



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ**

ΧΡΥΣΟΒΕΡΓΗ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΩ

Επιβλέπων καθηγητής

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ

ΒΟΛΟΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

© 2024 Χρυσοβαλάντω Χρυσοβέργη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Γεώργιος Εφραϊμίδης
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Προπτυχιακών Σπουδών

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή, ο οποίος με βοήθησε σε οποιαδήποτε δυσκολία και να συναντούσα από την αρχή έως το τέλος της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεπιβλέποντες καθηγητές, την Λέκτορα κ. Πολυξένη Καλλιόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Τσινίδη για την ανάγνωση και αξιολόγηση της εργασίας μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που είναι δίπλα μου και με στηρίζουν από την αρχή των σπουδών μου.

Παραμετρική μελέτη ευστάθειας υποθαλάσσιων πρηνών με αριθμητικά προσομοιώματα σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις

Χρυσοβαλάντω Χρυσοβέργη

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την μελέτη των συντελεστών ασφαλείας για υποθαλάσσια πρηνή, όταν αυτά υποβάλλονται σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Στόχος της είναι η μελέτη και κατανόηση του τρόπου δημιουργίας και εκδήλωσης υποθαλάσσιων κατολισθητικών φαινομένων καθώς και η εύρεση των ιδανικών υποθαλάσσιων περιοχών για την έδραση υποθαλάσσιων ενεργειακών υποδομών. Στο 1^ο κεφάλαιο, περιγράφονται οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, ο μηχανισμός πίσω από αυτές καθώς και οι κίνδυνοι που μπορεί να ενέχουν για τον άνθρωπο. Στο 2^ο κεφάλαιο, παραθέτονται παραδείγματα από υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο. Στο 3^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρόγραμμα FLAC/Slope , ο τρόπος λειτουργίας του και το επιστημονικό υπόβαθρο του. Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται ο τρόπος της προσομοίωσης των υποθαλάσσιων πρηνών, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας για τα πρηνή αυτά. Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο, παρατίθενται κάποια συμπεράσματα από τις αναλύσεις ευστάθειας και δίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Parametric stability study of subsea slopes with numerical simulations under static and dynamic loads

Chrysovalanto Chrysovergi

Abstract

This diploma thesis examines the study of safety factors for subsea slopes, under static and dynamic loads. Its aim is to study and understand how submarine landslides are generated and manifested, and to find the ideal subsea sites for the foundation of subsea energy infrastructures. Chapter 1 describes the submarine landslides, the mechanism behind them and the risks they can pose to humans. Chapter 2 gives examples of submarine landslides that have occurred in Greek subsea area. Chapter 3 presents the FLAC/Slope program, its mode of operation and its scientific background. Chapter 4 presents the way of the stimulation of submarine slopes, as well as the results of the stability analyses for these slopes. Finally, in Chapter 5, some conclusions from the stability analyses are presented and some suggestions for future research are given.

Πίνακας περιεχομένων	
Περίληψη	4
Abstract	5
Κεφάλαιο 1: Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις	8
Εισαγωγή	8
1.1.Κατολισθήσεις	9
1.1.1.Χερσαίες κατολισθήσεις	9
1.1.2.Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις	12
1.2.Μηχανισμός υποθαλάσσιων κατολισθήσεων	14
1.3.Εξέλιξη μετά την αστοχία-Κίνδυνοι-Επιπτώσεις	18
Κεφάλαιο 2: Παραδείγματα υποθαλάσσιων κατολισθήσεων στον Ελλαδικό χώρο	20
2.1.Κατολίσθηση στη Θάσο	20
2.2.Κατολίσθηση στη Σαντορίνη	21
2.2.1.Γενικά	21
2.2.2.Μορφολογία των αποθέσεων	23
2.3.Κατολίσθηση στον Κορινθιακό Κόλπο	24
2.3.1.Γενικά	24
2.3.2.Κατολίσθηση στο δέλτα του Μεγανίτη ποταμού	26
2.3.3.Κατολίσθηση στο δέλτα της Ελίκης	27
2.3.4.Κατολίσθηση στο δέλτα της Ερατεινής	28
2.3.5.Κατολίσθηση στις Αλκυονίδες νήσους και τη χερσόνησο της Περαχώρας	28
Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση του FLAC/Slope	30
3.1.Γενικά	30
3.2.Τεχνική “Απομείωσης της αντοχής”	31
3.3.Κριτήριο Modified Hoek-Brown	33
3.4.Λειτουργία του FLAC/Slope	35
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση υποθαλάσσιου πρανούς στο FLAC/Slope	55
4.1.Γενικά	55
4.2.Τρόπος δημιουργίας του προσομοιώματος	55
Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλύσεων ευστάθειας	59
5.1.Γενικά	59
5.2.Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Ασβεστόλιθος	59
5.3.Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άμμος-Ασβεστόλιθος	71
5.4.Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Άμμος	81
5.5.Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Ψαμμίτης-Ασβεστόλιθος	88
5.6.Τριστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Άμμος-Ασβεστόλιθος	93

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	104
Παράρτημα 1: Πίνακες αποτελεσμάτων FoS	107
Βιβλιογραφία.....	123
Ιστογραφία	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Εισαγωγή

Ως κατολίσθηση, γενικά, ορίζεται η γρήγορη μετακίνηση προς τα κάτω, γεωυλικού (εδάφικου/βραχώδους υλικού ή και συνδυασμού αυτών), λόγω της αποκόλλησης και της ολίσθησης ενός τμήματος του γεωυλικού από κάποιο κεκλιμένο πρηνές με την επίδραση της βαρύτητας [Α,Β,5,6,8,9].

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν τις κατολισθήσεις, όπως για παράδειγμα είναι οι σεισμοί, οι βαρυτικές δυνάμεις, οι βροχοπτώσεις, η μείωση της αντοχής του εδάφους λόγω της γεωμορφολογίας του ή και λόγω των διάφορων κλιματικών συνθηκών που επικρατούν και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις [Α,Β,10]. Η ολισθαίνουσα μάζα μπορεί είτε να παραμείνει άθικτη, είτε να σπάσει σε μικρότερα ολισθαίνοντα τμήματα (μπλοκ), είτε να αποσυντεθεί πλήρως δημιουργώντας έτσι ένα είδος ροής (π.χ. εδαφοροή).

Η μελέτη και η κατανόηση του γεωλογικού αυτού φαινομένου είναι αρκετά σημαντική διότι οι κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, οπότε με τη μελέτη τους μπορούν να βρεθούν λύσεις για την αποφυγή της δημιουργίας τους, καθώς και για τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την πρόληψη και την προστασία των ανθρώπων και των κατασκευών.

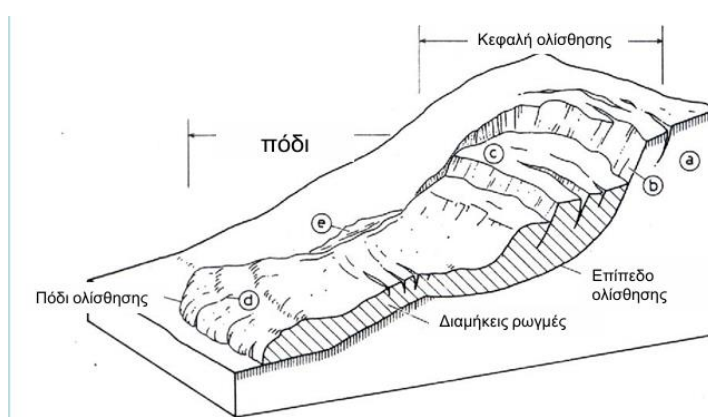
Κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν τόσο χερσαία όσο και υποθαλάσσια. Ο μηχανισμός λειτουργίας τους όμως διαφέρει [13]. Στις χερσαίες κατολισθήσεις η κλίση του πρηνούς είναι μεγαλύτερη από 10° ενώ στις υποθαλάσσιες η κλίση του πρηνούς είναι πολύ πιο χαμηλή (παρατηρούνται τιμές από 1° έως 5°), μπορεί επομένως μία κατολίσθηση να προκληθεί σε σχεδόν επίπεδες επιφάνειες. Η απόσταση που φθάνει το αποκολλημένο (κατολισθαίνον) γεωυλικό στις χερσαίες κατολισθήσεις κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα ενώ στις υποθαλάσσιες από δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα, επιπλέον στις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις έχουμε πολλές χιλιάδες κυβικά μέτρα κατολισθαίνοντος υλικού, το οποίο είναι 2 με 3 φορές μεγαλύτερο από αυτό των χερσαίων. Και στα δύο είδη των κατολισθήσεων η κινητήρια δύναμη είναι η βαρύτητα και μπορεί να προκληθούν επιπροσθέτως και λόγω των σεισμών. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί και θα αναλυθεί ο μηχανισμός λειτουργίας των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, οι παράγοντες που συμβάλλουν στη δημιουργία τους καθώς και οι επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσουν [5,17,19,22].

1.1 Κατολισθήσεις

Οι κατολισθήσεις (χερσαίες και υποθαλάσσιες) δημιουργούνται όταν ασκούνται στο έδαφος δυνάμεις, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τη διατμητική αντοχή του υποκείμενου γεωυλικού και για αυτό το λόγο προκαλούν αστοχία στο πρηνές [11,22,23].

1.1.1 Χερσαίες κατολισθήσεις

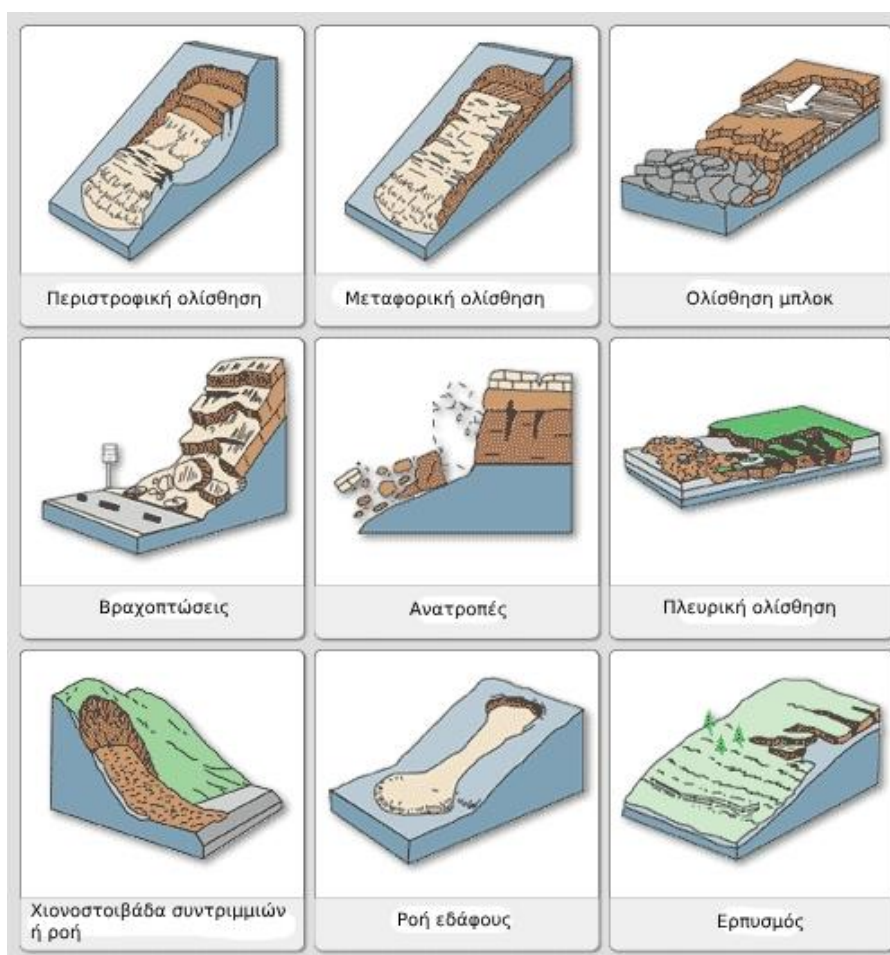
Οι υποθαλάσσιες όπως και οι χερσαίες κατολισθήσεις αποτελούνται από δύο σημαντικά τμήματα: την επιφάνεια διάρρηξης και τη μετατοπισμένη γεωμάζα (ιζήματος ή βράχου ή συνδυασμού αυτών). Η επιφάνεια διάρρηξης είναι εκείνη, στην οποία συμβαίνει η αστοχία και ξεκινά η κατολίσθηση και μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μία σε ένα πρηνές. Η μετατοπισμένη μάζα βρίσκεται συνήθως στην επιφάνεια ενός ρήγματος, αλλά είναι πιθανόν να μετακινηθεί και πέρα από αυτήν. Επιπλέον η κατολισθαίνουσα μάζα μπορεί να παραμείνει ακέραιη, λίγο έως πολύ παραμορφωμένη, ή μπορεί να διασπαστεί σε μικρότερα, διακριτά, ολισθαίνοντα μπλοκ. Σε κάποιες κατολισθήσεις ένα μέρος της μετατοπισμένης γεωμάζας ή και ολόκληρη μπορεί να αποσυντεθεί πλήρως και να δημιουργήσει ροή εδάφους. Το κύριο σημείο αποκόλλησης είναι το ανώτερο τμήμα της επιφάνειας διάρρηξης, το οποίο έχει μείνει κενό από τη μετατοπισμένη μάζα. Μπορεί να υπάρχουν ρωγμές/διαρρήξεις στην κορυφή μέσα σε σταθερό, οριακά, υλικό, επάνω από το κύριο σημείο αποκόλλησης. Το άνω άκρο της μετατοπισμένης μάζας είναι η κορυφή της κατολίσθησης και το κάτω είναι ο πόδας. Η περιοχή του πόδα της γεωμάζας που έχει κατολισθήσει, μπορεί να έχει μία ανυψωμένη επιφάνεια, η οποία δημιουργείται από την αντίσταση στην καθοδική κίνηση και την περιστροφή [11,14,17,22]



Εικόνα 1: Απεικόνιση δομής φαινομένου κατολισθήσεων [Α].

Η επιφάνεια διάρρηξης σε ομοιογενή μηχανικά υλικά, συνήθως, είναι κοίλη προς τα πάνω, οπότε η κίνηση της μάζας που ολισθαίνει τείνει να είναι περιστροφική και ονομάζεται «Περιστροφική ολίσθηση» ή «Κατάπτωση» (Rotational slides ή slumps). Αν έχουμε μηχανικά ανομοιογενή υλικά τότε η επιφάνεια διάρρηξης είναι σχεδόν επίπεδη και η κίνηση της μετατοπισμένης μάζας είναι μεταφορική και ονομάζεται «Μεταθετική ολίσθηση» (Translational slide). Τέλος η ολίσθηση που πραγματοποιείται με πολλές γειτονικές αστοχίες που εξελίσσονται προς τα πάνω ονομάζεται «Παλινδρομική» (Retrogressive). Τα παραπάνω απεικονίζονται στην εικόνα 2. Ακόμη εξαιτίας των κατολισθήσεων αυτών μπορεί να προκληθούν ροές εδάφους οι οποίες χωρίζονται ως εξής: στις χιονοστιβάδες κορημάτων, τις ροές κορημάτων, τις λασποροές, τις ρευστοποιημένες ροές και τις τουρβιδιτικές ροές [11,18,22].

Ως χιονοστιβάδα κορημάτων ορίζεται η ροή που συμβαίνει με μεγάλες ταχύτητες και αποτελείται από κομμάτια βράχου. Συμβαίνει συνήθως σε πρανή με μεγάλες κλίσεις, όπως τα χερσαία και τα υποθαλάσσια φαράγγια. Η ροή κορημάτων όπως και οι λασποροές είναι στρωτές ροές λεπτόκοκκων εδαφών, όπου τα χονδρόκοκκα υλικά αιωρούνται λόγω της δύναμης της άνωσης της μάζας που ρέει. Η ρευστοποιημένη ροή αποτελείται από μη συνεκτικά εδάφη, τα οποία βρίσκονται σε αιώρηση λόγω της προς τα επάνω εκτόπισης του νερού [3,7,11,14].



Εικόνα 2: Είδη κατολισθήσεων [Γ].

