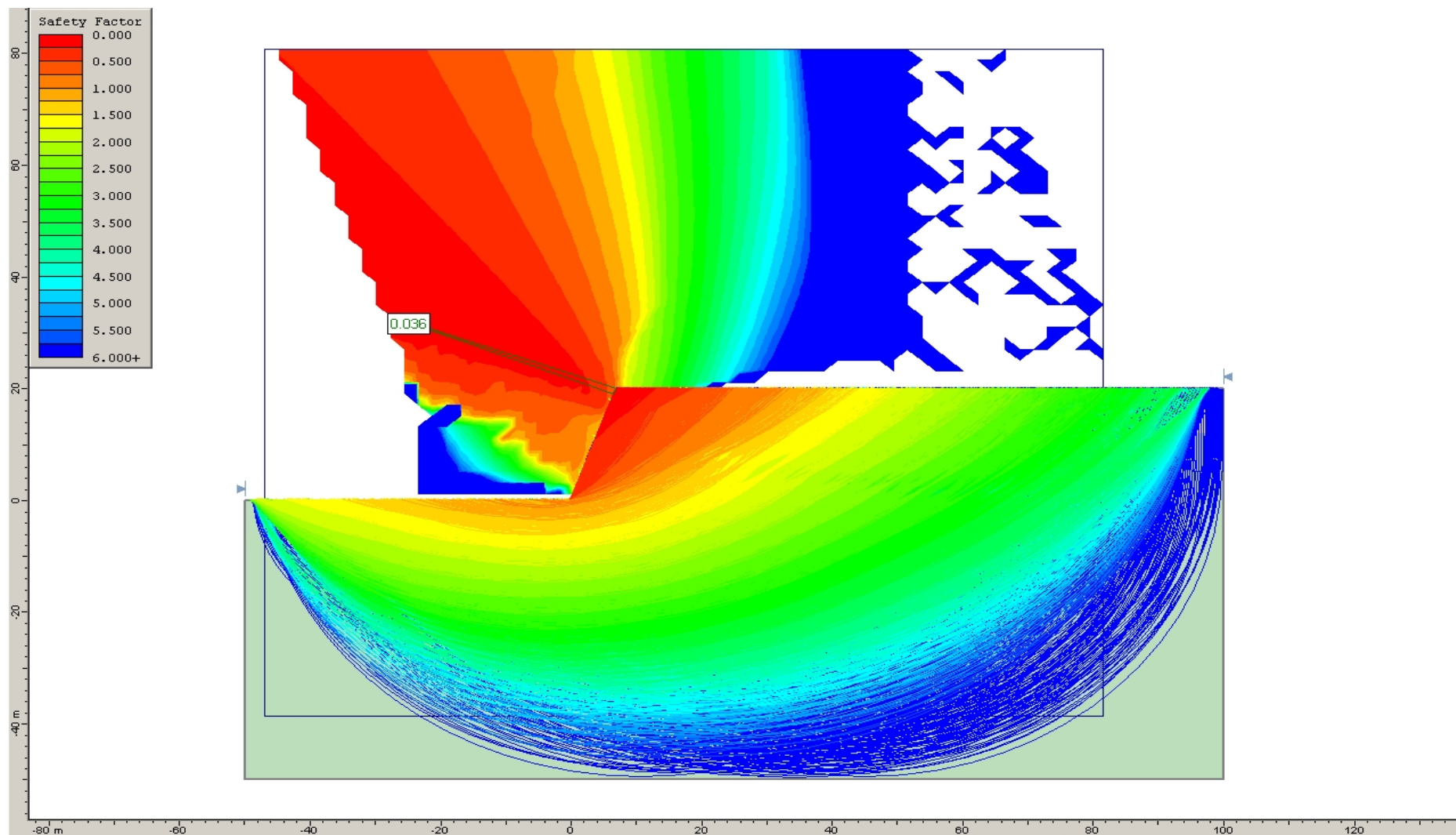
Ανάλυση 27. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Τύπος III, $R_u=0.4$)



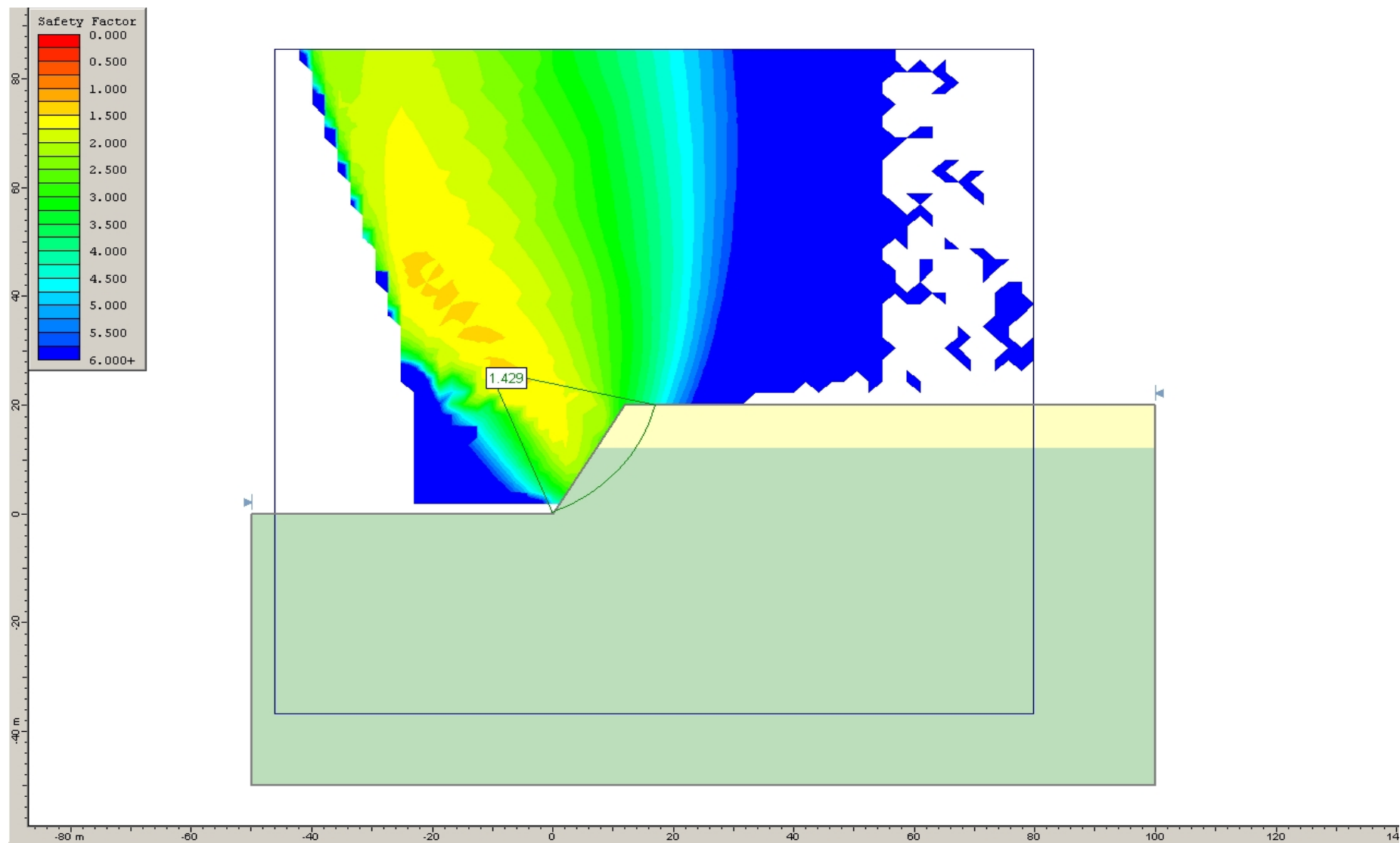
Ανάλυση 28. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Ασθενής ιλυόλιθος, $R_u=0.2$)