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να συμβάλλουν στη δημιουργία χερσαίων και υποθαλάσσιων κατολισθήσεων. Αυτοί μπορεί να προκαλέσουν μία κατολίσθηση σε βάθος πολλών χρόνων ή ακόμη και άμεσα και χωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες: σε αυτούς που προκαλούνται από εξωτερικά, παροδικά γεγονότα (π.χ. σεισμοί) και σε αυτούς που βασίζονται στα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υλικού που κατολισθαίνει (π.χ. παρουσία ενός αδύναμου στρώματος). Σε κάποιες περιπτώσεις η σχέση της κατολίσθησης και των αιτιών της είναι πολύ προφανής και άμεση (πχ κατολίσθηση σε απότομη πλαγιά) ενώ σε κάποιες άλλες δεν είναι καθόλου εμφανής, ειδικά όταν παρεμβάλλονται και ενδιάμεσες διεργασίες. Συνήθως όμως οι κατολισθήσεις προκύπτουν από το συνδυασμό πολλών παραγόντων. Για παράδειγμα αρκετές κατολισθήσεις σε Φιορδ ή δέλτα ποταμών έχουν συνδεθεί με σεισμούς. Όμως αυτό δείχνει ότι ο σεισμός είναι ο τελευταίος συντελεστής που οδηγεί στην αστοχία

ενός πρανούς, καθώς πριν έχουν συμβάλλει και η μορφολογία του αλλά και διάφοροι άλλοι παράγοντες που συνδέονται με την γεωλογία και το κλίμα της περιοχής[7,11,22].

Γενικά οι παράγοντες που συμβάλλουν στην έναρξη μίας κατολίσθησης είναι οι εξής:

- Σεισμοί/Ρήγματα
- Κυκλικές φορτίσεις/Τεκτονική συμπίεση στις ζώνες βύθισης
- Ερπυσμός
- Υπερπίεση των πόρων
- Απότομες κλίσεις
- Γεωλογικοί παράγοντες(στρωματογραφία, πετρολογία, κλπ.)
- Μορφολογία του εδάφους
- Ασθενή στρώματα παράλληλα στην κλίση του πρανούς
- Αυξομειώσεις της στάθμης της θάλασσας
- Βιολογικές διεργασίες
- Ανθρώπινες παρεμβάσεις
- Κλιματική αλλαγή

Οι σεισμοί και οι κυκλικές φορτίσεις προκαλούν τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των ρηγμάτων, που με τη σειρά τους οδηγούν στην μετακίνηση των πρανών. Αυξημένες πιέσεις πόρων οδηγούν σε μειωμένη αντίσταση τριβής σε ολίσθηση και προκύπτουν από φυσικές διεργασίες (π.χ. βροχοπτώσεις) ή από παροδικές διεργασίες (π.χ. Σεισμός). Επίσης όταν η πίεση των πόρων υπερβεί την υδροστατική πίεση, οι κόκκοι του εδάφους τείνουν να αποσταθεροποιηθούν και έτσι μειώνεται η αντοχή του πρανούς. Ο ερπυσμός είναι η αργή καθοδική ροή ιζημάτων και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία είτε το ίδιο το ίζημα που υπόκειται σε ερπυσμό είτε τα υπερκείμενα στρώματα. Οι βιολογικές διεργασίες μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθεια του εδάφους, καθώς μελέτες έχουν δείξει αποσταθεροποίηση των πρανών λόγω βακτηρίων, μυκήτων και άλλων μικροοργανισμών, που «σκάβουν» το έδαφος. Τέλος, ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν επίσης να προκαλέσουν κατολισθήσεις, οι οποίες αν και είναι μικρές σε μέγεθος μπορεί να είναι αρκετά επικίνδυνες γιατί μπορεί να επηρεάσουν κατοικημένες περιοχές[6,7]

1.1.2 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις



Εικόνα 3: Κατανομή περιοχών υποθαλάσσιων κατολισθήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο [24].

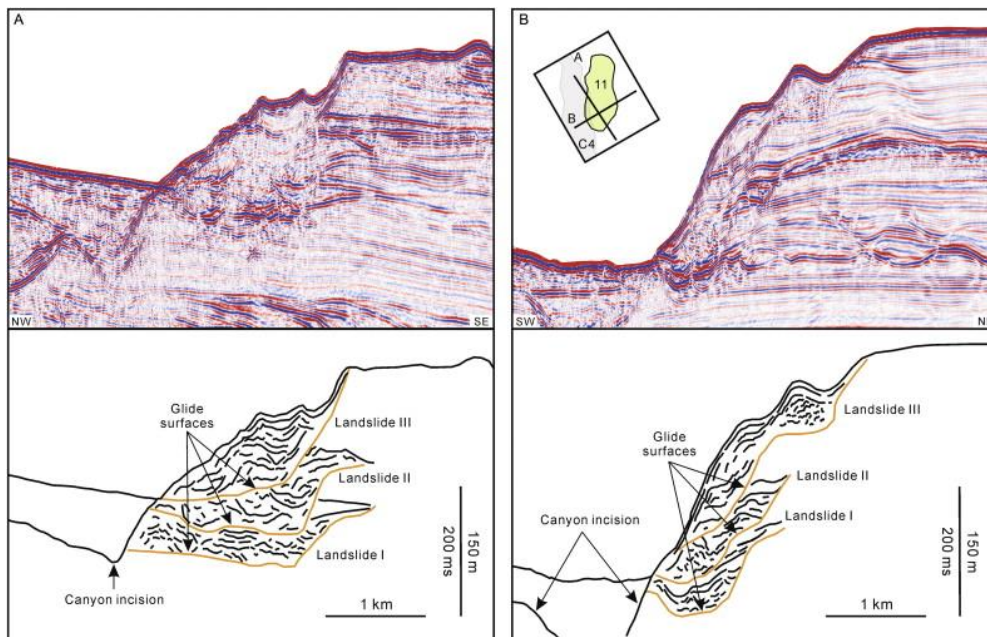
Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, δημιουργούνται συνήθως στις περιοχές όπου συναντώνται ταχείες συσσωρεύσεις ιζηματογενών αποθέσεων, κεκλιμένοι θαλάσσιοι πυθμένες και υψηλές πιέσεις, δηλαδή σε περιοχές εκβολής ποταμών ή και σε δέλτα ποταμών, σε νησιά που έχουν δημιουργηθεί από ηφαιστειακές εκρήξεις, σε φιόρδ, σε υποθαλάσσια φαράγγια, σε ασθενή στρώματα παράλληλα στην κλίση του πρσανούς αλλά και σε ανοιχτά ηπειρωτικά περιθώρια. Γενικότερα, οι χημικές διεργασίες αποσάθρωσης σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη και η δράση των παγετώνων σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη παράγουν λεπτόκοκκα ιζήματα που συσσωρεύονται στα ηπειρωτικά περιθώρια και ευνοούν τη δημιουργία κατολισθήσεων. Ανάμεσα τους, στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη η ποτάμια αποσάθρωση και η μεταφορά ιζημάτων παράγουν πιο χονδρόκοκκα ιζήματα, τα οποία μεταφέρονται στις υποθαλάσσιες λεκάνες μέσω τυρβώδους ροής και διέρχονται από τα υποθαλάσσια φαράγγια και Φιορδ. Το κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω περιοχών είναι η ύπαρξη κεκλιμένου πυθμένα (ακόμα και μικρής κλίσης), η οποία, με τη βοήθεια της δύναμης της βαρύτητας, προκαλεί την κάθοδο του πρσανούς [6,7,11].

Πιο αναλυτικά:

- Στις εκβολές και τα δέλτα των ποταμών, τα ιζήματα που παρασύρονται από το νερό του ποταμού δημιουργούν δελταϊκές αποθέσεις τοπικά, οι οποίες μεταβάλλουν την μορφολογία του πυθμένα και προκαλούν τις κατολισθήσεις, λόγω της ορμητικής συσσώρευσης τους στην ηπειρωτική πλαγιά.
- Τα νησιά που έχουν δημιουργηθεί από εκρήξεις ηφαιστειών αποτελούνται από απότομες πλαγιές οι οποίες είναι περισσότερο επιρρεπείς στις κατολισθήσεις, εκεί η αστοχία του πρσανούς αναπτύσσεται σχετικά γρήγορα, ενώ οι μεγαλύτερες κατολισθήσεις εμφανίζονται αργά.
- Τα Φιόρδ (fjord) είναι θαλάσσιοι, μακρόστενοι όρμοι που δημιουργήθηκαν λόγω διάβρωσης κοιλάδων από το λιώσιμο των παγετώνων, οι οποίοι αποτελούνται από

απότομες πλαγιές. Συνήθως υπάρχει ένα απότομο μετωπικά δέλτα στην κεφαλή των Φιορδ, το οποίο τροφοδοτείται από ένα ρεύμα ιζημάτων που αποστραγγίζει των παγετώνων που πλημμύρισε την κοιλάδα. Η ταχεία εναπόθεση του ρεύματος στο δέλτα μπορεί να αυξήσει κατά πολύ την πίεση του νερού των πόρων, δημιουργώντας μία κατάσταση υποστερεοποίησης (underconsolidation) προκαλώντας έτσι χαμηλή διατμητική αντοχή. Είναι επίσης πιθανόν να προκληθεί αστοχία και λόγω των ιζημάτων που μεταφέρονται από ποτάμια σε υποθαλάσσια δέλτα που βρίσκονται στα Φιόρδ, εξαιτίας της γρήγορης απόθεσης τους αλλά και των απότομων κλίσεων που έχουν τα πλευρικά τοιχώματα των γεωλογικών αυτών σχηματισμών. Επιπλέον οι κατολισθήσεις στα Φιόρδ συχνά συνδέονται με την ύπαρξη του «quick clay» (γρήγορη άργιλος), το οποίο είναι ένα ασταθές ιζημα που δημιουργείται όταν οι θαλάσσιες άργιλοι ανυψώνονται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και τις εκπλύνει το γλυκό νερό [12,13]

- Η αστοχία στα υποθαλάσσια φαράγγια είναι ο κύριος λόγος διεύρυνσης και σμίλευσης τους. Έχουν απότομα και υψηλά περιθώρια (τοιχώματα) συνήθως, οπότε είναι εύκολο να προκληθεί αστοχία. Επιπροσθέτως, στη στέψη τους εναποτίθενται ιζήματα του πυθμένα. τα οποία εξαφανίζονται μετά από σεισμούς ή καταιγίδες ενδεχομένως από κίνηση λόγω κατολισθήσεων. Ακόμη έχει παρατηρηθεί αργή, βαρυτική κίνηση της στέψης του φαραγγιού και σε μεγαλύτερα βάθη ξεκάθαρη κατολίσθηση, ειδικά στα πιο απότομα τοιχώματα των φαραγγιών.
- Τα ασθενή στρώματα έχουν μεγαλύτερη πλαστικότητα και υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό από τα υπερκείμενα στρώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διεπιφάνειά τους να είναι πιο ευάλωτη, δηλαδή συμβαίνει υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας τους με αποτέλεσμα να χάνουν την αντοχή τους. Έτσι όταν φορτίζονται ταχέως, αυξάνεται η πίεση των πόρων στο εσωτερικό τους και προκαλείται έτσι η κατολίσθηση.
- Στις ανοιχτές πλαγιές των ηπειρωτικών περιθωρίων έχουμε τις μεγαλύτερες σε κλίμακα αστοχίες. Η κλίση του πυθμένα είναι αρκετά απότομη οπότε ευνοείται και εδώ η καθοδική κίνηση λόγω βαρύτητας. Επιπλέον κάποιες κατολισθήσεις προκύπτουν και από τις απότομες αυξομειώσεις της στάθμης της θάλασσας, οι οποίες προκαλούν την αποσύνθεση των υδριτών αερίου (ένα μείγμα μεθανίου και άνθρακα και σχηματίζονται κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και περιέχουν μεγάλες ποσότητες αερίου), δημιουργώντας αέριο με τη μορφή φυσαλίδων και αυξάνοντας έτσι την πίεση των πόρων στη βάση του εναπομείναντος υδρίτη, προκαλώντας έτσι την αστοχία στη βάση του υδρίτη. Ακόμη οι κατολισθήσεις αυτές μπορούν να δημιουργηθούν σχετικά αργά με τη βοήθεια οπισθοδρομικών διεργασιών, οι οποίες είναι πανομοιότυπες με τις ροές «quick clay» (γρήγορη άργιλος) που συμβαίνουν στα Φιόρδ [5,6,12,13]



Εικόνα 4: Κατολίσθηση σε υποθαλάσσιο φαράγγι [25]. Όπου glide surfaces οι επιφάνειες ολίσθησης και canyon incision η τομή του φαραγγιού.

1.2. Μηχανισμός υποθαλάσσιων κατολισθήσεων

Από μηχανικής άποψης, μία κατολίσθηση συμβαίνει όταν η κινητήρια διατμητική τάση υπερβεί τη διατμητική αντοχή του πρανούς.

Η ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας των πρανών μπορεί να διευκρινίσει τους παράγοντες που την προκαλούν, αλλά και να προβλέψει μελλοντικές κατολισθήσεις, βοηθώντας στην αξιολόγηση της επικινδυνότητας των υποθαλάσσιων περιοχών που μπορεί να θέλει ο άνθρωπος να κατασκευάσει παράκτια έργα.

Οι κατολισθήσεις ξεκινάνε όταν η διατμητική τάση, που προσανατολίζεται κατηφορικά, υπερβεί την διατμητική αντοχή του υλικού που διαμορφώνει το πρανές. Για να οριστεί η διατμητική αντοχή, απαιτείται η επιλογή ενός κριτηρίου αστοχίας, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Συχνότερα χρησιμοποιούμενο είναι το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) * \tan \phi', \quad (1.1)$$

όπου,

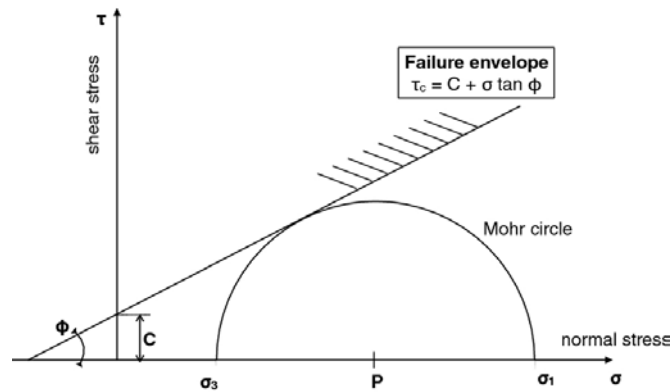
τ_f : η διατμητική αντοχή (κατά την αστοχία)

c' : η συνοχή του εδάφους

σ : η ορθή τάση που δρα στην επιφάνεια αστοχίας (ολική τάση)

u : η πίεση του νερού των πόρων

ϕ' : η γωνία τριβής του εδάφους



Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb [Δ].

Ο όρος (σ-u) ορίζεται ως ενεργός τάση και συμβολίζεται ως: σ' . Όταν οι όροι είναι τονούμενοι εννοούμε ενεργά μεγέθη.

Έχει βρεθεί ότι η αντοχή των εδαφών εξαρτάται περισσότερο από την ενεργό τάση.

Η συνοχή για αδιατάρακτους βράχους παίρνει μεγάλες τιμές, ενώ στα περισσότερα ιζήματα παίρνει πολύ μικρές τιμές.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb παρουσιάζει μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην ορθή και τη διατμητική τάση. Για παράδειγμα, εάν μειωθεί η ενεργός τάση του εδάφους (με αύξηση της πίεσης των πόρων), τότε θα μειωθεί και η διατμητική του τάση. Υπάρχουν τρία είδη διατμητικών τάσεων που είναι πιθανό να επηρεάσουν τη δημιουργία και την εμφάνιση υποθαλάσσιων κατολισθήσεων : η τάση που προκαλείται από το σεισμό, η τάση που προκαλείται από τα κύματα που προκαλούνται από τις καταιγίδες και η βαρύτητα. Για να αξιολογηθεί η ευστάθεια ενός υποθαλάσσιου πρανούς, πρέπει να γίνει μία σειρά από λεπτομερείς αναλύσεις, που αφορούν τα παραπάνω είδη διατμητικών τάσεων.

Η διατμητική τάση που προκαλείται λόγω βαρυτικών φορτίων δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$\tau = \gamma' z \sin \alpha, \quad (1.2)$$

όπου:

γ' : το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους (=ολικό ειδικό βάρος του εδάφους, γ μείον την πυκνότητα του θαλασσινού νερού, γ_w)

z : το βάθος κάτω από την διεπιφάνεια εδάφους-νερού

α : κλίση του πρανούς

Για πρανές που αποτελείται από μη συνεκτικό έδαφος (δηλ. $c=0$), όπως είναι η άμμος, τα χαρακτηριστικά αντοχής τους μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν συντελεστή τριβής, ο οποίος ισούται με την $\tan \phi'$, όπου ϕ' είναι η γωνία τριβής του εδάφους και προσδιορίζεται πειραματικά. Σε αυτήν την περίπτωση, η διατμητική αντοχή του εδάφους κατά την αστοχία δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \phi', \quad (1.3)$$

όπου:

σ'_n : η ενεργός τάση του εδάφους

ϕ' : η γωνία τριβής του εδάφους

Η ενεργός τάση δρα φυσιολογικά στο πρανές, σε κάποιο βάθος κάτω από τη διεπιφάνεια νερού-εδάφους, λόγω υδροστατικών συνθηκών και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma'_n = \gamma' z \cos \alpha, \quad (1.4)$$

Επομένως:

$$\tau_f = \gamma' z \cos \alpha \tan \phi', \quad (1.5)$$

Στην αρχική αστοχία η διατμητική τάση που προκαλείται από τη βαρύτητα ισούται με τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Άρα :

$$\gamma' z \sin \alpha = \gamma' z \cos \alpha \tan \phi', \quad (1.6)$$

και επομένως:

$$\alpha = \phi', \quad (1.7)$$

Άρα προκύπτει ότι για μη συνεκτικό έδαφος, η κλίση του πρανούς κατά την αστοχία, ισούται με τη γωνία τριβής του εδάφους, η οποία ονομάζεται και γωνία επαναφοράς.

Οι διατμητικές τάσεις που παράγονται από τους σεισμούς, προκαλούνται από τις οριζόντιες και κάθετες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Οι τάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν αστοχία στο πρανές και αυξάνονται ιδιαίτερα εξαιτίας των οριζόντιων κυρίως επιταχύνσεων. Λόγω της ιδιαίτερης δυσκολίας της περιγραφής της σεισμικής απόκρισης του εδάφους χρησιμοποιείται μία απλοποιημένη προσέγγιση η οποία ονομάζεται «Ψευδοστατική». Αυτή η προσέγγιση υποθέτει πως ένας δεδομένος σεισμός μπορεί να αναπαρασταθεί από μία χαρακτηριστική οριζόντια επιτάχυνση, k , η οποία είναι πολλαπλάσια της βαρυτικής επιτάχυνσης, g , και θεωρείται ότι εφαρμόζεται για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, τέτοιο ώστε οι επαγόμενες τάσεις να θεωρούνται σταθερές.

Έτσι προκύπτει μία σχέση της σεισμικά παραγόμενης διατμητικής τάσης τ_s , η οποία είναι η εξής:

$$\frac{\tau_s}{\gamma' z} = \sin \alpha + \left(\frac{k\gamma}{\gamma'} \right), \quad (1.8)$$

όπου:

γ : το ολικό ειδικό βάρος του εδάφους ($= \gamma' + \text{πυκνότητα του θαλασσινού νερού} : \gamma_w$)

γ' : το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους

z : το βάθος κάτω από την διεπιφάνεια εδάφους-νερού

k : η χαρακτηριστική οριζόντια επιτάχυνση, και

α : κλίση του πρανούς.

Για να προσδιοριστεί η ευστάθεια ενός πρανούς, γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε αυτήν την τάση και στην διατμητική αντοχή του εδάφους.

Επειδή οι σεισμικές δονήσεις εμφανίζονται σε σύντομα χρονικά διαστήματα και η φόρτιση είναι κυκλική, η παραγόμενη πίεση του νερού των πόρων που προκαλείται από τη

διάτμηση είναι αισθητή και δεν μπορεί να παραληφθεί. Επομένως, κατά τη διάρκεια μίας σεισμικής δόνησης, η περιγραφή της διατμητικής τάσης δεν είναι τόσο απλή όσο ήταν στην περίπτωση που περιεγράφηκε παραπάνω. Η προτεινόμενη εξίσωση για την περιγραφή της διατμητικής τάσης σε αστράγγιστες συνθήκες και κυκλική φόρτιση είναι η εξής:

$$\frac{\tau_w}{\gamma'z} = S = A_c A_r S(OCR)^m, \quad (1.9)$$

όπου:

A_c : Διορθωτικός συντελεστής που αφορά τη διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα των ισοτροπικών εργαστηριακών φορτίσεων και της ανισότροπης φόρτισης του πεδίου (συνήθως ίσος με 0,8).

A_r : Διορθωτικός συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται εργαστηριακά μέσω κυκλικών δοκιμών αντοχής (κυμαίνεται από 0,5 για ιλύ έως και πάνω από 1 για άργιλο) .

S : Λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής προς την τάση στερεοποίησης (προσδιορίζεται εργαστηριακά και κυμαίνεται από 0,3 ή λιγότερο για αργιλώδη ιλύ και άργιλο και 1 και πάνω για άμμο και πυκνή ιλύ).

OCR: Βαθμός υπερστερεοποίησης

m : Ιδιότητα του εδάφους (συνήθως ίσο με 0,8)

$(OCR)^m$: Ισούται με 1 για παχιά δείγματα κανονικά στερεοποιημένου εδάφους (δηλαδή αυτών που δεν έχουν προφορτιστεί από προϋπάρχουσες τεκτονικές δυνάμεις ή φορτίσεις).

Τα κύματα προκαλούν αστοχία σε ρηχά κυρίως νερά. Δημιουργούν γειτονικές ζώνες σχετικά υψηλής και χαμηλής πίεσης κάτω από κορυφές πρανών και τάφρων αντίστοιχα. Αυτές, στη συνέχεια, παράγουν ζώνες υψηλής, σχετικά, διατμητικής τάσης ανάμεσα στις κορυφές και τις τάφρους. Η παραγόμενη διατμητική τάση ποικίλει και εναλλάσσεται ανάλογα με τις κατευθύνσεις.

Η σχέση που δίνει τη διατμητική αυτή τάση είναι η εξής:

$$\frac{\tau_w}{\gamma'z} = \sin \alpha + \pi \gamma_w H / \left[\gamma' L \cosh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \right], \quad (1.10)$$

όπου:

γ' : το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους

z : το βάθος κάτω από τη διεπιφάνεια εδάφους- νερού

α : κλίση του πρανούς

γ_w : πυκνότητα του θαλασσινού νερού

H : το ύψος κύματος

L : το μήκος κύματος, και

d : βάθος του νερού.

Επειδή η κυκλική φόρτιση που προκαλείται από τα κύματα είναι αρκετά όμοια με εκείνη που προκαλείται από σεισμό, μπορεί να χρησιμοποιείται και η (9) με τη διαφορά ότι ο συντελεστής A_r θα διαφέρει λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας επιβολής των κυμάτων, οπότε και ενός μεγαλύτερου αριθμού κυκλικών φορτίσεων.

Τέλος, σε μία κατολίσθηση αναφέρεται η τελική θέση της κατολίσθησης (run-out distance), η οποία είναι η οριζόντια απόσταση του άκρου της στέψης του πρανούς από το πιο απομακρυσμένο σημείο που έχουν βρεθεί συντρίμια [5,6,11].

1.3. Εξέλιξη μετά την αστοχία- Κίνδυνοι, επιπτώσεις

Μετά την αστοχία του πρανούς, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τη γεωμορφολογία και τις τάσεις που έχουν αναπτυχθεί, το κομμάτι που έχει αστοχήσει θα σταματήσει σε κάποια μικρή απόσταση από την επιφάνεια διάρρηξης, ή θα εξελιχθεί σε ροή εδάφους, με παρόμοιες ιδιότητες με τη ροή ρευστών, η οποία θα διανύσει μία αρκετά μεγάλη απόσταση. Η ολίσθηση και η ροή είναι τα τελικά στάδια μίας υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, έχει από δυναμικής άποψης, η κίνηση του εδάφους που έχει αστοχήσει. Μελέτες έχουν δείξει ότι η μηχανική των κινήσεων των πρανών που έχουν αστοχήσει είναι εξαιρετικά περίπλοκη και οι εξισώσεις που υπάρχουν για την περιγραφή τέτοιων κινήσεων είναι πολύ περιορισμένες.

Έχει αποδειχθεί ότι η κατηφορική κίνηση του εδάφους κατά την αστοχία είναι ικανή να προκαλέσει τσουνάμι. Όμως λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί το εύρος των τσουνάμι που μπορεί να προκληθούν από τις υποθαλάσσιες κατολίσθησεις. Η μοντελοποίηση κάποιων τσουνάμι που έχουν προκληθεί από κατολίσθησεις, έδειξε ότι μπορεί να δημιουργηθούν μεγάλα ύψη κυμάτων, εκατοντάδων μέτρων, όμως τα συγκεκριμένα μοντέλα εμφανίζουν ευαισθησία στις γεωλογικές παραμέτρους και τις υδροδυναμικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι παραγόμενες προβλέψεις να έχουν μεγάλη αβεβαιότητα και να είναι περιορισμένες.

Τα τσουνάμι που δημιουργούνται εξαιτίας των υποθαλάσσιων κατολίσθησεων έχουν κάποια γενικά κοινά χαρακτηριστικά, όπως ότι έχουν μεγάλες προβολές (run-ups) κοντά στην περιοχή της κατολίσθησης, διαδίδονται σε μικρότερες αποστάσεις συγκριτικά με τα τσουνάμι που προκαλούνται από σεισμούς οπότε συνεπώς έχουν μικρότερα μήκη κύματος, είναι περισσότερο επιρρεπή στην παράκτια διεύρυνση, οπότε έχουν αυξημένη επιτόπια δράση και είναι επιρρεπή και στην ακτινική απόσβεση, οπότε μειώνεται η απομακρυσμένη επίδρασή τους, σε αντίθεση με τα τσουνάμι που δημιουργούνται από σεισμούς, στα οποία η ακτινική απόσβεσή τους είναι ελλιπής. Ακόμη η περιστροφική ολίσθηση του εδάφους, κατά την οποία ένα παχύ μπλοκ ολίσθησης κινείται με μεγάλη ταχύτητα προς τα κάτω, είναι αρκετά πιθανόν να προκαλέσει τσουνάμι, ακόμη και αν η απόσταση μετακίνησης είναι μικρή.

Οι κύριοι παράγοντες μίας κατολίσθησης που συμβάλλουν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός τσουνάμι είναι το μήκος, το πάχος, ο όγκος, η ταχύτητα και η αρχική επιτάχυνση της. Ο καλύτερος δείκτης της πιθανότητας γένεσης ενός τσουνάμι είναι ένας συνδυασμός του όγκου και της αρχικής επιτάχυνσης μίας κατολίσθησης. Επιπλέον το μήκος της ολίσθησης επηρεάζει το μήκος κύματος, το οποίο επηρεάζεται από την απόσταση στην οποία σταματάει η κατολίσθηση. Οι υποθαλάσσιες κατολίσθησεις είναι συνήθως υποκρίσιμες, δηλαδή ο αριθμός Froude, ο οποίος είναι ίσος με το λόγο της ταχύτητας ολίσθησης, προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος, είναι πολύ μικρότερος από 1. Αυτό σημαίνει ότι το τσουνάμι, θα ξεφύγει από την περιοχή που δημιουργεί τα κύματα, περιορίζοντας την συσσώρευση του κύματος.

Η κατολίσθηση σε πιο ρηχά νερά είναι πιο κρίσιμη από τις υπόλοιπες καθώς η απόσταση από την ακτή είναι μικρότερη, επομένως η απόσταση για απόσβεση θα είναι μικρότερη. Επίσης ακόμη πιο επικίνδυνο φαινόμενο είναι όταν ο συνδυασμός σεισμού-κατολίσθησης δημιουργεί τσουνάμι, καθώς οι επιπτώσεις τους μπορούν να συνδυαστούν και το φαινόμενο να ενταθεί σε μεγάλο βαθμό.

Ο κίνδυνος που προέρχεται από τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία, τον τύπο και την κλίμακα της κατολίσθησης. Ακόμη και μικρές σε μέγεθος κατολισθήσεις μπορεί να είναι επικίνδυνες όταν εμφανίζονται κοντά σε παράκτιες περιοχές. Οι κατολισθήσεις απειλούν ανθρώπινες κατασκευές, όπως για παράδειγμα εξέδρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι οποίες κατασκευάζονται σε περιοχές όπου τα πράγματα είναι αρκετά ασταθή. Επιπλέον μπορούν να καταστραφούν υποδομές που βρίσκονται στον βυθό, όπως είναι τα καλώδια ρεύματος και τηλεπικοινωνιών. Τέλος οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν καθίζηση σε παράκτιες περιοχές και εάν προκαλέσουν και τσουνάμι μπορούν να είναι ιδιαίτερα απειλητικές για την ανθρώπινη ζωή καθώς κινδυνεύουν σπίτια, εμπορικά κτίσματα, η οικονομία της περιοχής αλλά και άνθρωποι.[1,2,11,14,15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν κάποιες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που έχουν συμβεί και καταγραφεί στον Ελλαδικό χώρο καθώς και οι αιτίες δημιουργίας τους αλλά και οι επιπτώσεις τους.

2.1 Κατολίσθηση στη Θάσο

Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας στο Βόρειο Αιγαίο δίνει συνεχώς σεισμούς, κάποιες φορές και μεγάλους μεγέθους μέχρι και 7 Richter. Αυτό έχει προκαλέσει και υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στην περιοχή αυτή και συγκεκριμένα στο νησί Θάσος.

Η μορφολογία της περιοχής του Βορείου Αιγαίου, λόγω των συγκρούσεων της Ευρασιατικής και της Ασιατικής πλάκας, έχει υποστεί πολλές αλλαγές κατά τους καιρούς. Η περιοχή αυτή ήταν κυρίως ορεινή κατά τον πρώιμο Καινοζωικό, η οποία κατέρρευσε μετά το τέλος του Ηωκαίνου έως τις αρχές του Ολοκαίνου, λόγω της υποχώρησης της ελληνικής τάφρου προς τα νότια. Από τα τέλη του Μειόκαινου, οι τεκτονικές ολισθήσεις κατά μήκος του συστήματος των ρηγμάτων της Βόρειας Ανατολίας, βοηθούν στην πλευρική διαφυγή της.

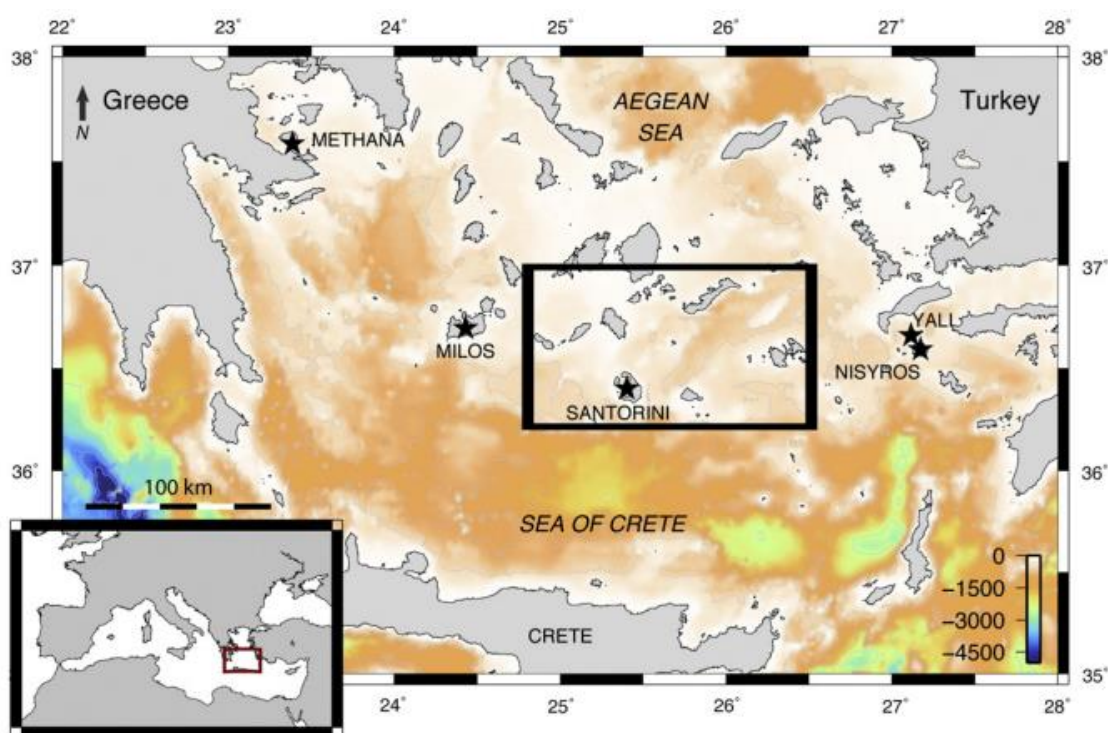
Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας διαφεύγει σε δύο κύρια συστήματα ολίσθησης, τα οποία διαμορφώνουν την μορφολογία του πυθμένα της θάλασσας. Η εποχή δημιουργίας των συστημάτων αυτών εκτιμάται κοντά στο Πλειο-Πλειστόκαινο. Το κύριο τμήμα του ρήγματος εκτείνεται Βόρεια, κατά μήκος του κόλπου του Σάρου, όπου και σχηματίζει ένα σύστημα

Εκεί, με βάση έρευνες βαθυμετρίας που διενεργήθηκαν, η ολίσθηση που συνέβη ήταν περίπου 30 χιλιομέτρων και κατέκλυσε μία περιοχή 85km^2 περίπου. Ο αρχικός όγκος που ολίσθησε, πλήρωσε την επιφάνεια που είχε αστοχήσει και είχε όγκο περίπου $1,85\text{km}^3$. Ο τελικός όγκος που μεταφέρθηκε στο κάτω μέρος της ουλής που δημιουργήθηκε, μετρήθηκε περίπου στα $3,8\text{km}^3$. Η διαφορά στο μέγεθος των δύο αυτών όγκων που κατολίσθησαν, οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της κατολίσθησης, η ολίσθηση του εδάφους εμπλουτιζόταν και με ιζήματα από το πρηνές. Η ολίσθηση ήταν μεταθετική πάνω σε ένα ασθενές λασπώδες στρώμα που εναποτέθηκε στο πρηνές 170-245 χρόνια πριν [14,20].