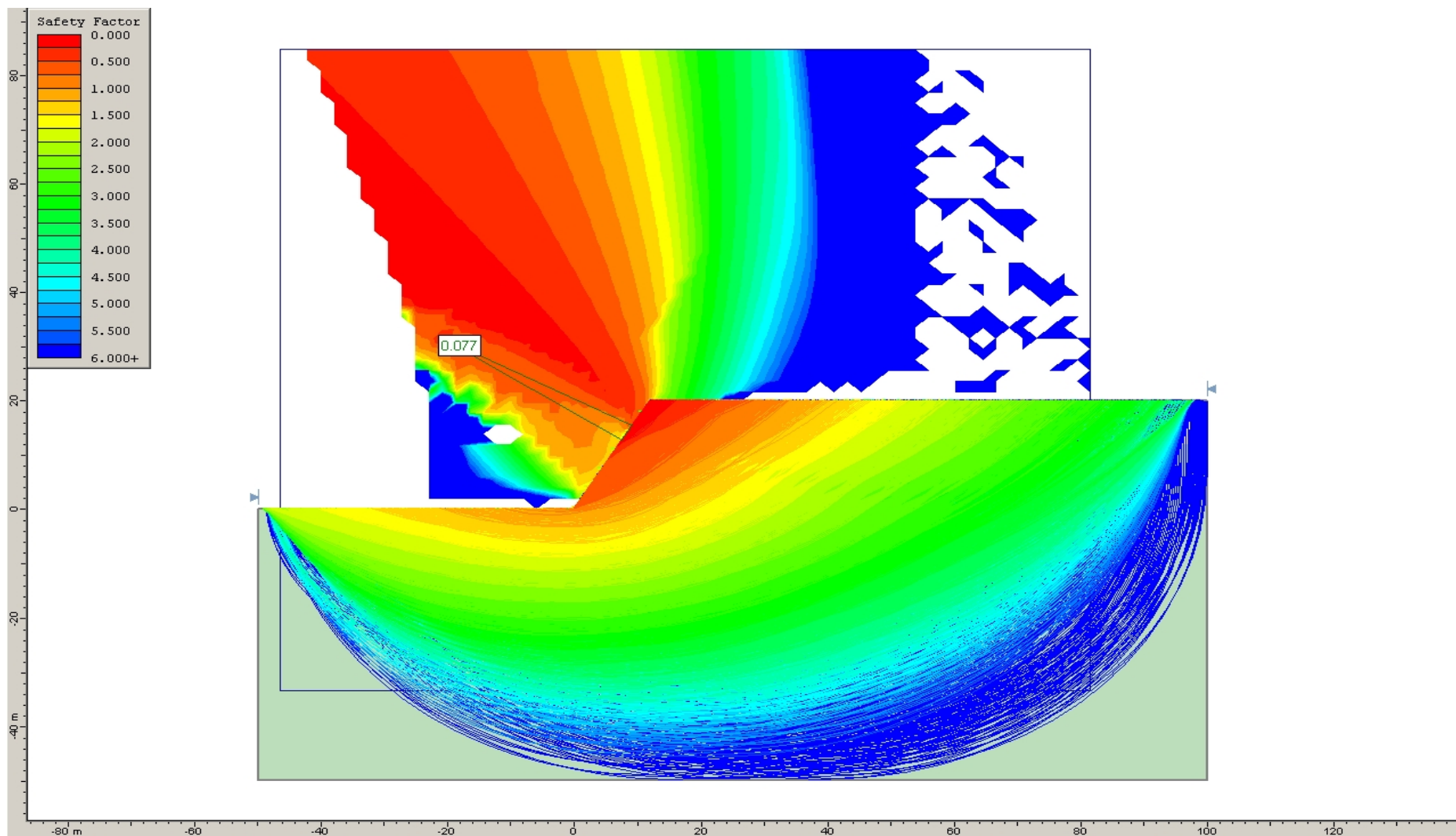
Ανάλυση 29. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.2$)



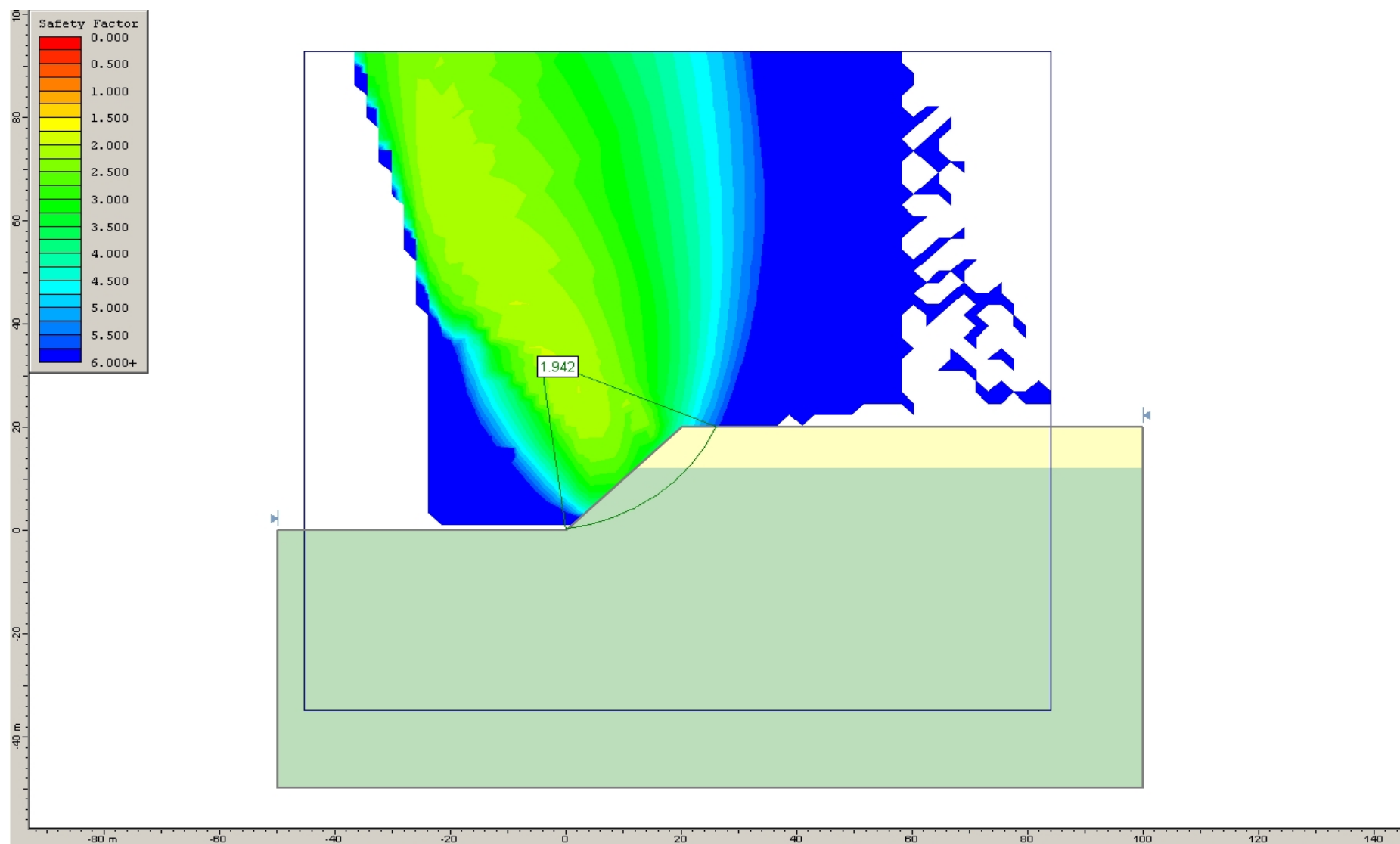
Ανάλυση 30. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Προϋπάρχον υλικό κατολίσθησης, $R_u=0.2$)



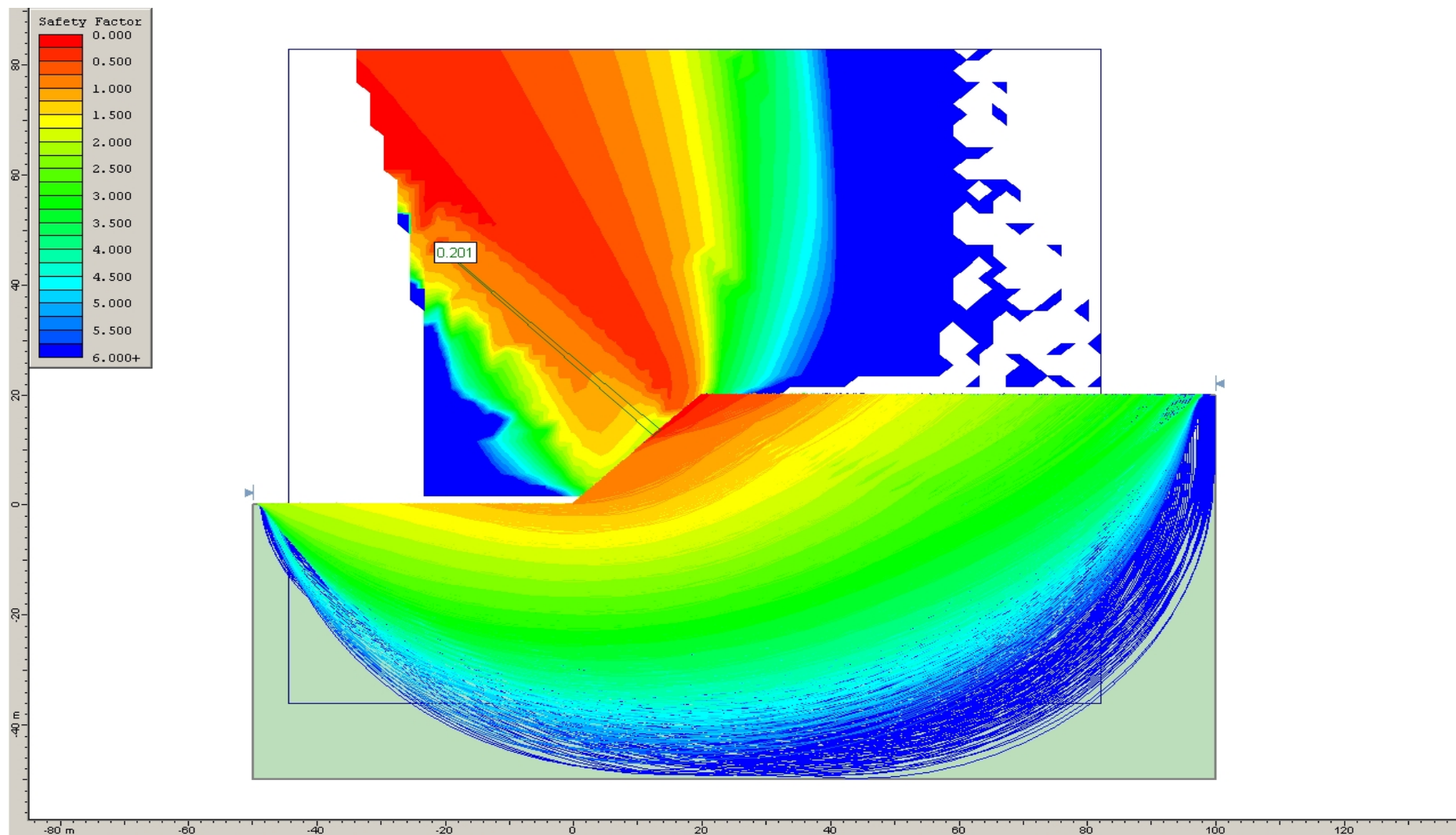
Ανάλυση 31. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.2$)