2.2 Κατολίσθηση στη Σαντορίνη

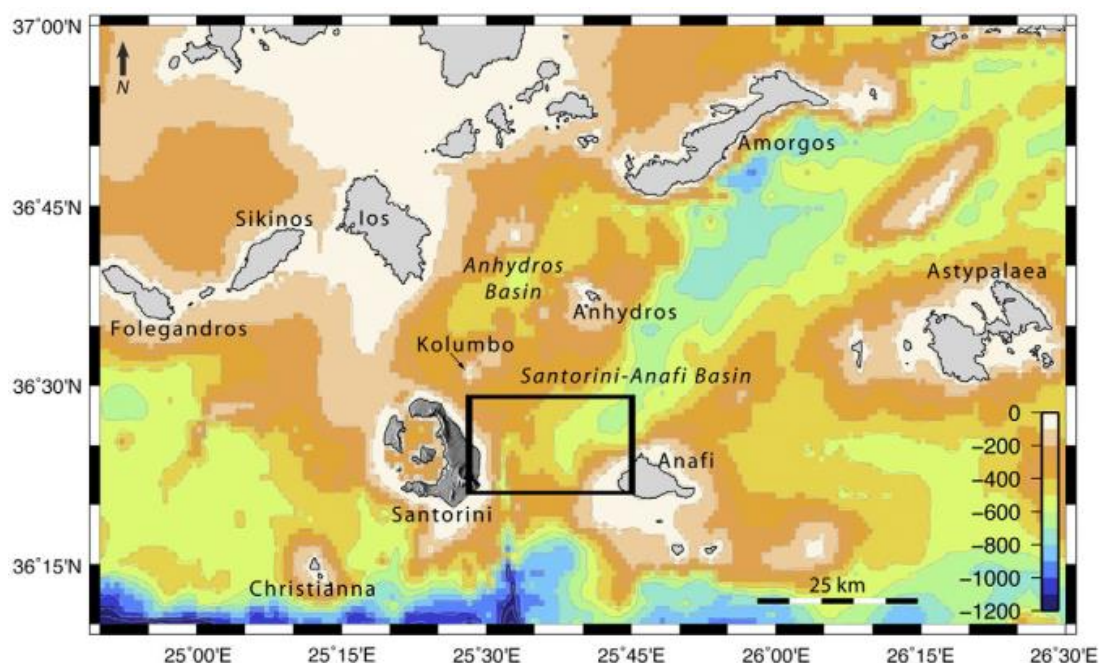
2.2.1 Γενικά

Η Σαντορίνη βρίσκεται στο κέντρο του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου και έχουν λάβει χώρα σε αυτήν κάποιες από τις μεγαλύτερες ηφαιστειακές εκρήξεις της Μεσογείου. Το Ελληνικό τόξο ξεκίνησε να δημιουργείται από την βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την μικρο-πλάκα του Αιγαίου (που είναι τμήμα της Ευρασιατικής πλάκας) και σήμερα καλύπτει μία έκταση από την Ελλάδα έως την Τουρκία. Το νησί είναι ενεργό ηφαιστειακά από τις αρχές του Πλειστόκαινου με περιόδους ηρεμίας και περιόδους ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η τελευταία μεγάλη έκρηξη ήταν η Μινωική έκρηξη, η οποία συνέβη περίπου 3600 χρόνια πριν, όπου εκτιμάται ότι εκτοξεύτηκαν περίπου 60 km^3 πυκνού ηφαιστειακού υλικού. Οι ηφαιστειακές αλλά και οι τεκτονικές δραστηριότητες της γύρω περιοχής έχουν διαμορφώσει τόσο τη χερσαία όσο και την υποθαλάσσια δομή του νησιού. Στην περιοχή γύρω από τη Σαντορίνη, η σεισμική δραστηριότητα επικεντρώνεται κατά μήκος ενός συστήματος ρηγμάτων βορειοανατολικής διεύθυνσης, τα οποία υπερκαλύπτουν παλαιότερα ρήγματα. Λόγω της υποβύθισης των πλακών και της αλλαγής του προσανατολισμού των ρηγμάτων, στην περιοχή αυτή υπάρχει υψηλός ρυθμός σεισμικής δραστηριότητας. Αυτοί οι σεισμοί προκαλούν σημαντικές μετακινήσεις ιζημάτων αλλά και αστοχία στις λεκάνες γύρω από τη Σαντορίνη. Επιπλέον, βρέθηκε πως οι παράκτιες και οι υποθαλάσσιες αστοχίες των πρανών προκάλεσαν τσουνάμι που επηρέασαν το Αιγαίο αλλά και την ανατολική Μεσόγειο [17].



Εικόνα 6: Χάρτης του Αιγαίου Πελάγους. Με τα αστέρια σημειώνονται οι περιοχές του Ελληνικού Ηφαιστειακού τόξου και με το ορθογώνιο περιοχή της κατολίσθησης [17].

Έχει υποτεθεί πως η μεγαλύτερη υποθαλάσσια κατολίσθηση, στην περιοχή ανάμεσα στη Σαντορίνη και την Αμοργό, έχει προκληθεί από το σεισμό που έγινε στις 9 Ιουλίου 1956. Ο κύριος σεισμός είχε μέγεθος 7,5 Richter, ενώ ο μεγαλύτερος μετασεισμός έγινε 13 λεπτά αργότερα και είχε μέγεθος 7,2 Richter. Το επίκεντρο του κύριου σεισμού ήταν 20km νότια της Αμοργού και το επίκεντρο του μετασεισμού ήταν βορειοανατολικά της Σαντορίνης, πολύ κοντά στην τοποθεσία της υποθαλάσσιας κατολίσθησης.



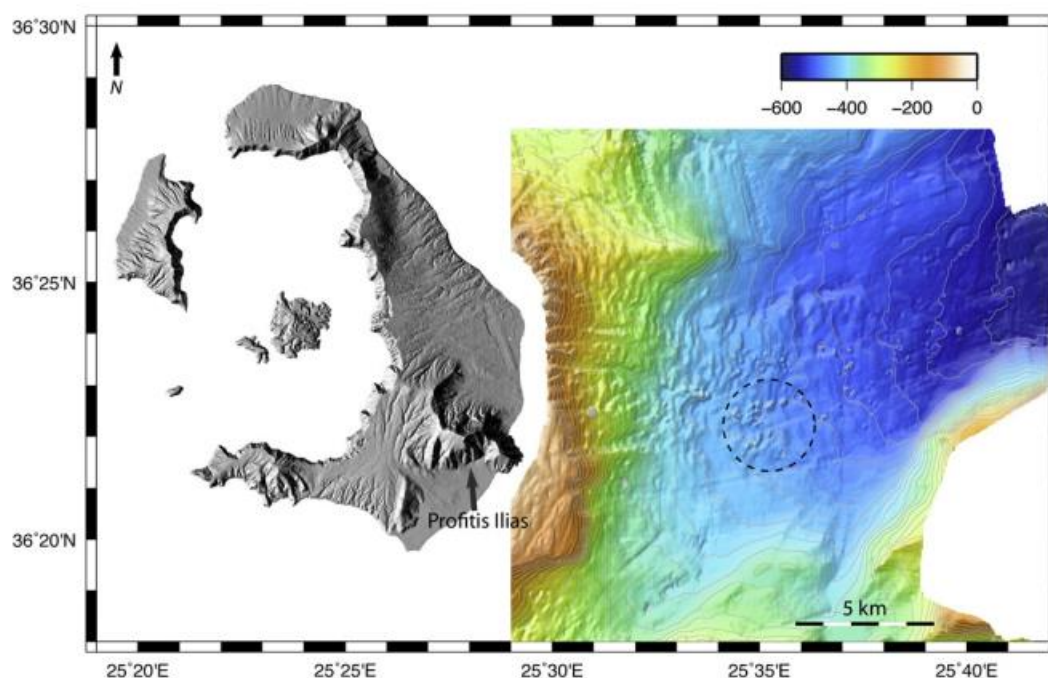
Εικόνα 7: Χαρτογραφική απεικόνιση της Σαντορίνης και της ευρύτερης περιοχής. Το μαύρο ορθογώνιο απεικονίζει την περιοχή όπου έγινε η κατολίσθηση [17].

Με τη χρήση της σεισμικής σκιαγράφησης, εντοπίστηκε μία πολύ μεγάλη καταβύθιση ιζημάτων στην περιοχή της Σαντορίνης και της λεκάνης της Ανάφης. Η περιοχή που κάλυψε η κατολίσθηση είχε πλάτος 6km, μήκος 24km και εκτιμάται ότι είχε όγκο $3,6 \times 10^6 \text{m}^3$. Υποστηρίζεται ότι η κατολίσθηση αυτή προκλήθηκε από τον κύριο σεισμό ή/και τον μετασεισμό και προκάλεσε σε συνδυασμό με το σεισμό και τσουνάμι. Το τσουνάμι αυτό επηρέασε νησιά σε όλο το νότιο Αιγαίο, μεταξύ αυτών η Αμοργός και η Αστυπάλαια, όπου το ύψος των κυμάτων που παρατηρήθηκαν κυμαινόταν από 20 έως 25 μέτρα. Έφτασε μέχρι και την Κρήτη, όπου το ύψος των κυμάτων ήταν ανάμεσα σε 1 και 2m. Το τσουνάμι αυτό είχε ως αποτέλεσμα, πολλοί άνθρωποι και ζώα να σκοτωθούν, εκτάσεις γης και λιμάνια να καταστραφούν και πολλά σκάφη και βάρκες να βυθιστούν.

Από το 2006 έως το 2010 έλαβαν χώρα διάφορες έρευνες στην περιοχή ώστε να διερευνηθεί η γεωμορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα της περιοχής. Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν από την έρευνα της περιοχής, βρέθηκε ότι η απόθεση των υλικών προήλθε από μερική κατάρρευση, πιθανώς μεικτής φύσεως, περιστροφικής και μεταφορικής, με πιθανές πτώσεις βράχων, η οποία εξελίχθηκε σε "χιονοστιβάδα" συντρυμιών (κορημάτων) και ίσως και σε ροή βαρύτητας [17].

2.2.2 Μορφολογία των αποθέσεων

Μέσω ερευνών βρέθηκε ότι η μορφολογία της επιφάνειας των αποθέσεων, αποτελείται από πάνω από 200 μπλοκ, με μέγεθος που ποικίλει από λιγότερο από 1m έως 400m σε μήκος και πλάτος. Η επιφάνεια που καλύπτουν οι αποθέσεις αυτές είναι περίπου 6km σε πλάτος και 20km σε μήκος. Οι αποθέσεις προσανατολίζονται προς τα ανατολικά και περιορίζονται από την περιβάλλουσα μορφολογία. Τα μπλοκ τείνουν να εμφανίζονται σε ομάδες, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται υψώματα διαμέτρου της τάξεως δεκάδων έως εκατοντάδων μέτρων. Στο κέντρο της περιοχής απόθεσης, υπάρχει μία κύρια συγκέντρωση μπλοκ, η οποία φτάνει τα 75m σε πάχος. Τα μπλοκ έχουν ύψος 10-20 m περίπου, με κατακόρυφες πλαγιές και επίπεδες κορυφές, ενώ φαίνεται να αποτελούνται από πυροκλαστικές αποθέσεις, οι οποίες είναι πιθανόν να προέρχονται από τη Μινωική έκρηξη. Η “χιονοστιβάδα” συντριμμίων χαρακτηρίζεται από χαμηλές κλίσεις, η μέγιστη εκ των οποίων είναι ίση με $1,6^\circ$ και φαίνεται να προέρχεται από την κατάρρευση στην περιοχή του Προφήτη Ηλία, που φαίνεται στην εικόνα 7, αν και σε εκείνη την περιοχή δεν εμφανίζονται ηφαιστειακά πετρώματα [17].



Εικόνα 8: Χάρτης της περιοχής της κατολίσθησης. Στον κύκλο φαίνεται η περιοχή στην οποία βρέθηκε το μεγαλύτερο μέγεθος των αποθέσεων [17].

Η τελική θέση της συγκεκριμένης κατολίσθησης βρέθηκε πως είναι τουλάχιστον 18km σε απόσταση, ίσως και μεγαλύτερή, από το σημείο έναρξης. Συγκρίνοντας τη συνολική αλλαγή στο ύψος του πρηνούς προς την τελική θέση της κατολίσθησης (run out distance), H/L, βρέθηκε ένας δείκτης της συνολικής κινητικότητας του πρηνούς, ο οποίος κυμαινόταν ανάμεσα σε 0,025-0,033, για L από 18-24km. Ακόμη, η τελική θέση των μπλοκ βρέθηκε πως είναι σε απόσταση 15km, ενώ δεν αποκλείεται, λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζουν οι έρευνες αυτές, να βρεθούν μπλοκ και σε μεγαλύτερες των 15km αποστάσεις. Τα περισσότερα μπλοκ βρίσκονται σε απόσταση 8km από το σημείο της κατολίσθησης και τα μεγαλύτερα τείνουν να συσσωρεύονται σε μικρές αποστάσεις από το σημείο αυτό.

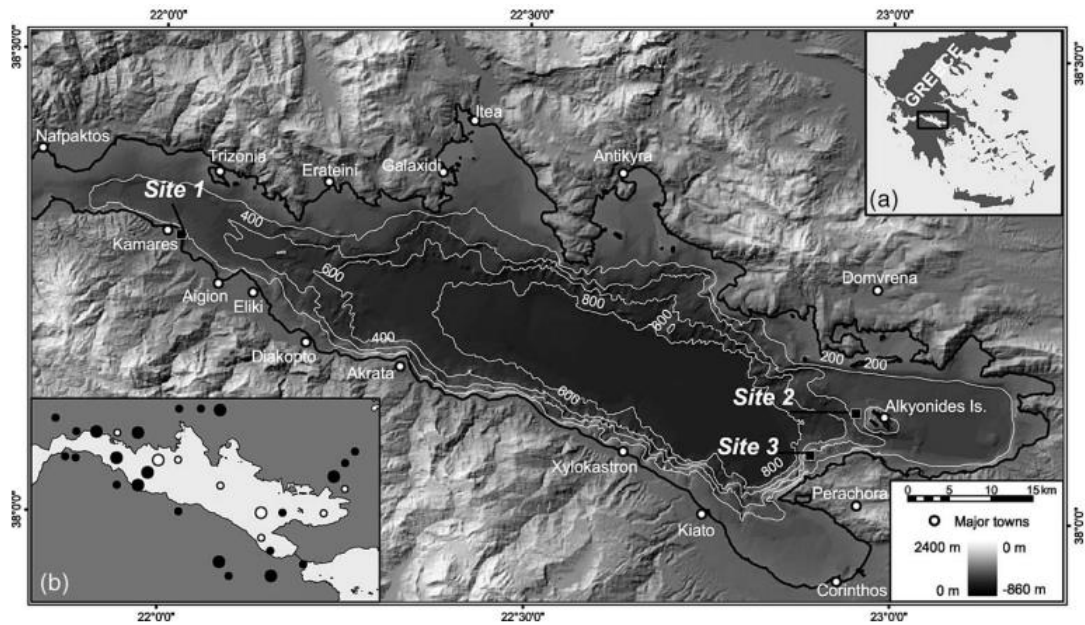
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα συμπεραίνεται πως η κατολίσθηση αποτελούνταν από δύο τουλάχιστον μέρη: ένα πυκνότερο μέρος αποτελούμενο από μπλοκ και ένα λεπτότερο μέρος με μεγαλύτερη τελική θέση ολίσθησης. Επομένως, είναι αρκετά πιθανόν ότι μέρος της μάζας που ολίσθησε υπέστη μηχανική μεταμόρφωση και καταστροφή κατά τη διάρκεια της κατολίσθησης [17].