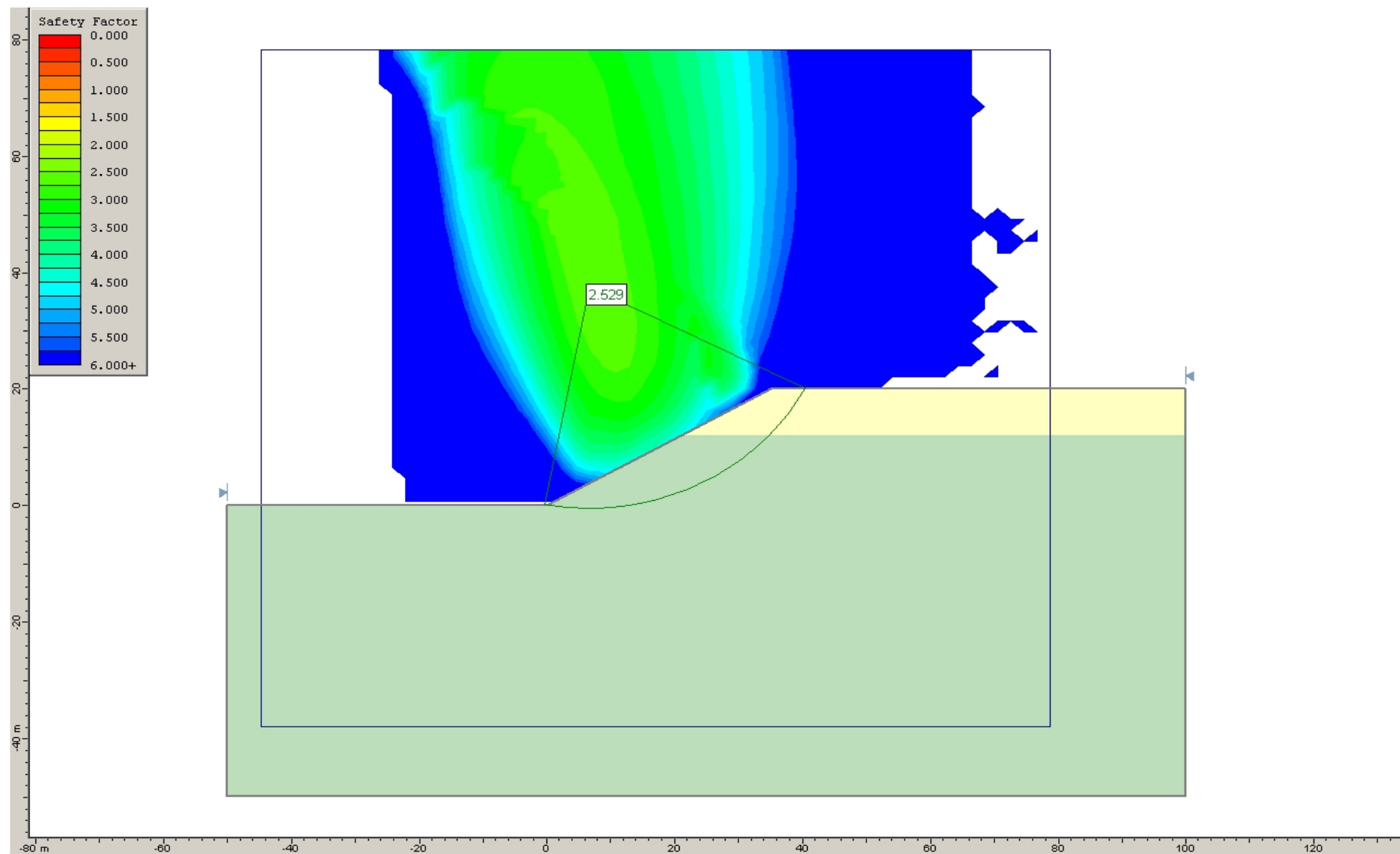
Ανάλυση 32. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Προϋπάρχον υλικό κατολίσθησης, $R_u=0.2$)



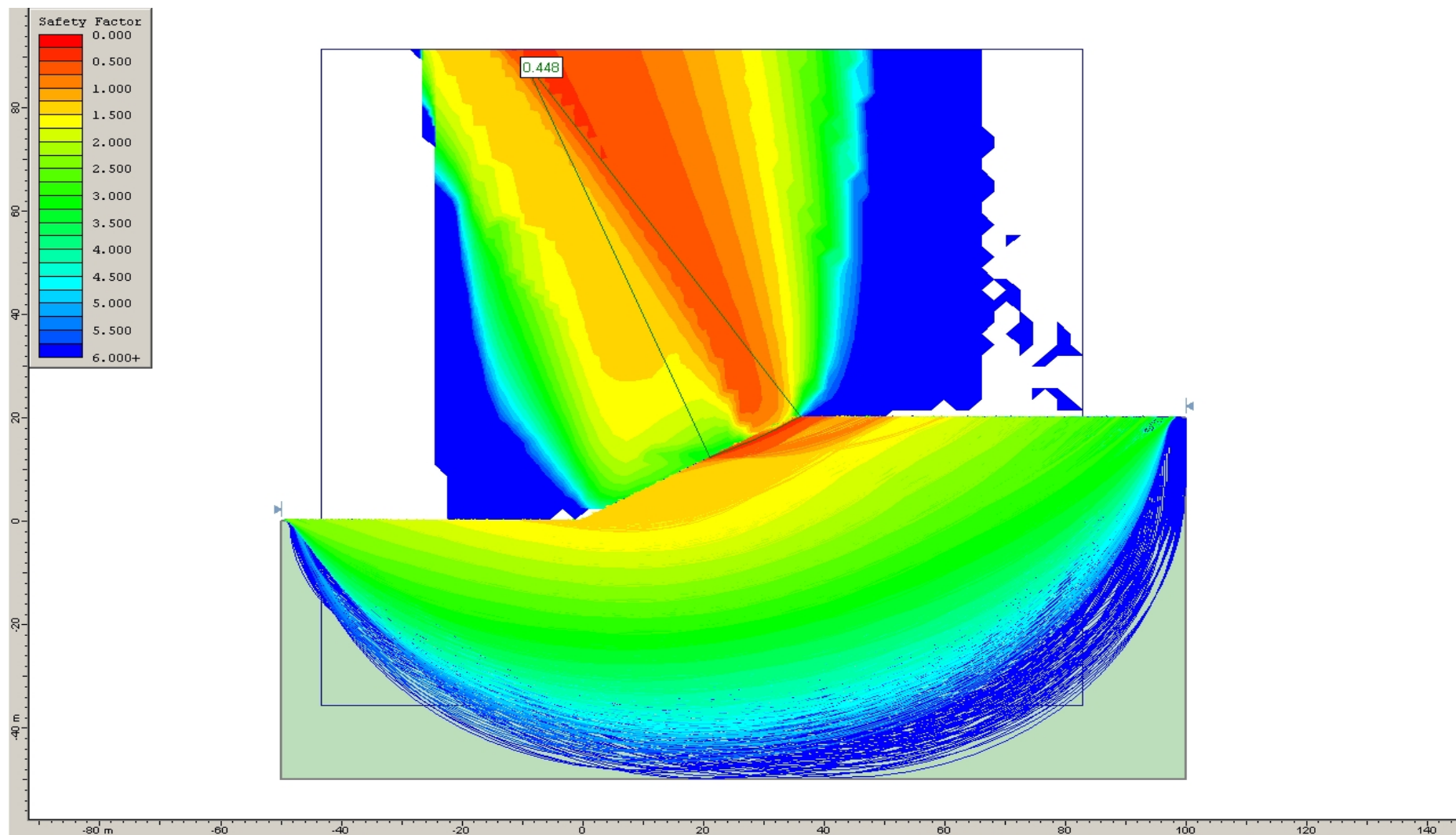
Ανάλυση 33. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.2$)