2.3 Κατολισθήσεις στον Κορινθιακό Κόλπο

2.3.1 Γενικά

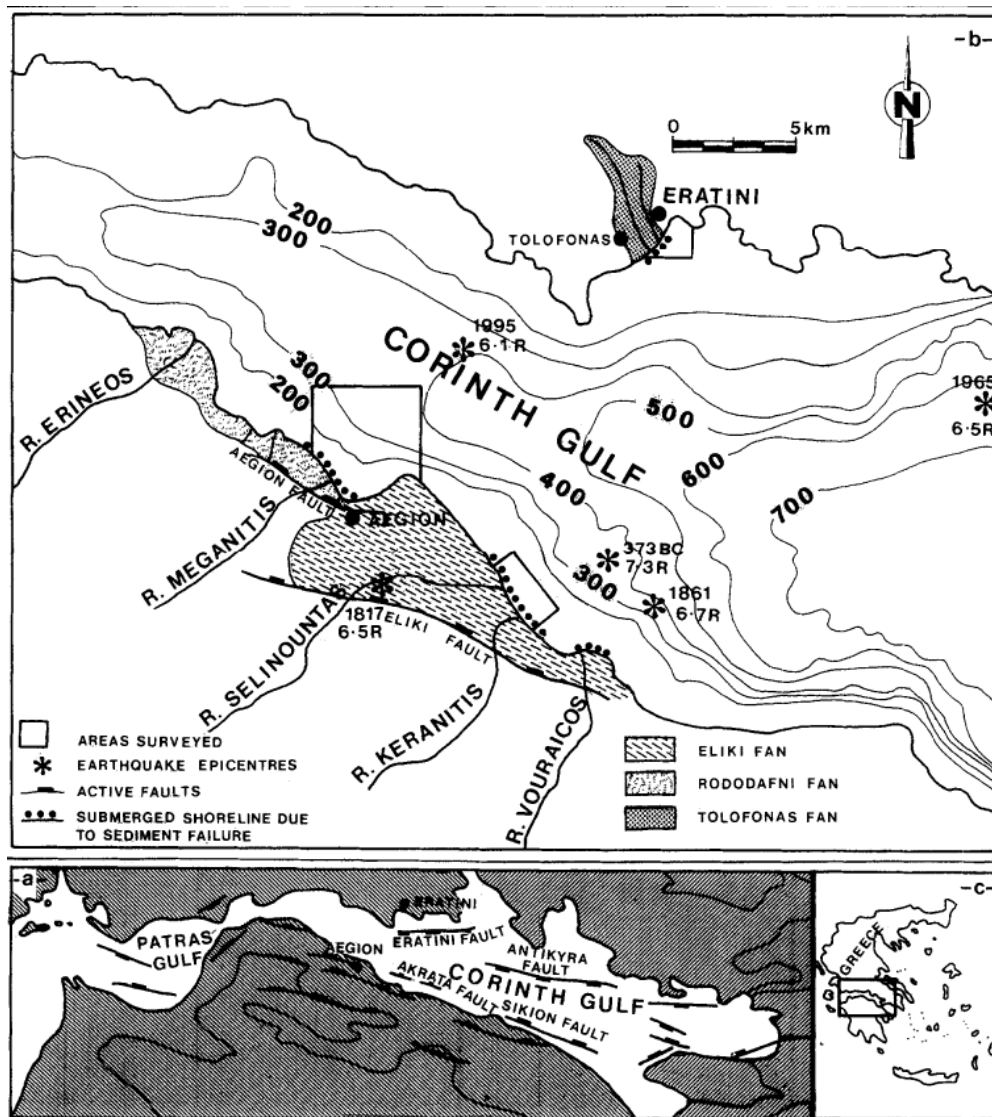
Ο Κορινθιακός κόλπος είναι μία κλειστή θαλάσσια λεκάνη στην κεντρική Ελλάδα, η οποία οριοθετείται στα νότια από ένα σημαντικό σύστημα ρηγμάτων, στα βόρεια από ένα αντιθετικό υποθαλάσσιο σύστημα ρηγμάτων και είναι ιδιαίτερα γνωστός για την έντονη σεισμική του δραστηριότητα αλλά και για τα διάφορα τσουνάμι που έχουν προκληθεί εκεί είτε λόγω σεισμών είτε λόγω υποθαλάσσιων κατολισθήσεων.

Ο Κόλπος της Κορίνθου έχει μήκος 100km, πλάτος 25km και μέγιστο βάθος 900m στο κέντρο του και αποτελείται από κλίσεις πυθμένα που κυμαίνονται μεταξύ 8°-25°. Τα ρήγματα που οριοθετούν την λεκάνη ελέγχουν την έκταση της υφαλοκρηπίδας, η οποία είναι ανεπαρκώς ανεπτυγμένη, εκτείνεται σε αποστάσεις 20-2000m και έχει βάθος 100-200m. Στα βόρεια και νότια όρια της λεκάνης βρίσκονται δέλτα μικρού και μεσαίου μεγέθους, τα οποία αποτελούν το κύριο μέσο εισροής κλαστικών ιζημάτων στη λεκάνη. Η γενική μορφολογία της λεκάνης είναι παρόμοια με τις λεκάνες τύπου Φιορδ που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Ο Κόλπος της Κορίνθου θεωρείται ότι είναι ο πιο ενεργός τομέας του ρήγματος της Κορίνθου, ο οποίος υφίσταται επέκταση σε βαθμό 4-14mm/year. Ο μεγάλος αυτός ρυθμός επέκτασης που δέχεται η λεκάνη συνοδεύεται από πολυάριθμα παράκτια ρήγματα και έχει ως συνέπεια την έντονη σεισμικότητα στην περιοχή, όπου τα τελευταία 600 χρόνια καταγράφηκαν 30 σεισμοί άνω των 6 Richter. Τα παραπάνω ρήγματα διευκολύνουν την ανάπτυξη υποθαλάσσιων αστοχιών στις πλαγιές της λεκάνης, ειδικά σε περιοχές όπου αναπτύσσονται δέλτα ποταμών, όπου οι υψηλοί ρυθμοί εισροής ιζημάτων σε συνδυασμό με τους σεισμούς και τις απότομες κλίσεις δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη υποθαλάσσιων κατολισθήσεων [15].



Εικόνα 9: Χαρτογραφική απεικόνιση του Κορινθιακού Κόλπου [15].

Η παράκτια και χερσαία μορφολογία των πρανών νότια της λεκάνης είναι αποτέλεσμα της ανύψωσης και της καθίζησης ενός αριθμού διακριτών τμημάτων των ρηγμάτων. Χονδρόκοκκα, αλλουβιακά δέλτα έχουν αναπτυχθεί στην νότια ακτογραμμή, της οποίας ένα μέρος της τα τελευταία χρόνια υποχωρεί. Τα δέλτα της Ελίκης και της Ροδοδάφνης στη νότια ακτογραμμή αποτελούνται κυρίως από υλικά μεγέθους χαλικιού που παρεμβάλλονται από άμμο και ιλυώδη άμμο και βρίσκονται στα τοιχώματα των ενεργών ρηγμάτων της Ελίκης και του Αιγίου αντίστοιχα. Το δέλτα της Ελίκης καλύπτει μία επιφάνεια της τάξεως των 35km² και προέκυψε από την ενοποίηση τριών δέλτα μεγάλων ποταμών, του Βουραϊκού, του Σελινούντα και του Κερανίτη. Το δέλτα της Ροδοδάφνης έχει έκταση περίπου 20km² και προέκυψε από τη συνένωση δύο αρκετά μικρότερων ποταμών, του Ερινέου και του Μεγανίτη. Το δέλτα του Τολοφώνα βρίσκεται στη βόρεια ακτογραμμή, έχει έκταση 3km² περίπου, τέμνεται από 2 ποτάμια και σχηματίστηκε στις εκβολές μίας ορεινής κοιλάδας σε μία αναδυόμενη ακτογραμμή που βρίσκεται στη βάση του ενεργού ρήγματος της Ερατεινής [15,16].



Εικόνα 10: Χαρτογραφική απεικόνιση του Κορινθιακού Κόλπου και των Δέλτα που εκβάλλουν σε αυτόν [19].

2.3.2 Κατολίσθηση στο δέλτα του Μεγανίτη ποταμού

Έρευνες που διεξήχθησαν στον Μεγανίτη ποταμό έδειξαν αστάθεια στα πρηνή, η οποία συνδέεται με την στρωματοποιημένη ακολουθία του Ολοκαίνου που καλύπτει των κώνο του δέλτα. Η αστοχία που προκλήθηκε στην περιοχή αυτή επηρέασε το ανατολικό τοίχωμα που οριοθετεί το ενεργό υποθαλάσσιο κανάλι, είχε μέγιστο πλάτος 150m και μέγιστο μήκος 1200m περίπου, συνολική έκταση 200.000m² και σχήμα τοξοειδές. Η αστοχία έγινε πάνω από μία καλά ορισμένη επιφάνεια, παράλληλη με το θαλάσσιο πυθμένα. Νότια της, τα πρώτα 5m του καλά διαστρωμένου επιφανειακού ιζήματος επηρεάστηκαν από μία περιστροφική ολίσθηση πολλαπλών μπλοκ, τα οποία σχημάτισαν μία βαθμωτή μορφολογία στο θαλάσσιο πυθμένα. Τα επιμέρους επίπεδα αστοχίας απέχουν μεταξύ τους κατά 5m και εκτείνονται κάτω από τον πυθμένα σε βάθος 5m, όπου και σχηματίζουν ένα καλά ορισμένο επίπεδο ολίσθησης, παράλληλο στον πυθμένα και στα στρώματα του πρηνούς. Η οριζόντια

μετατόπιση εκτιμήθηκε στο 161% του μήκους των επιπέδων αστοχίας, υποθέτοντας ότι αυτά ήταν επίπεδα, ενώ η κατακόρυφη μετατόπιση από μπλοκ σε μπλοκ κυμαίνεται από 1-2,5m. Τα μπλοκ που προηγούνται καθοδικά φαίνεται πως έχουν αποκολληθεί και αποσυντεθεί, αφήνοντας έτσι χώρο για να δεχθεί το πρηνές τη μεγάλη ποσότητα της οριζόντιας μετατόπισης προς τα πάνω. Αυτό φανερώνει πως η αστοχία ήταν παλινδρομική και πως προκλήθηκε από την έλλειψη πλευρικής στήριξης, η οποία επέτρεψε τα μπλοκ που βρισκότουσαν στη στέψη του πρηνούς να κινηθούν και να περιστραφούν προς τα κάτω [19].

Έρευνες το 1996 στο θαλάσσιο πυθμένα σε βάθη 20-70m έδειξαν τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Απότομες κατωφρείες (γκρεμοί) (Scarps) με προεξοχές ελαφρώς στερεοποιημένου λασπόλιθου ή λιθοποιημένης άμμου.

β) Παράλληλες ζώνες γκρίζας άμμου, οι οποίες καλύπτουν τοπικά την επιφάνεια του πυθμένα. Οι ζώνες αυτές έχουν πάχος λιγότερο από 1cm, έχουν απλωθεί επάνω σε σταθερά ιζήματα και φύκια και έχουν αρκετές ομοιότητες με τις αμμώδεις ζώνες της στεριάς, κάτι το οποίο υποδηλώνει πως σχηματίστηκαν εξαιτίας της ρευστοποίησης ενός υπόγειου αμμώδους ορίζοντα και κατά συνέπεια συνδέονται με την απελευθέρωση άμμου.

γ) Στα βόρεια της περιοχής της αστοχίας, το επίπεδο ολίσθησης καλύπτεται από αποθέσεις οι οποίες μοιάζουν με στοιβαγμένα φύλλα ή/και κάτι που μοιάζει με φακούς. Οι αποθέσεις αυτές είναι μικρές σε μέγεθος, επικαλύπτονται μεταξύ τους και καλύπτουν το κατώτερο τμήμα της στέψης του πρηνούς. Αυτό υποδηλώνει πως μετά την κύρια κατολίσθηση το τμήμα που αποκολλήθηκε, αποσυντέθηκε και ολίσθησε προς τα κάτω, τα αποσυνθεμένα τμήματα με τη σειρά τους αποσυντέθηκαν και αυτό οδήγησε στη δημιουργία βαρυτικών ρωών.

δ) Στα πλευρικά τοιχώματα των πρηνών υπάρχουν στερεοποιημένα και καλά στρωματοποιημένα ιζήματα.

ε) Απουσία βιογενούς κάλυψης στην επιφάνεια των αποθέσεων, γεγονός που υποδηλώνει πως το φαινόμενο ήταν πρόσφατο.

στ) Απουσία διαβάθμισης των υλικών

ζ) Οι αποθέσεις κατέληξαν σε μικρή απόσταση από το πρηνές.

2.3.3 Κατολίσθηση στο δέλτα της Ελίκης

Σεισμικά προφίλ στην περιοχή ανάμεσα στους ποταμούς Σελινούντα και Κερανίτη, που έχει επηρεαστεί από περιστροφικές ολισθήσεις, έδειξαν ότι η χερσαία αστάθεια εξαπλώθηκε και παράκτια και επηρέασε το ανώτερο τμήμα του δέλτα. Το τμήμα του δέλτα που αστόχησε εκτείνεται παράλληλα στην ακτογραμμή, καλύπτει μία επιφάνεια περίπου 0,6km² και ο όγκος της μάζας που αστόχησε εκτιμάται ότι είναι 3x10⁶m³. Έρευνες στην περιοχή έδειξαν ότι η ολίσθηση ήταν μία σύνθετη, χαμηλής γωνίας, μεταθετική ολίσθηση, με βάθος μικρότερο από 5m και ότι συνέβη πάνω από ένα μόνο βασικό επίπεδο ολίσθησης. Μέσα στην ολισθαίνουσα μάζα υπάρχουν ζώνες με διάφορα μοτίβα δείχνοντας ότι η μάζα που αστόχησε υπέστη διάφορα είδη παραμόρφωσης κατά τη μεταφορά. Τα βόρεια και νότια περιθώρια είναι αρκετά παραμορφωμένα και διαταραγμένα, ενώ το κεντρικό τμήμα παραμένει σχεδόν ακέραιο.

Βόρεια του πρηνούς που αστόχησε, βρέθηκε ένα μη ομαλά αναπτυγμένο κύριο σώμα ολίσθησης, το οποίο ακολουθείται από μία καλά αναπτυγμένη ζώνη συμπίεσης στον πόδα του πρηνούς. Το άνω μέρος της ζώνης συμπίεσης αποτελείται από ρήγματα, τα οποία περιέχουν πλαστικά παραμορφωμένα μπλοκ εδάφους και από ομογενοποιημένα ιζήματα. Το

κάτω μέρος της ζώνης συμπίεσης αποτελείται από έναν λοφώδη πυθμένα, του οποίου τα εσωτερικά στρώματα είναι διαταραγμένα. Αυτό δείχνει πλαστική παραμόρφωση. Στη νότια πλευρά του πρηνούς παρατηρήθηκε ότι το έδαφος που αστόχησε ήταν έντονα, πλαστικά παραμορφωμένο, συγκριτικά με τη νότια πλευρά. Επίσης παρατηρήθηκαν μεμονωμένοι σωροί ιζημάτων με ύψος μικρότερο από 1m και πλάτους από 2-10m, εκ των οποίων οι μεγαλύτεροι είχαν σχεδόν αδιατάρακτα εσωτερικά στρώματα.

Σε όλη την έκταση του Δέλτα εντοπίστηκε παρουσία αερίου σε μορφή φυσαλίδων ή/και έντονες αλλαγές στον τύπο των ιζημάτων. Πολλοί ψαράδες δήλωσαν πως αμέσως μετά το σεισμό, εμφανίστηκαν φυσαλίδες στην επιφάνεια της θάλασσας και πως οι άγκυρες των καραβιών που υπήρχαν στην περιοχή μετακινήθηκαν. Αυτό έγινε λόγω της κατολίσθησης, η οποία προκάλεσε αλλαγές στην μορφολογία του πυθμένα [19].