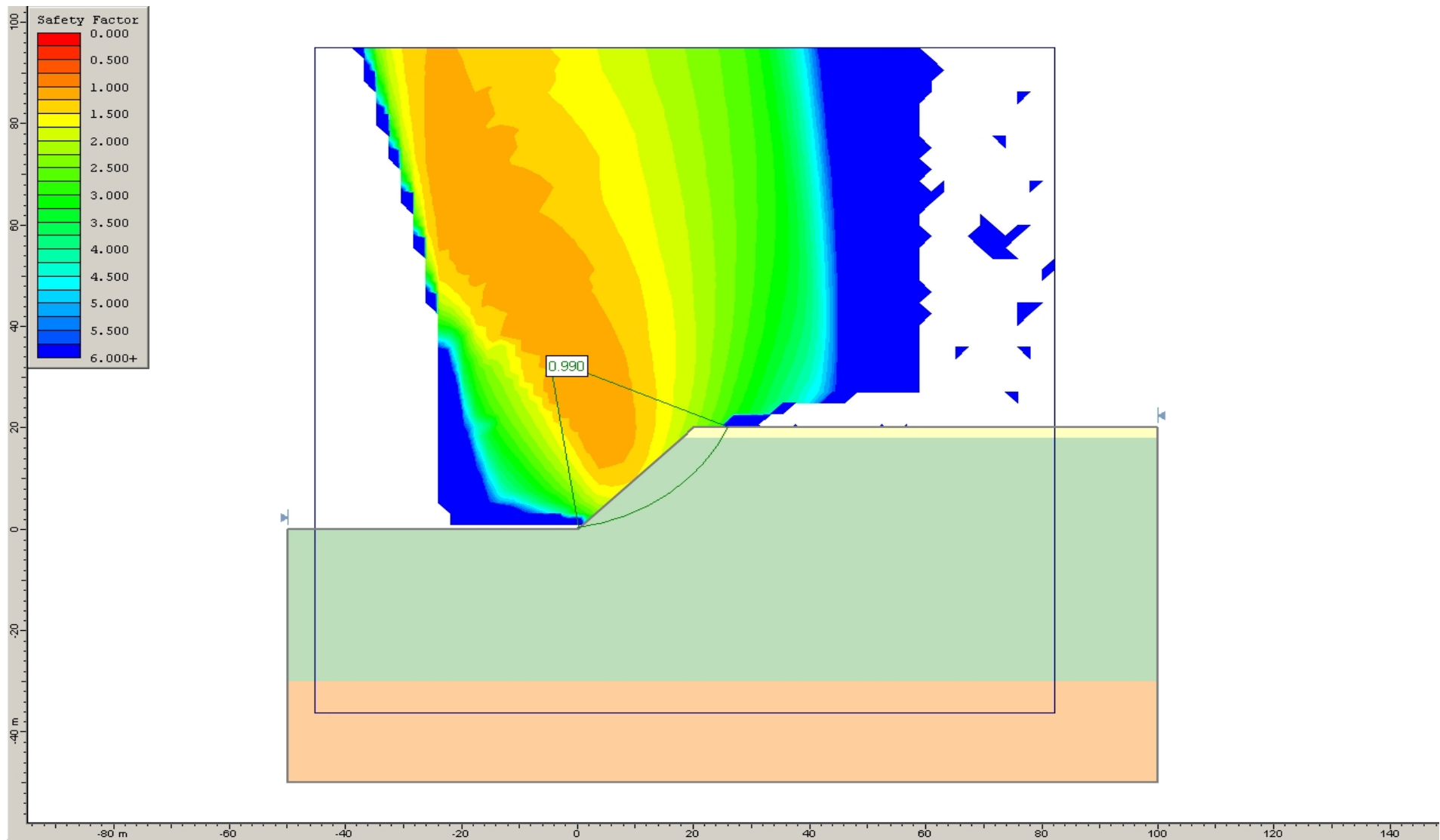
Ανάλυση 34. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 45° γωνία κλίσης (Προϋπάρχον υλικό κατολίσθησης, $R_u=0.2$)



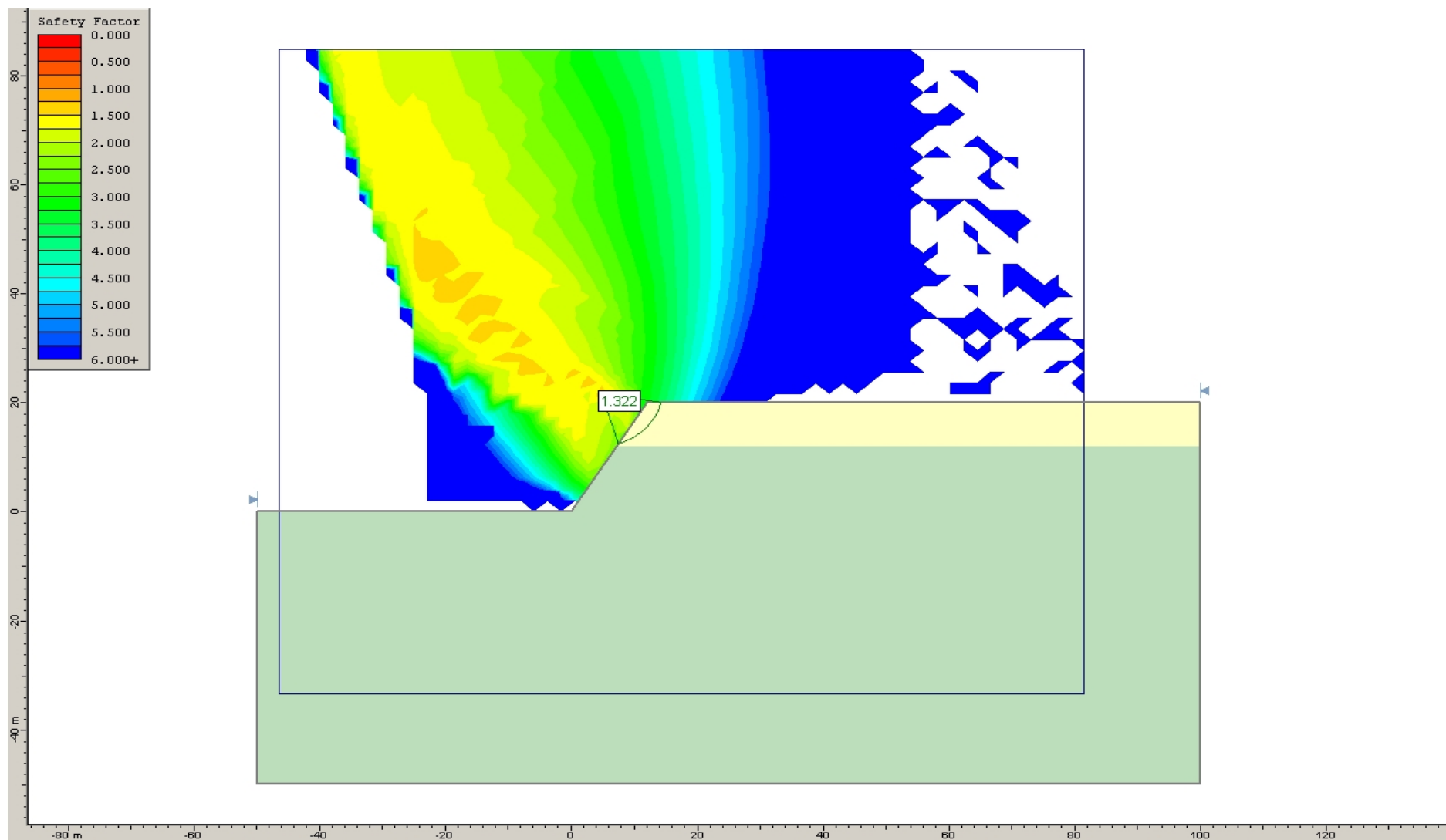
Ανάλυση 35. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30 γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.2$)