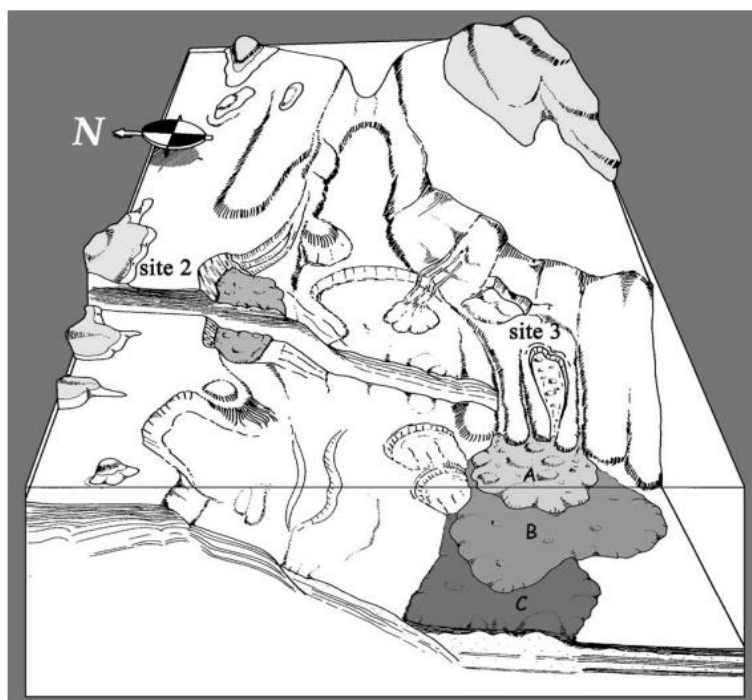
2.3.4. Κατολίσθηση στο δέλτα της Ερατεινής

Στο δέλτα της Ερατεινής, έρευνες έδειξαν ότι επηρεάστηκαν δύο περιοχές από την αστοχία υποθαλάσσιων πρηνών. Στην πρώτη περιοχή, μία επιφάνεια 60.000m² επηρεάστηκε από την περιστροφική ολίσθηση πολλαπλών εδαφικών μπλοκ, ενώ στη δεύτερη αναπτύχθηκε μία επιμηκυμένη επιφάνεια ολίσθησης, η οποία καλύπτει περίπου 20.000m² του πυθμένα. Ακόμη βρέθηκε ότι το ανώτερο τμήμα ηλικίας Ολοκαίνου, που έχει πάχος περίπου 6m, χωρίστηκε σε διακριτά και συνεκτικά μπλοκ. Επιπλέον, η κυματώδης μορφολογία της επιφάνειας δείχνει ότι το ίζημα μαλάκωσε και είχε μικρή κινητικότητα. Υπήρχαν διαταραγμένα στρώματα σε αραιά παρεμβαλλόμενους αργιλόλιθους και ψαμμίτες, τα οποία οφείλονταν σε μερικώς υγροποιημένες ροές εδάφους, όμως σε αυτά δεν υπήρξε κάποια κατηφορική κίνηση και εάν υπήρξε ήταν πολύ μικρή [19].

2.3.5. Κατολίσθηση στις Αλκυονίδες νήσους και τη χερσόνησο της Περαχώρας.

Στα ανατολικά του Κορινθιακού Κόλπου, ανοιχτά των Αλκυονίδων νήσων και της χερσονήσου της Περαχώρας, έχουν αναφερθεί πολλές υποθαλάσσιες κατολίσθήσεις. Έρευνες που διεξήχθησαν το 1993 έδειξαν πως στο μέσο της δυτικής πλαγιάς των Αλκυονίδων νήσων, υπάρχει μια ζώνη εκκένωσης υποθαλάσσιας κατολίσθησης που βρίσκεται πάνω από μία πλαγιά κλίσεως 15°, η οποία έχει μήκος 900m και πλάτος 1800m. Γύρω από αυτή βρίσκονται απότομα, σχεδόν κάθετα πλευρικά τοιχώματα, μέσου ύψους 40m, τα οποία περιορίζουν την έκτασή της. Λόγω απουσίας οποιασδήποτε κάλυψης από ίζημα και μικρών ανωμαλιών στο επίπεδο της ολίσθησης, βγήκε το συμπέρασμα πως η κατολίσθηση ήταν πρόσφατη.

Στη βάση της πλαγιάς της χερσονήσου της Περαχώρας, χαρτογραφήθηκαν 3 διαδοχικές και μερικώς στοιβαγμένες μάζες των προϊόντων της αστοχίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Η πρώτη είχε όγκο 0,08km³, η δεύτερη 0,12 km³ και η τρίτη 0,15 km³. Οι αποθέσεις αυτές καλύπτονται από καλά στρωματοποιημένα ιζήματα ημιπελαγικής ή τουρβιδιτικής προελεύσεως, πάχους 2,5-5m. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο μέσος όρος του ρυθμού καθιζήσεως στον Κορινθιακό κόλπο είναι 1,8mm/year, η υποθαλάσσια κατολίσθηση έγινε 1400-2800 χρόνια πριν [15,16,19].



Εικόνα 11: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατολίσθησης στις Αλκυονίδες και την Περαχώρα. Ως site 2 ορίζεται η γεωμετρία της ζώνης εκκένωσης της κατολίσθησης και ως site 3 η περιοχή εναπόθεσης των ιζημάτων [15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ FLAC SLOPE

3.1. Γενικά

Το FLAC/Slope είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών και αποτελεί ένα υπό-πρόγραμμα του FLAC, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών. Παρόλο που οι δυνατότητες του είναι πολύ πιο περιορισμένες συγκριτικά με το FLAC, είναι αρκετά εύχρηστο, απλό και φιλικό προς τον χρήστη. Αυτό το πρόγραμμα λειτουργεί αποκλειστικά από το γραφικό περιβάλλον του FLAC, και παρέχει τη δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας μοντέλων προσομοίωσης εδαφικών ή/και βραχωδών πρανών, καθώς και την γρήγορη επίλυση της κατάστασης της ευστάθειας τους.

Το FLAC/Slope είναι ένα εναλλακτικό πρόγραμμα υπολογισμού των συντελεστών ασφαλείας, συγκριτικά με τα συνηθισμένα, απλά προγράμματα «οριακής ισορροπίας». Στα «παραδοσιακά προγράμματα» που βασίζονται στη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, χρησιμοποιείται ένα προσεγγιστικό σχήμα, το οποίο συνήθως βασίζεται στη μέθοδο των τεμαχίων, όπου και γίνονται κάποιες παραδοχές (π.χ. η κλίση και η θέση στην οποία ασκούνται οι εφαρμοζόμενες στο πρανές δράσεις). Έπειτα παίρνοντας διάφορους συνδυασμούς επιφανειών αστοχίας, επιλέγεται εκείνη που εμφανίζει το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας. Η ισορροπία στα προγράμματα αυτά, επιτυγχάνεται μόνο σε ένα εξιδανικευμένο σύνολο επιφανειών. Αντιθέτως, το FLAC/Slope χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία απομείωσης της αντοχής (strength reduction technique), η οποία εφαρμόζεται κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, και παρέχει μία ολοκληρωμένη λύση των συζευγμένων τάσεων/μετατοπίσεων, εξισώσεων ισορροπίας και καταστατικών εξισώσεων. Με βάση ένα σύνολο ιδιοτήτων, το σύστημα ορίζεται ως σταθερό ή ως ασταθές. Έπειτα, μία σειρά προσομοιώσεων εκτελείται αυτόματα, αλλάζοντας ταυτόχρονα τις ιδιότητες αντοχής (τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής). Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας που αντιστοιχεί στο σημείο ευστάθειας και προσδιορίζεται η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας (επιφάνεια ολίσθησης).

Το FLAC/Slope απαιτεί περισσότερο χρόνο για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού, συγκριτικά με τα κλασικά προγράμματα οριακής ισορροπίας. Ωστόσο, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις ταχύτητες επεξεργασίας των υπολογιστών, μπορούν να βρεθούν λύσεις σε αρκετά ικανοποιητικά χρονικά διαστήματα. Αυτό καθιστά το FLAC/Slope μία πρακτική εναλλακτική στα προγράμματα οριακής ισορροπίας και παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με μία λύση οριακής ισορροπίας. Κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

1. Οποιαδήποτε μορφή αστοχίας αναπτύσσεται φυσικά καθιστώντας μη απαραίτητο τον καθορισμό, εκ των προτέρων, του εύρους των δοκιμαστικών επιφανειών.
2. Δεν χρειάζεται να εισάγονται, ως δεδομένα εισόδου, τεχνητές παράμετροι (π.χ. συναρτήσεις για τις γωνίες δύναμης μεταξύ των επιφανειών).
3. Πολλαπλές επιφάνειες αστοχίας (ή σύνθετες εσωτερικές αστοχίες) μπορούν να εξελιχθούν φυσικά, εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες.
4. Η δομική αλληλεπίδραση μοντελοποιείται ρεαλιστικά (π.χ. γεωπλέγματα, αγκύρια), ως πλήρως συζευγμένα παραμορφωμένα στοιχεία και όχι ως απλές ισοδύναμες δράσεις
5. Η λύση αποτελείται από μηχανισμούς, οι οποίοι είναι εφικτοί κινηματικά (αφού η μέθοδος της οριακής ισορροπίας μελετά μόνο τις δυνάμεις και όχι τις μετατοπίσεις).

Η ανάλυση ευστάθειας πραγματοποιείται με την τεχνική «απομείωσης αντοχής» (strength reduction technique).

Το FLAC/Slope μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών, ώστε να αξιολογηθεί η ευστάθεια των πρανών. Κάθε συνθήκη μπορεί να οριστεί από ξεχωριστά γραφικά εργαλεία [21].

3.2 Τεχνική “απομείωσης της αντοχής”

Η τεχνική «απομείωσης της αντοχής» χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού, μειώνοντας σταδιακά τη διατμητική αντοχή του υλικού, έως ότου επέλθει στο πρανές κατάσταση οριακής ισορροπίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται, κυρίως, με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει ως εξής:

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c, \quad (3.1)$$

$$\varphi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}}\right) \tan\varphi, \quad (3.2)$$

Όπου:

c^{trial} : Δοκιμαστική συνοχή του πρανού

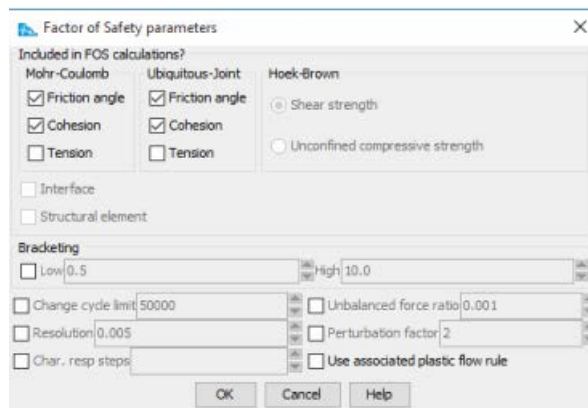
F^{trial} : Δοκιμαστικός συντελεστής αστοχίας

c : Η συνοχή του πρανού

φ^{trial} : Δοκιμαστική γωνία τριβής του πρανού

φ : Η γωνία τριβής του πρανού

Τις περισσότερες φορές, γίνεται μία σειρά αναλύσεων χρησιμοποιώντας δοκιμαστικές τιμές του συντελεστή F^{trial} για τη μείωση της γωνίας τριβής, φ , και της συνοχής, c , έως ότου επέλθει η αστοχία του πρανού. Εάν το πρανές παρουσιάζει αστάθεια από την αρχή των αναλύσεων, τότε οι παράμετροι c και φ αυξάνονται μέχρι να επέλθει οριακή ισορροπία. Στο πρόγραμμα χρησιμοποιείται μία προσέγγιση συγκλίσεως (bracketing). Αρχικά ο κώδικας βρίσκει ένα χαρακτηριστικό χρόνο απόκρισης, ο οποίος είναι ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός βημάτων (Nr), που χαρακτηρίζουν το χρόνο απόκρισης του συστήματος. Ο Nr βρίσκεται θέτοντας τη συνοχή, c , σε μεγάλη τιμή, κάτι το οποίο προκαλεί μεγάλη αλλαγή στις εσωτερικές τάσεις, και υπολογίζεται ο αριθμός των βημάτων που απαιτείται για να επιστρέψει το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας. Ένα μέγιστο όριο 50.000 ορίζεται ως προεπιλογή για τον Nr. Εάν δεν επέλθει ισορροπία του προσομοιώματος εντός του ορίου αυτού, θα σταματήσει η εκτέλεση και ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας δεν θα ολοκληρωθεί. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να επανεξετασθούν και να αλλάξουν κάποιες από τις παραμέτρους που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο. Εάν ο Nr δεν βρεθεί μέσα στο όριο αυτό, το όριο των βημάτων μπορεί να αυξηθεί επιλέγοντας το Change cycle limit στο παράθυρο διαλόγου του συντελεστή ασφαλείας, όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Επίσης, είναι δυνατό να οριστεί και η τιμή του Nr επιλέγοντας το Char. resp steps στο ίδιο παράθυρο διαλόγου. Εναλλακτικά η αρχική διαταραχή στις εσωτερικές τάσεις μπορεί να πάρει άλλες τιμές, εάν οριστεί ένας διαφορετικός παράγοντας διαταραχής με το Perturbation factor.



Εικόνα 12: Παράθυρο διαλόγου του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC/Slope [21].

Έπειτα, για δεδομένο συντελεστή ασφαλείας, F , εκτελούνται N_r , σε αριθμό, βήματα. Σε περίπτωση που ο λόγος μη ισορροπίας δυνάμεων* είναι μικρότερος από 10^{-3} , τότε το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Εάν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από 10^{-3} , τότε εκτελούνται και άλλα N_r , σε αριθμό, βήματα, η επανάληψη των οποίων σταματάει όταν ο λόγος γίνει μικρότερος από 10^{-3} . Η μέση τιμή του λόγου των δυνάμεων συγκρίνεται με τη μέση τιμή του λόγου των δυνάμεων των προηγούμενων N_r , σε αριθμό, βημάτων (για το τρέχον διάστημα των βημάτων N_r). Εάν η διαφορά της παραπάνω σύγκρισης είναι μικρότερη από 10%, τότε το σύστημα θεωρείται ότι δεν βρίσκεται σε ισορροπία, και η επανάληψη εξέρχεται με νέο F . Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 10%, συνεχίζεται η επανάληψη των N_r βημάτων μέχρι:

1. Η διαφορά να είναι κάτω από 10% (αφού ο μέσος λόγος δυνάμεων θα συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή, η οποία θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στην ισορροπία και επομένως το σύστημα θα πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή κίνηση)
2. Να έχουν εκτελεσθεί 6, σε αριθμό, τέτοιες επαναλήψεις..
3. Ο λόγος δυνάμεων να είναι μικρότερος από 10^{-3} .

*Ο λόγος μη ισορροπίας δυνάμεων είναι ο λόγος της δύναμης μη ισορροπίας, η οποία είναι η καθαρή δύναμη που ασκείται σε ένα σημείο του πλέγματος, προς τη μέση απόλυτη τιμή της δύναμης που ασκείται από κάθε περιβάλλουσα ζώνη.

Κατά τη διαδικασία της επίλυσης εμφανίζονται οι παρακάτω πληροφορίες:

1. Ο αριθμός των βημάτων υπολογισμού που ολοκληρώθηκαν για τον προσδιορισμό μίας δεδομένης τιμής του F , ως ποσοστό του N_r .
2. Ο αριθμός των ολοκληρωμένων κύκλων λύσης (δηλαδή οι δοκιμές για ισορροπία και μη ισορροπία).
3. Η λειτουργία που εκτελείται.
4. Οι τρέχουσες τιμές συγκλίσεως του F .

Η επίλυση για το συντελεστή ασφαλείας σταματά όταν η διαφορά ανάμεσα στη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή της συγκλίσεως, γίνει μικρότερη από 0,005 (Το όριο αυτό μπορεί να αλλάξει επιλέγοντας το Resolution στο παράθυρο διαλόγου της εικόνας 12). Η προσέγγιση της λύσης με σύγκλιση μπορεί να πραγματοποιήσει ένα μεγάλο αριθμό σταθερών ή ασταθών λύσεων προτού να προσδιοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας. Σε περίπτωση που είναι γνωστό ένα κατά προσέγγιση εύρος του συντελεστή, τότε ο αριθμός των λύσεων αλλά και ο χρόνος επίλυσης μπορεί να μειωθεί καθορίζοντας τις αρχικές τιμές των συγκλίσεων. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας το Bracketing για να επιλεχθούν οι αρχικές τιμές των άνω και κάτω ορίων. Εάν ο συντελεστής ασφαλείας που θα υπολογισθεί

βρίσκεται εκτός των ορίων, θα εμφανιστεί ένα προειδοποιητικό μήνυμα. Ακόμη, είναι δυνατόν να ελεγχθεί αν ο συντελεστής ασφαλείας που έχει οριστεί βρίσκεται πάνω ή κάτω από τον πραγματικό συντελεστή. Αυτό πραγματοποιείται ορίζοντας την αρχική τιμή του κάτω ορίου ίση με την αρχική τιμή του άνω ορίου.

Κατά την επίλυση ενός πρανού για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC/Slope θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα εξής:

1. Η αρχική κατάσταση των τάσεων, είναι μία κατάσταση μηδενικής τάσεως για το συντελεστή ασφαλείας στο FLAC/Slope. Για να υπολογισθεί ο Nr εφαρμόζεται μόνο η βαρυτική φόρτιση.
2. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται με βάση τη θεωρία μικρών παραμορφώσεων.
3. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιεί, από προεπιλογή, την υπόθεση της μη συνδεδεμένης πλαστικής ροής. Για να εκτελεστεί ο υπολογισμός της συνδεδεμένης πλαστικής ροής θα πρέπει να επιλεγεί το Use associated plastic flow rule στο παράθυρο διαλόγου της εικόνας 12.

3.3 Κριτήριο Modified Hoek-Brown

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας μπορεί επίσης να γίνει και με το τροποποιημένο κριτήριο Hoek-Brown (Modified Hoek-Brown criterion). Με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο υπάρχουν δύο επιλογές μείωσης της αντοχής:

1. Μείωση σε σχέση με τη διατμητική αντοχή και
2. Μείωση σε σχέση με την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη.