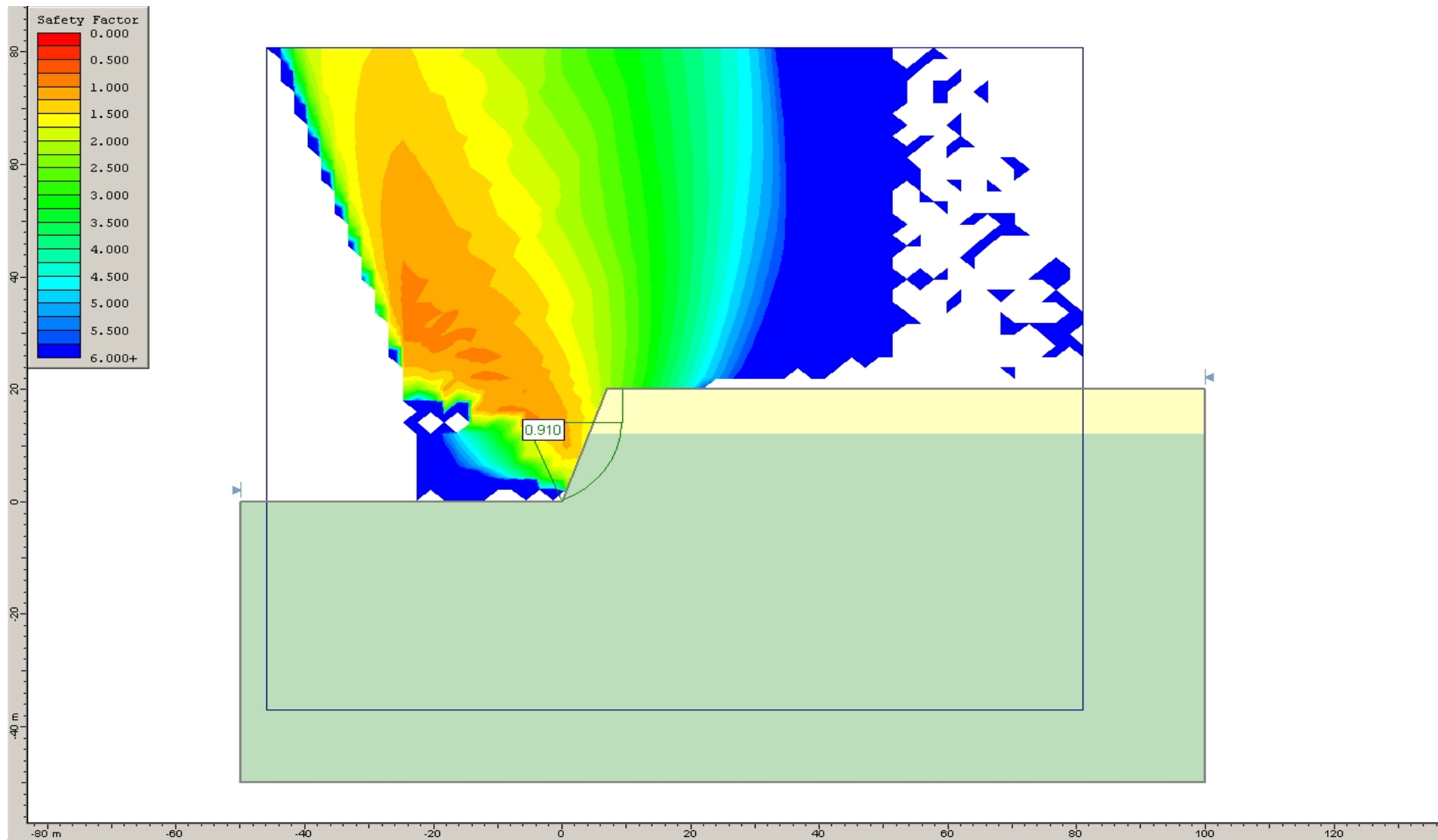
Ανάλυση 36. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 30° γωνία κλίσης (Προϋπάρχον υλικό κατολίσθησης, $R_u=0.2$)



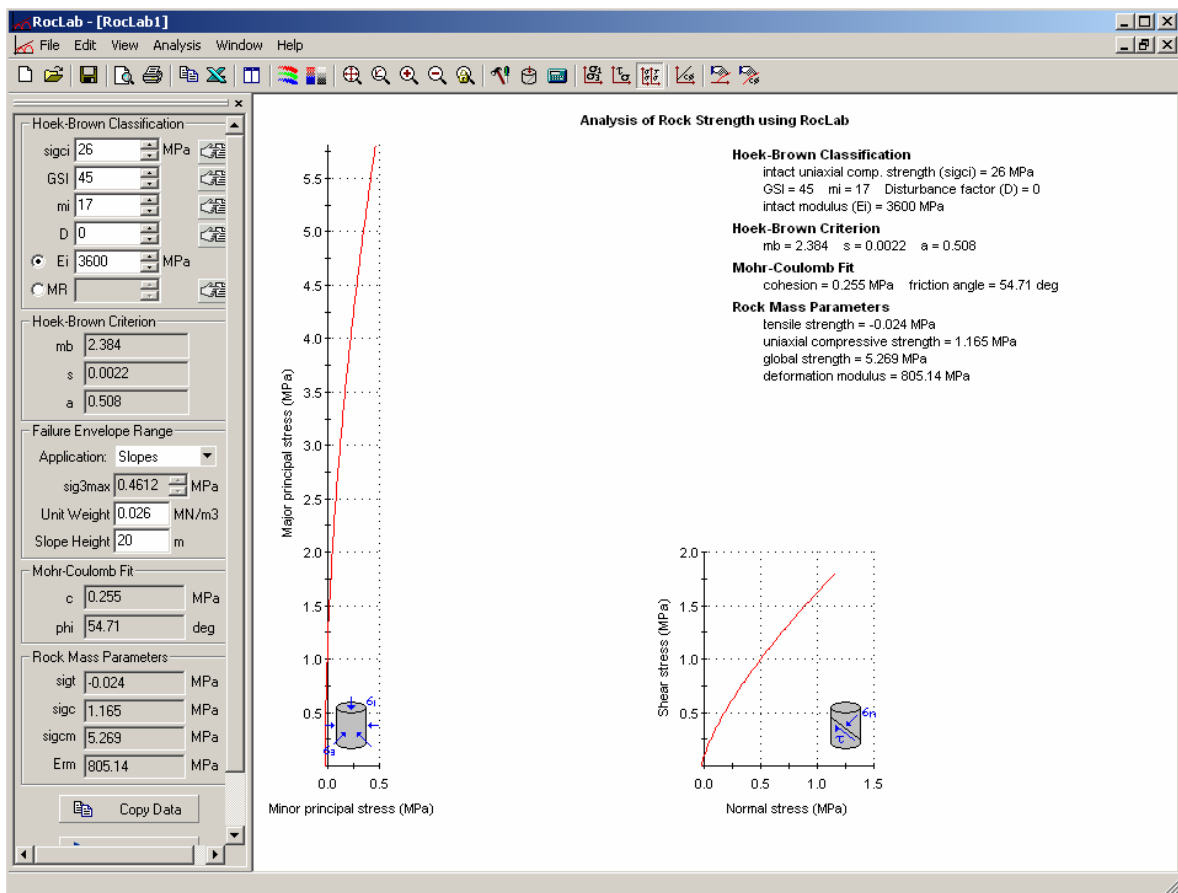
Ανάλυση 37. Ανάλυση ευστάθειας σε 45° γωνία κλίσης πρανούς (Διαταραγμένος ιλύόλιθος, $R_u=0.4$).



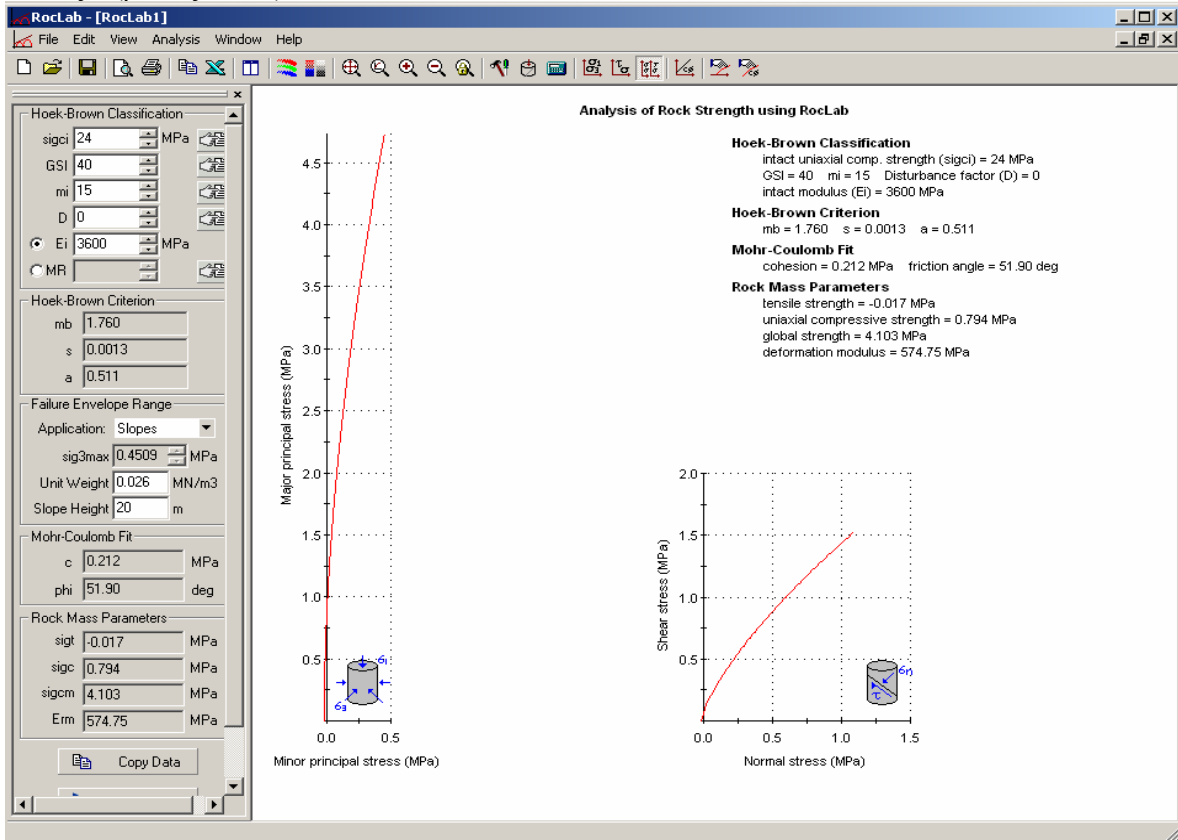
Ανάλυση 38. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 60° γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.4$)



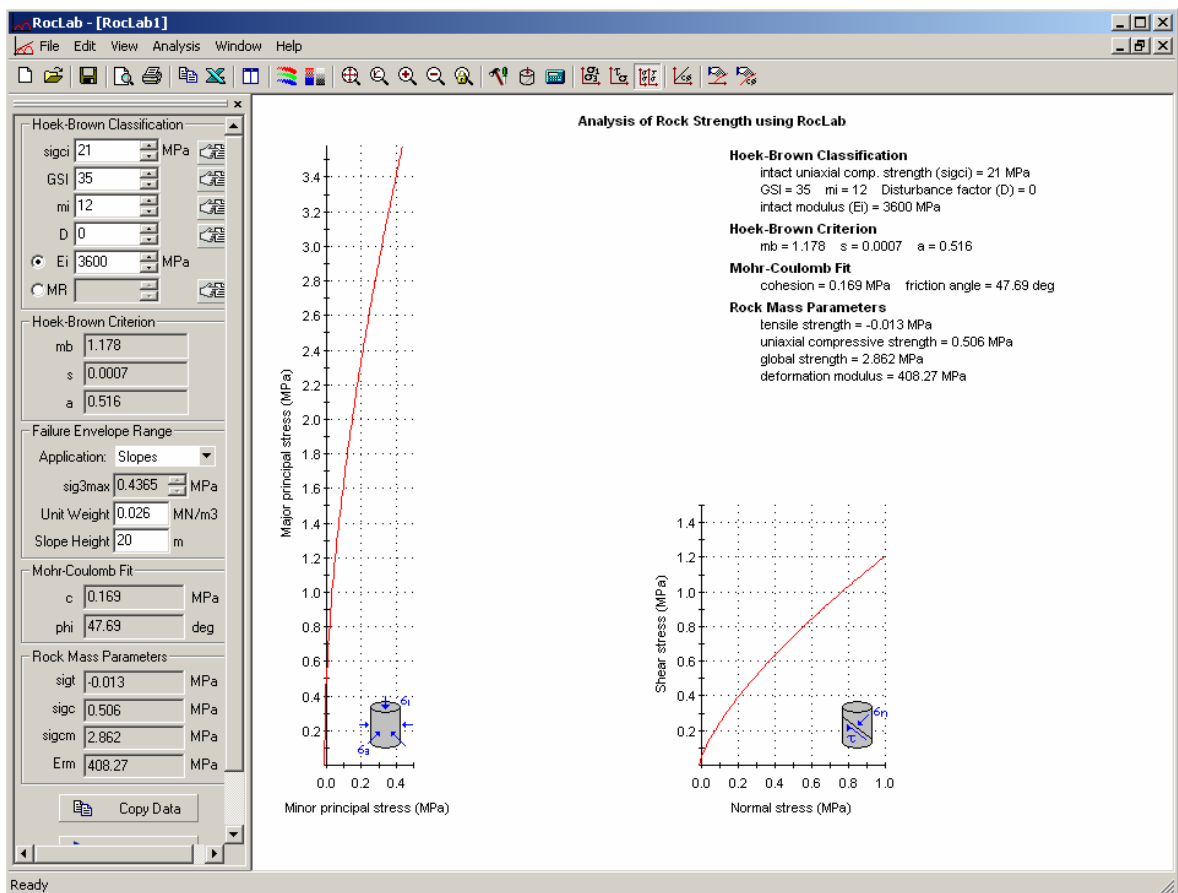
Ανάλυση 39. Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε 70° γωνία κλίσης (Ασθενής βραχώμαζα, $R_u=0.4$)



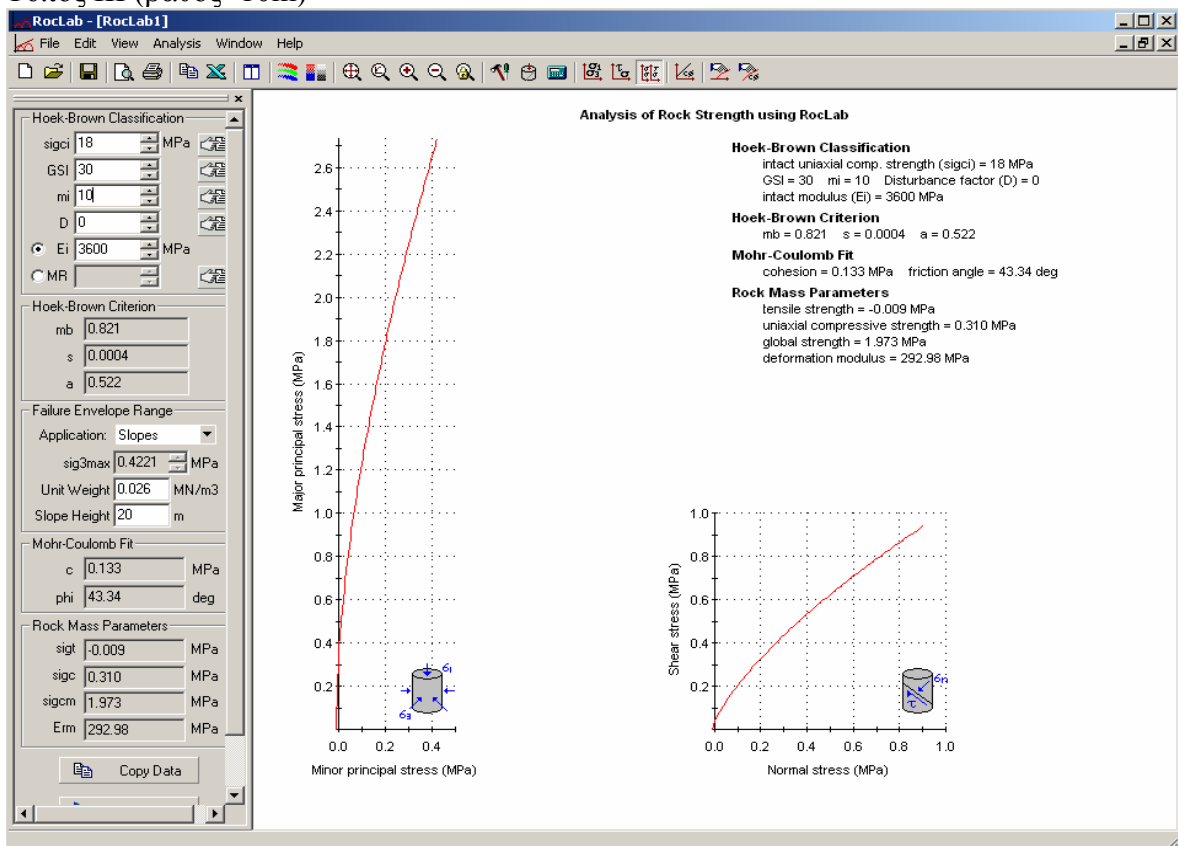
Τύπος Ι (βάθος<10m)



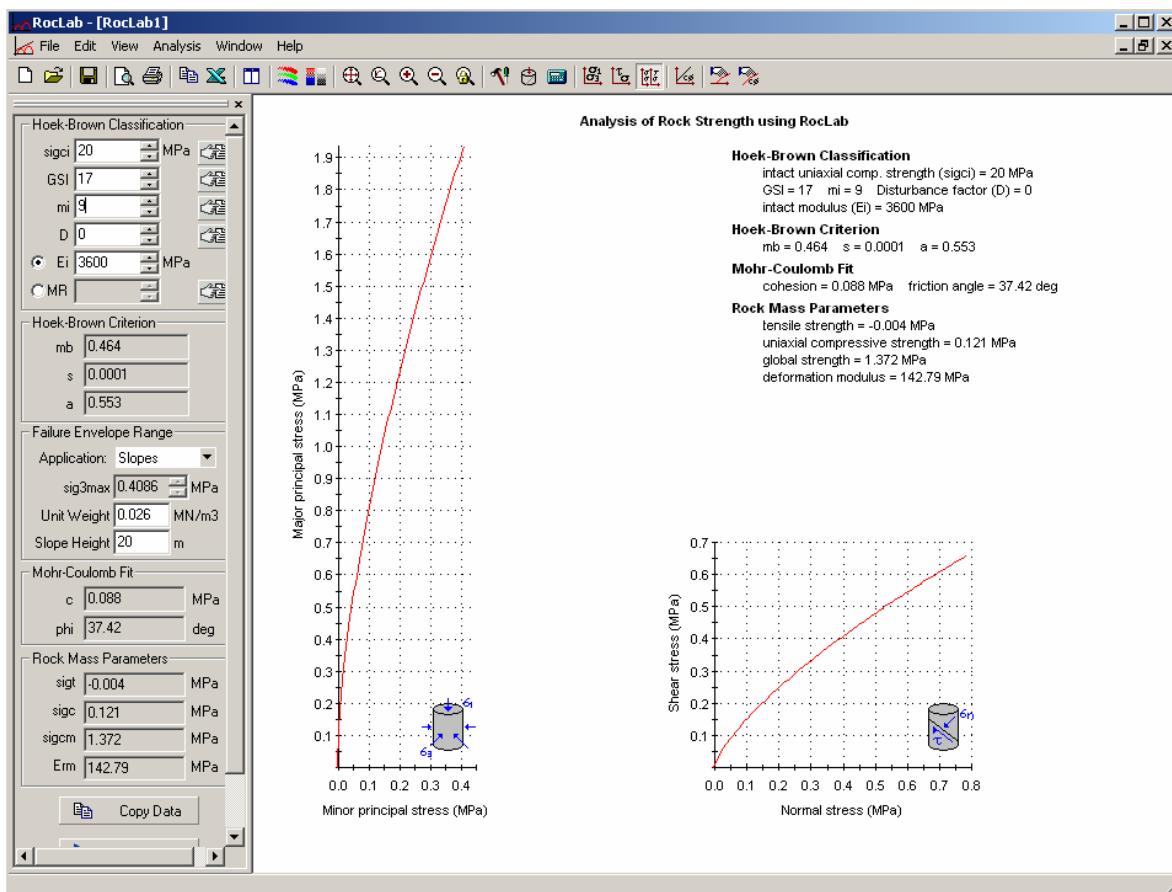
Τύπος ΙΙ (βάθος<10m)