Εάν στο παράθυρο διαλόγου με τις παραμέτρους για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας επιλεγεί η διατμητική αντοχή (shear strength), τότε ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας θα γίνει με βάση την πρώτη επιλογή.

Το κριτήριο Hoek-Brown μπορεί να προσεγγιστεί τοπικά από το κριτήριο Mohr-Coulomb

$$\tau = \sigma' \tan \varphi_c + c_c, \quad (3.3)$$

όπου η συνοχή και η τριβή δίνονται με όρους της τοπικής τιμής του σ_3 από τις εξισώσεις:

$$\varphi_c = 2 \tan^{-1} \sqrt{N_{\varphi_c}} - 90^\circ, \quad (3.4)$$

$$c_c = \frac{\sigma_c^{ucs}}{2\sqrt{N_{\varphi_c}}}, \quad (3.5)$$

όπου (για θετικές θλιπτικές τάσεις) και $\sigma_3 > 0$:

$$N_{\varphi_c} = 1 + am_b(s)^{a-1}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_c^{ucs} = \sigma_{ci}(s)^a, \quad (3.7)$$

Και για $\sigma_3 < 0$:

$$N_{\varphi_c} = 1 + am_b(s)^{a-1}, \quad (3.8)$$

$$\sigma_c^{ucs} = \sigma_{ci}(s)^a, \quad (3.9)$$

Όπου:

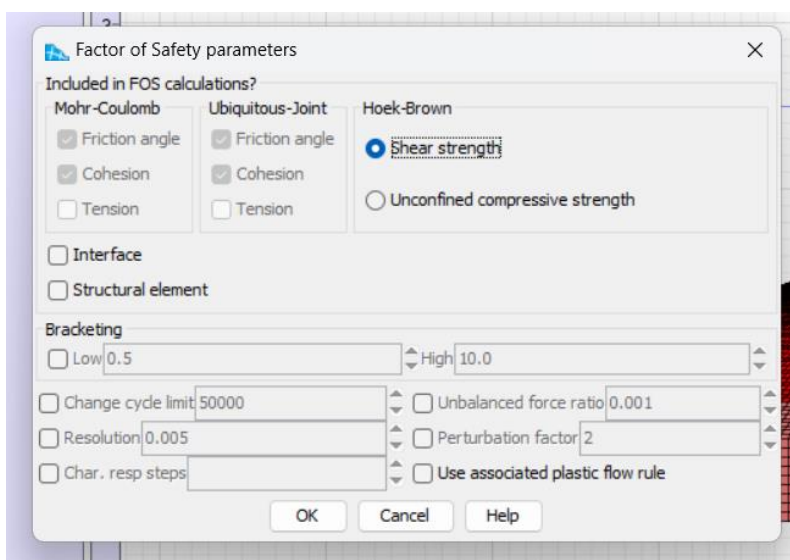
s και a, σταθερές εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας

m_b : Μειωμένη τιμή (για τη βραχομάζα) της σταθεράς του υλικού m_i (για άρρηκτο βράχο)

σ_{ci} : Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.

Χρησιμοποιείται μία πραγματική προσέγγιση για την αξιολόγηση του συντελεστή ασφαλείας των πρανών, η οποία βασίζεται στη τεχνική απομείωσης της αντοχής, κατά την οποία η τοπική συνοχή c_c και ο συντελεστής γωνίας τριβής $\tan\phi_c$, διαιρούνται με έναν συντελεστή μέχρι να εντοπιστεί ενεργή αστοχία του πρανούς. Ο συντελεστής αυτός εφαρμόζεται άμεσα στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της διατμητικής τάσης τ_{max} , εξίσωση 3.3. Ο συντελεστής μείωσης στα όρια της κατάρρευσης (αστοχίας) του πρανούς ορίζεται ως ο συντελεστής ασφαλείας, FoS ,με βάση την προτεινόμενη τεχνική (τεχνική απομείωσης της αντοχής).

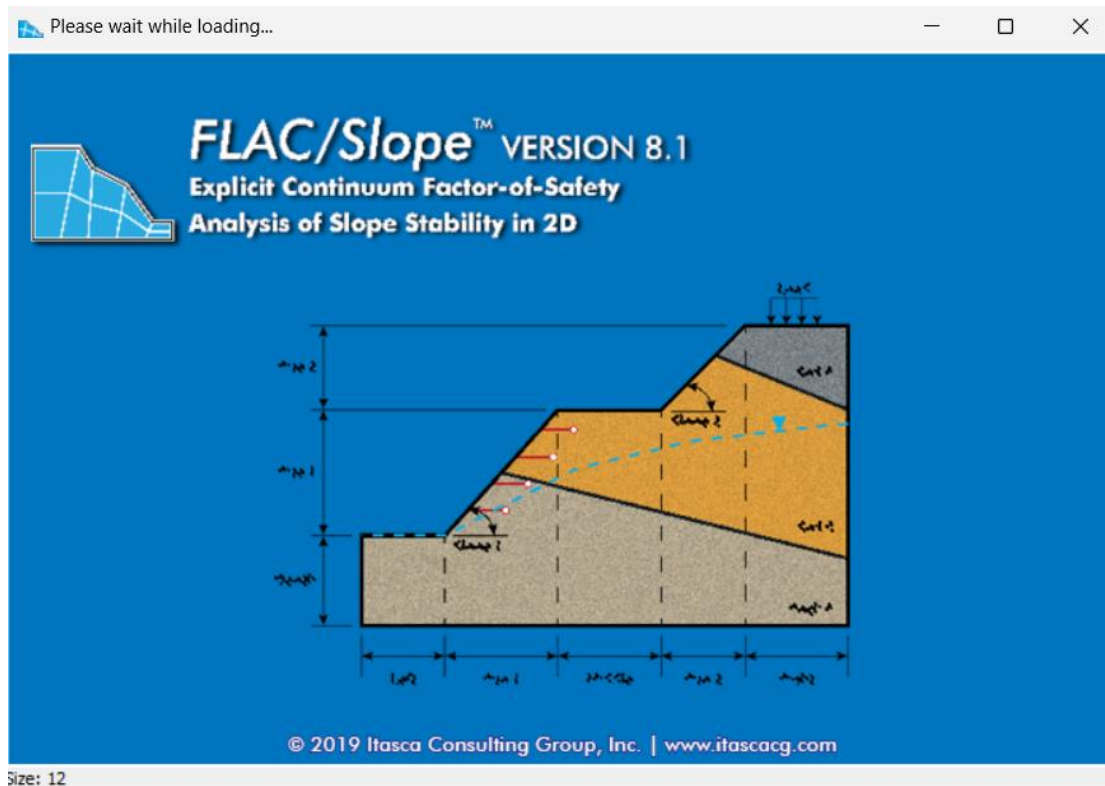
Εάν στο παράθυρο διαλόγου με τις παραμέτρους για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας επιλεγεί η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (unconfined compressive strength), τότε ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας θα γίνει με βάση την δεύτερη επιλογή. Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη μειώνεται κατά έναν συντελεστή μείωσης μέχρι να εντοπιστεί ενεργή αστοχία. Το συγκεκριμένο μέτρο επιτρέπει τη σύγκριση με τα διαγράμματα ευστάθειας για απλά πρανή, χρησιμοποιώντας οριακή ανάλυση.



Εικόνα 13: Παράθυρο διαλόγου για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με βάση το κριτήριο Hoek-Brown [21].

3.4 Λειτουργία του FLAC/Slope

Ανοίγοντας το πρόγραμμα εμφανίζεται η εικόνα 13 με τα στοιχεία του προγράμματος.

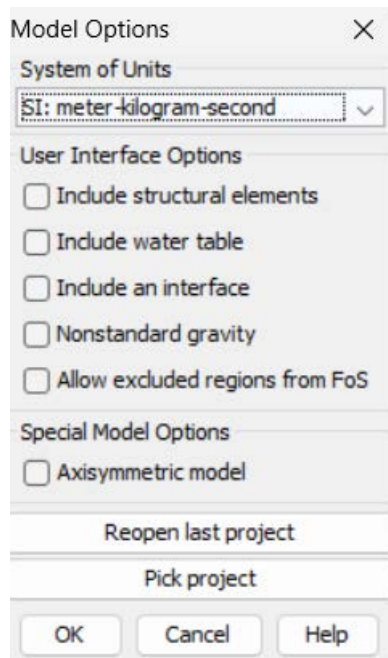


Εικόνα 14: Παράθυρο έναρξης του FLAC/Slope [21].

Έπειτα εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 14, που ονομάζεται **Model Options**, όπου αρχικά επιλέγεται το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιηθεί κατά τις αναλύσεις ευστάθειας, καθώς και οι παράμετροι που θα ληφθούν υπόψιν κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Μπορεί επιλεγεί εάν στο μοντέλο θα περιλαμβάνονται:

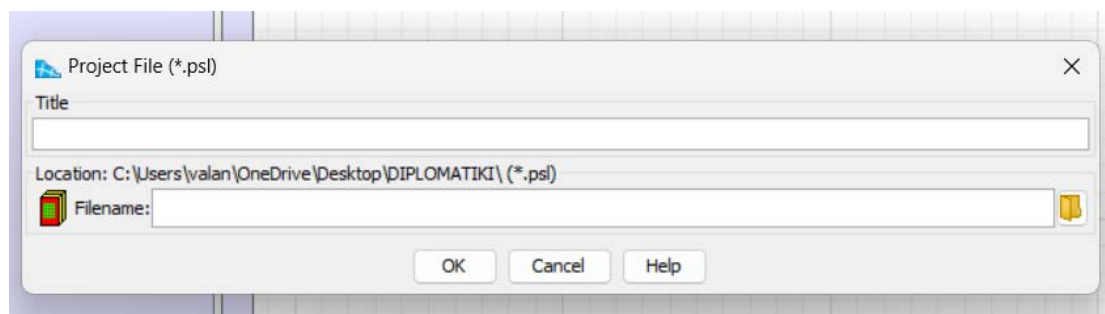
1. Δομικά στοιχεία
2. Υδροφόρος ορίζοντας
3. Διεπιφάνεια
4. Μεταβαλλόμενη βαρύτητα
5. Περιοχές που θα αφαιρούνται από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας

Επίσης μπορεί να επιλεγεί, εάν το μοντέλο θα είναι αξονοσυμμετρικό ή όχι.



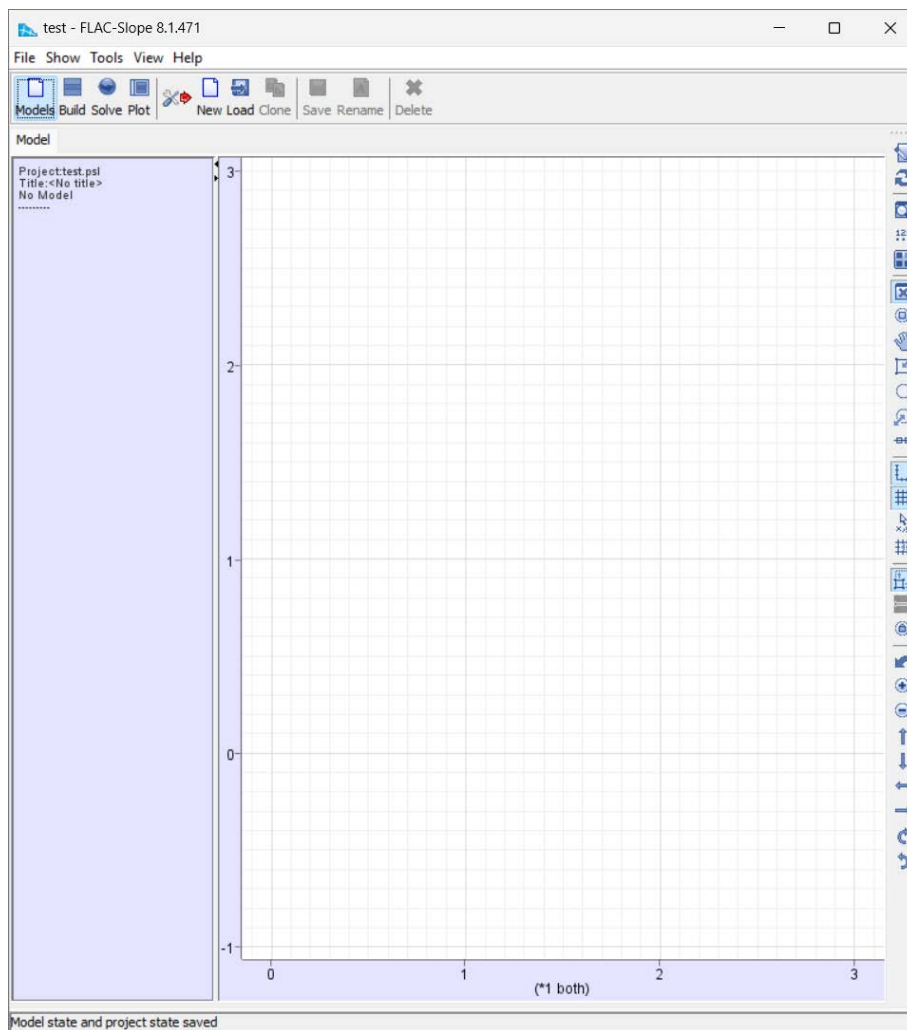
Εικόνα 15: Παράθυρο διαλόγου: Model Options.

Αφού γίνει η επιλογή των επιθυμητών παραμέτρων που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Project File**, όπου εισάγεται ο τίτλος του έργου, δίνεται όνομα στο αρχείο και επιλέγεται ο φάκελος στον υπολογιστή που θα αποθηκευτεί.



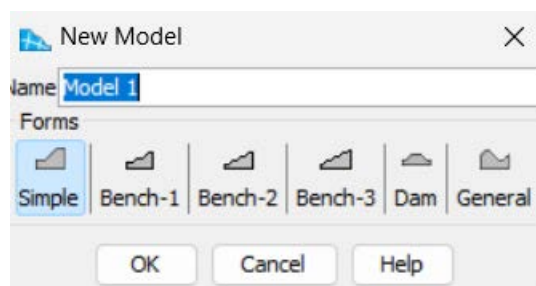
Εικόνα 16: Παράθυρο διαλόγου: Project File .

Στη συνέχεια ανοίγει το κύριο παράθυρο του προγράμματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 16.



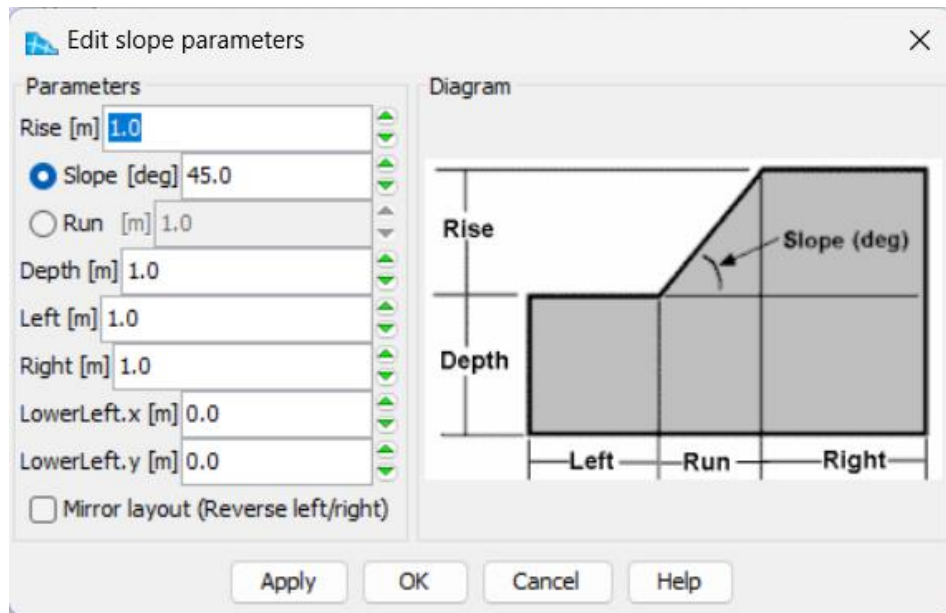
Εικόνα 17: Κύριο παράθυρο του FLAC/Slope .

Επιλέγοντας το **New**, εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της εικόνας 17, στο οποίο επιλέγεται το όνομα του μοντέλου και η γεωμετρία του.