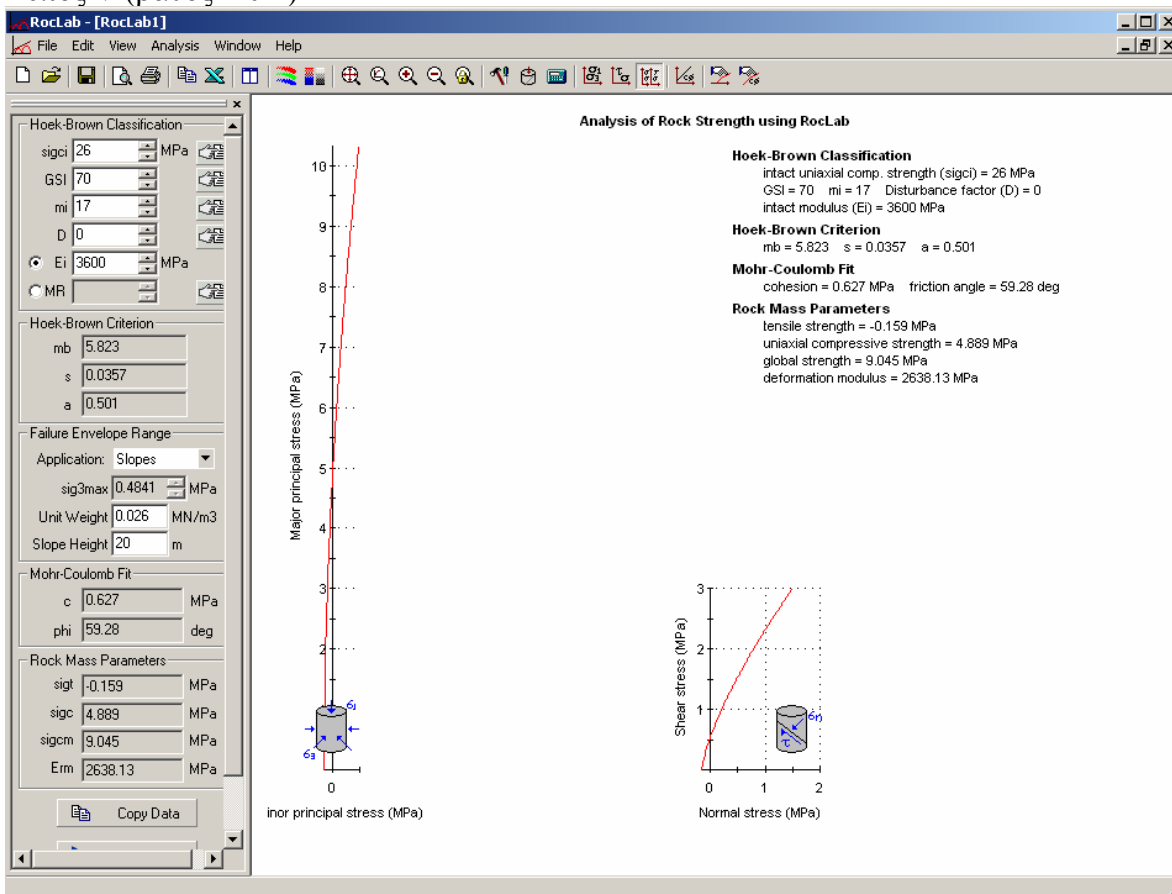
Τύπος III (βάθος < 10m)



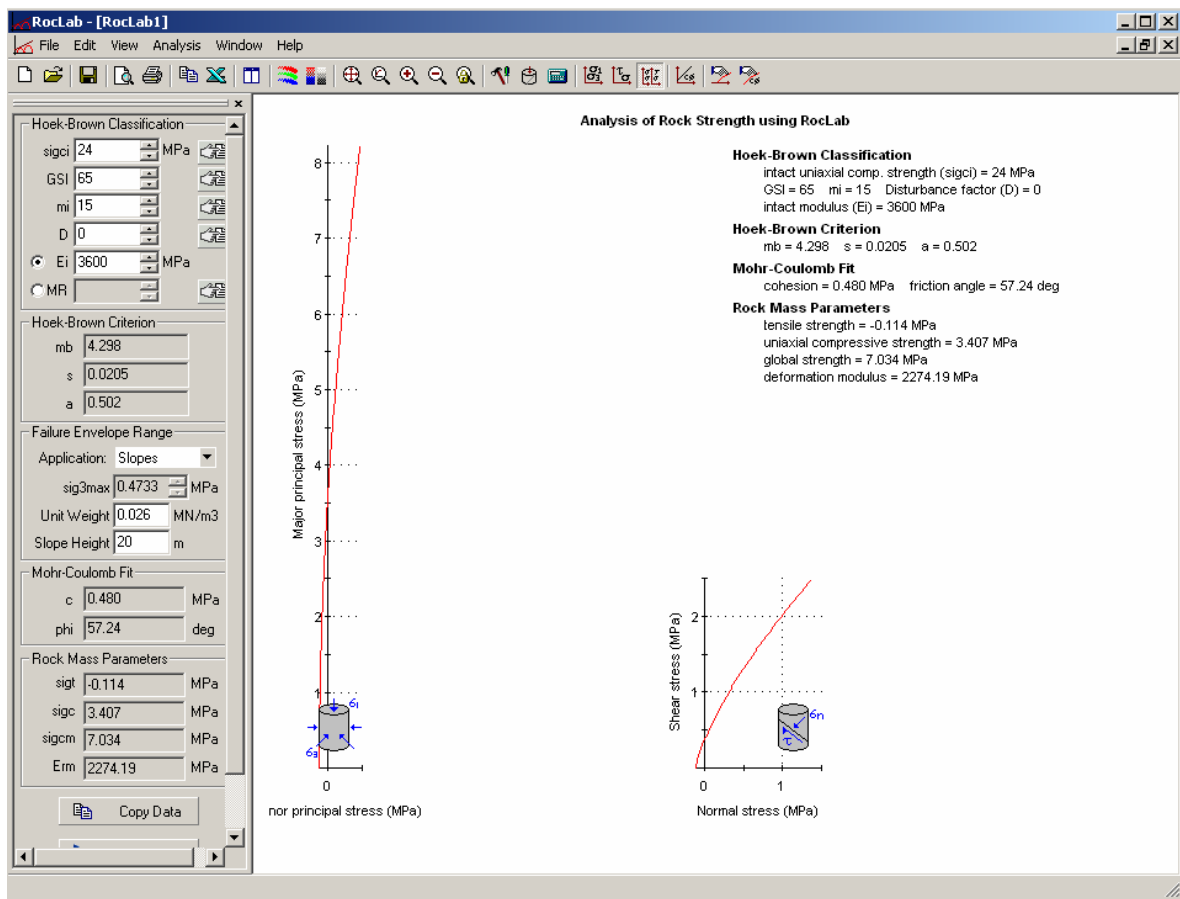
Τύπος IV (βάθος < 10m)



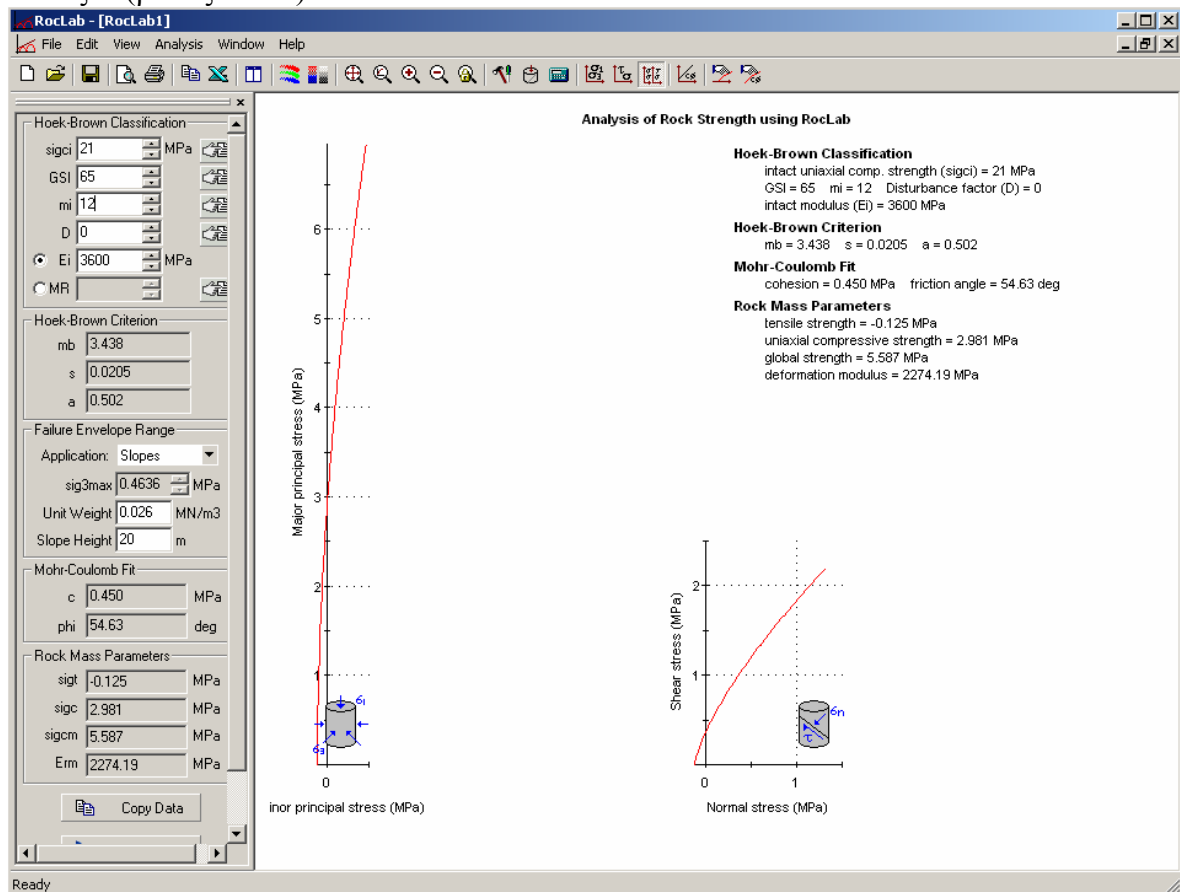
Τύπος V (βάθος < 10m)



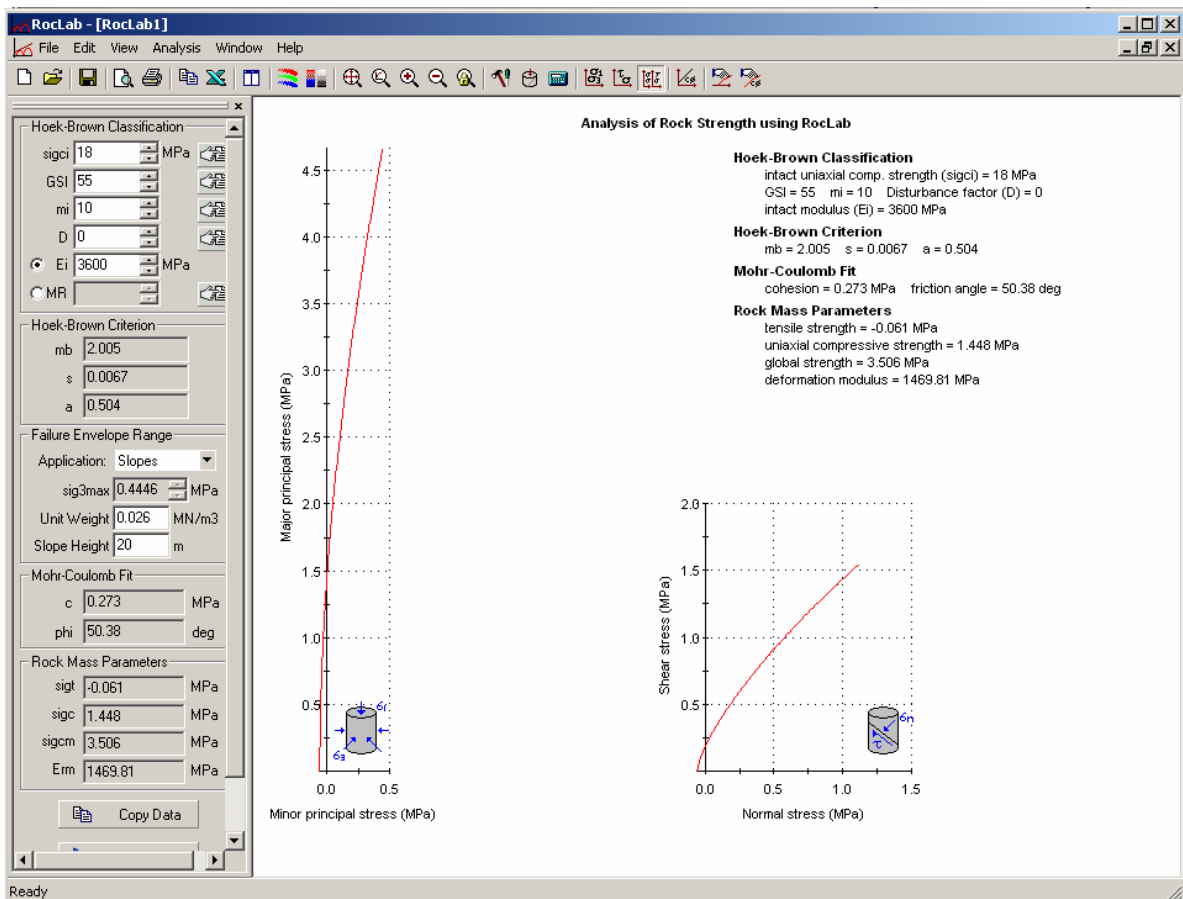
Τύπος I (βάθος > 10m).



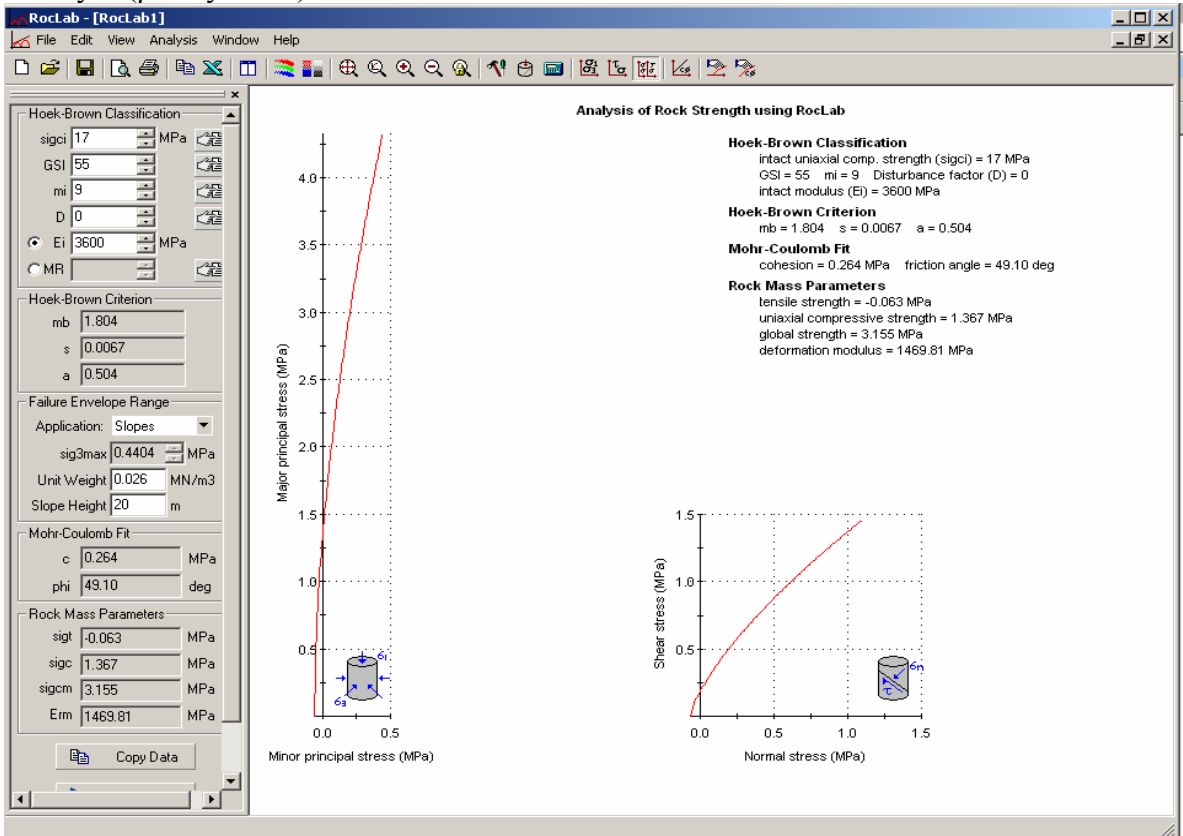
Τύπος II (βάθος > 10m).



Τύπος III (βάθος > 10m).



Τύπος IV (βάθος > 10m).



Τύπος V (βάθος > 10m).