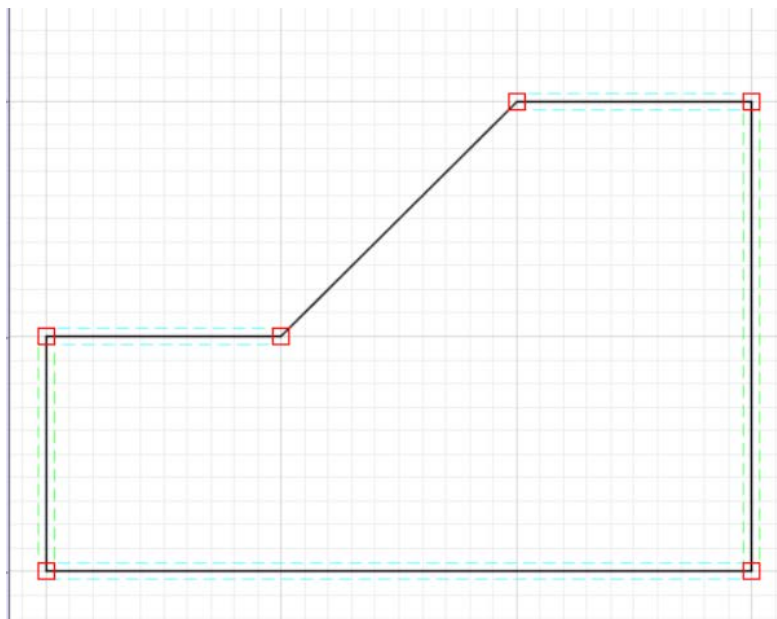
Εικόνα 18: Παράθυρο διαλόγου: New Model .

Έπειτα ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Edit slope parameters** (εικόνα 18), όπου εισάγονται οι διαστάσεις του μοντέλου, ώστε να οριστεί η γεωμετρία του. Επιλέγοντας το **Mirror layout** μπορεί να αντιστραφεί το μοντέλο.



Εικόνα 19: Παράθυρο διαλόγου: Edit slope parameters .

Αφού οριστεί η γεωμετρία του μοντέλου, επιλέγεται το **Apply**, ώστε να εφαρμοστεί και στη συνέχεια το OK. Έτσι δημιουργείται το προσομοίωμα του πρανούς(εικόνα 19).



Εικόνα 20: Προσομοίωμα του πρανούς .

Τα δεδομένα που εισήχθησαν παραπάνω για τον ορισμό της γεωμετρίας του προσομοιώματος μπορούν να αλλάξουν εάν το επιθυμεί ο χρήστης. Αφού ορισθεί το μοντέλο εμφανίζεται κάτω αριστερά μία καρτέλα με την ονομασία του, όπως φαίνεται στην εικόνα 19, καθώς μπορούν να δημιουργηθούν πολλά διαφορετικά μοντέλα στο ίδιο αρχείο. Επιπλέον ενεργοποιείται και η επιλογή των εργαλείων **Clone**, **Save**, **Rename** και **Delete**.

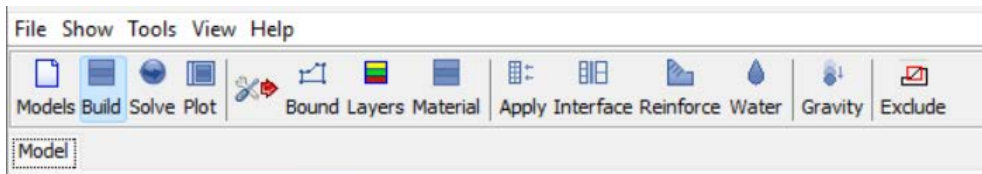
- Με το **Clone**, μπορεί να δημιουργηθεί ένας κλώνος του μοντέλου, με την ίδια γεωμετρία, ώστε να εισαχθούν διαφορετικές παράμετροι για την ανάλυση του στη συνέχεια.
- Με το **Save**, αποθηκεύεται το μοντέλο.
- Με το **Rename**, μπορεί να μετονομαστεί το μοντέλο.

- Με το **Delete**, μπορεί να διαγραφεί το μοντέλο.



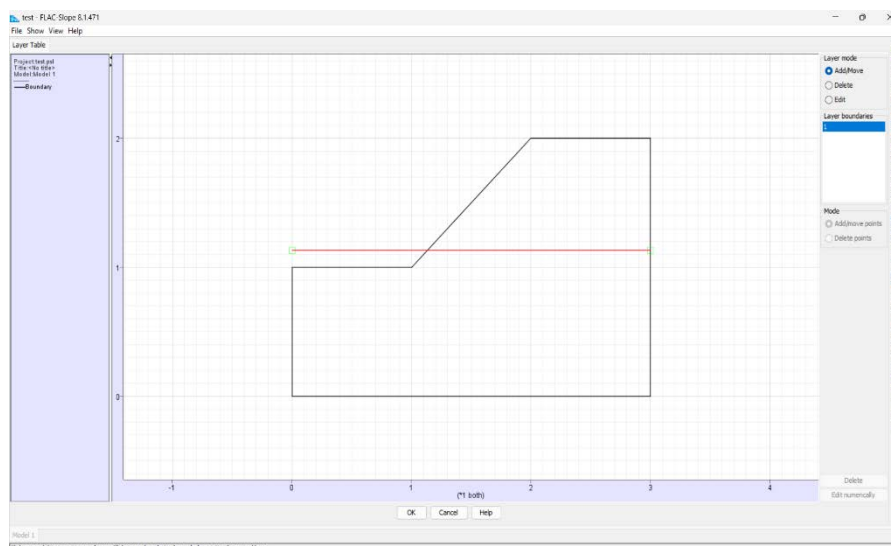
Εικόνα 21: Εργαλεία δημιουργίας και επεξεργασίας του μοντέλου.

Επιλέγοντας το **Build**, εμφανίζεται η γραμμή εργαλείων της εικόνας 21.



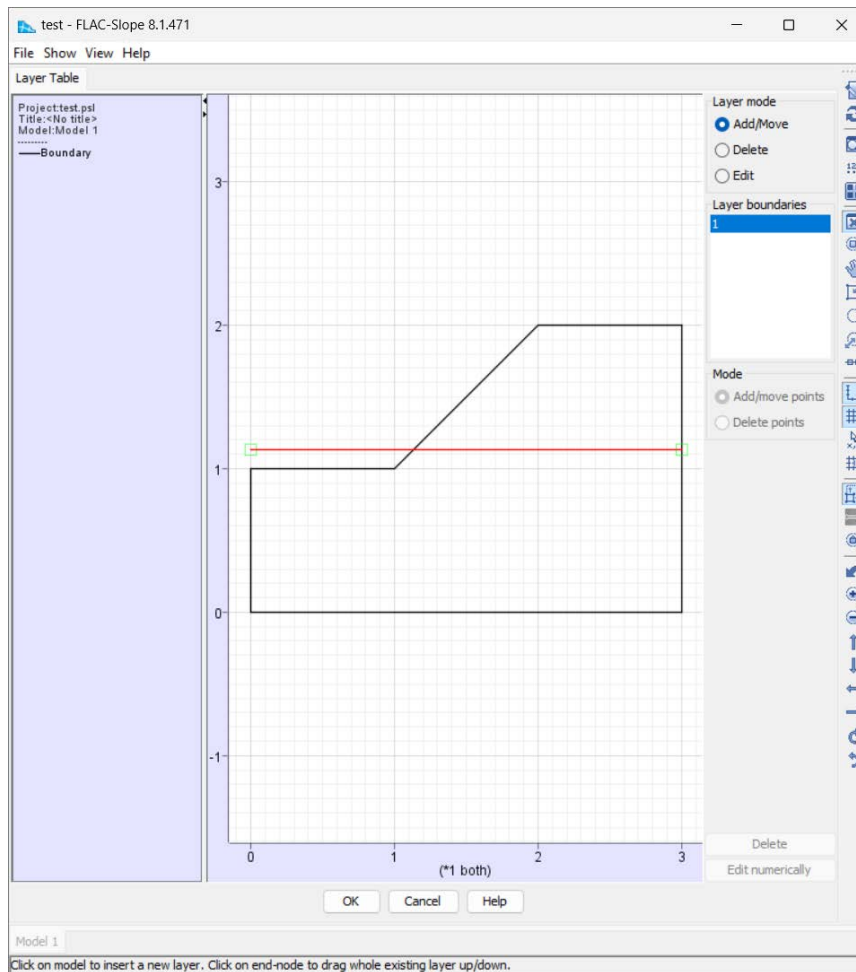
Εικόνα 22: Γραμμή εργαλείων του Build.

- Με το **Bound** μπορούν οι κόμβοι του μοντέλου να μετακινηθούν.
- Με το **Layers** εισάγονται διαφορετικές στρώσεις εδάφους στο μοντέλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 22.



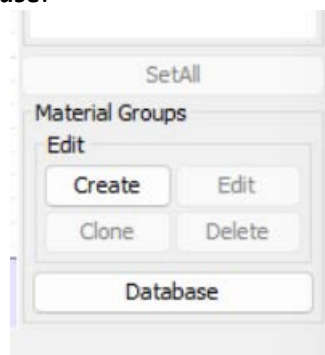
Εικόνα 23: Εισαγωγή και επεξεργασία των διαφορετικών στρωμάτων εδάφους/πετρώματος από το **Layers**.

Με το **Add/Move** εισάγεται ή μετακινείται ένα νέο στρώμα εδάφους/πετρώματος, με το **Delete** διαγράφεται ένα στρώμα εδάφους/πετρώματος και με το **Edit** μπορούν να εισαχθούν, να μετακινηθούν ή και να διαγραφούν σημεία του στρώματος του εδάφους/πετρώματος. Διαμορφώνεται έτσι η στρωματογραφία του υπεδάφους και πατώντας OK εμφανίζεται το πρηνές με τα στρώματά του (εικόνα 23).



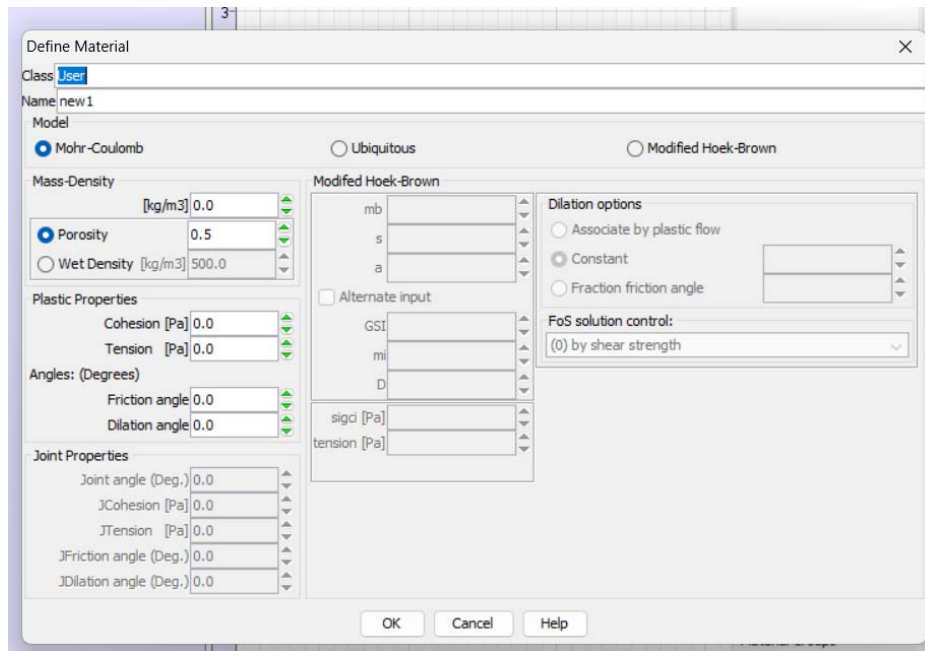
Εικόνα 24: Στρωματοποιημένο μοντέλο.

- Με το **Material** εισάγονται τα υλικά από τα οποία αποτελείται το πρανές. Μπορεί ένα υλικό να δημιουργηθεί από την αρχή με το **Create**, ή να χρησιμοποιηθεί κάποιο ήδη υπάρχων από το **Database**.



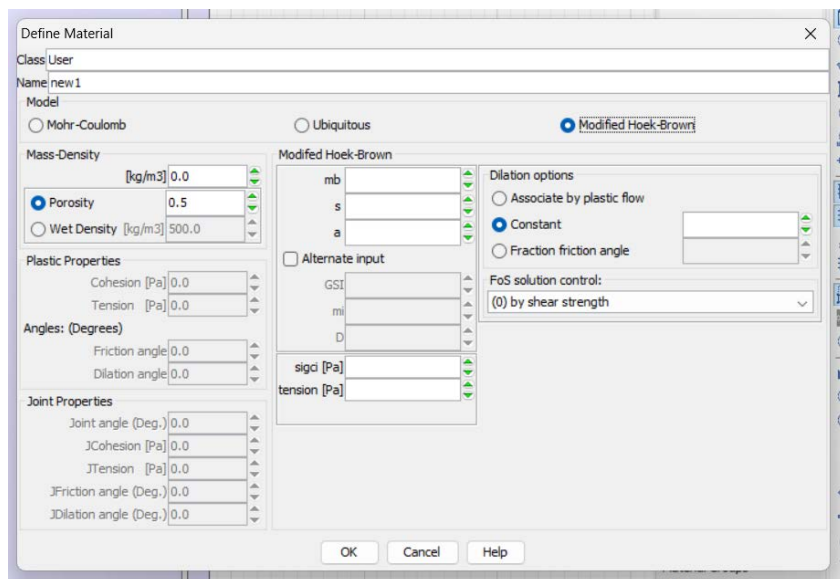
Εικόνα 25: Επιλογές για την εισαγωγή υλικών στο προσομοίωμα.

Με το **Create** δίνεται η επιλογή στον χρήστη να δημιουργήσει ένα υλικό με τις ιδιότητες που επιθυμεί. Μπορεί να επιλεγεί εάν το υλικό θα έχει ιδιότητες με βάση το κριτήριο **Mohr-Coulomb**, το **Ubiquitous** και το **Modified Hoek-Brown**. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται το κριτήριο **Mohr-Coulomb**, όπου εισάγονται η πυκνότητα (mass-density), το πορώδες (porosity), η συνοχή (cohesion) και η γωνία τριβής (friction angle) του εδάφους. Με βάση τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες θα γίνει και η ανάλυση του προσομοιώματος με βάση το κριτήριο Mohr-Coulomb.



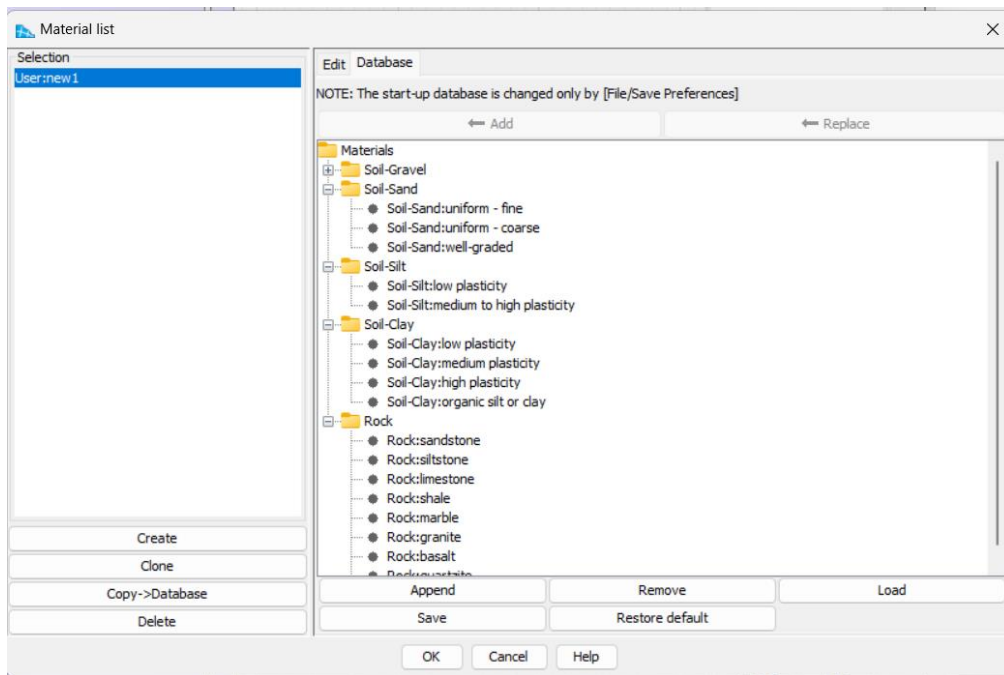
Εικόνα 26: Εισαγωγή γεωυλικών με βάση το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Εάν επιλεγθεί το **Ubiquitous**, επιτρέπεται επιπλέον να εισαχθούν και οι ιδιότητες των ασυνεχειών (joint properties), όπου στην περίπτωση του κριτηρίου Mohr-Coulomb δεν μπορούν να επεξεργαστούν. Με την επιλογή του **Modified Hoek-Brown**, για να οριστεί το γεωυλικό (βραχώδες), πρέπει να εισαχθούν οι παράμετροι mb , s και a του υλικού αλλιώς επιλέγοντας το **Alternate input** εισάγονται οι παράμετροι GSI , m_i και D του υλικού.



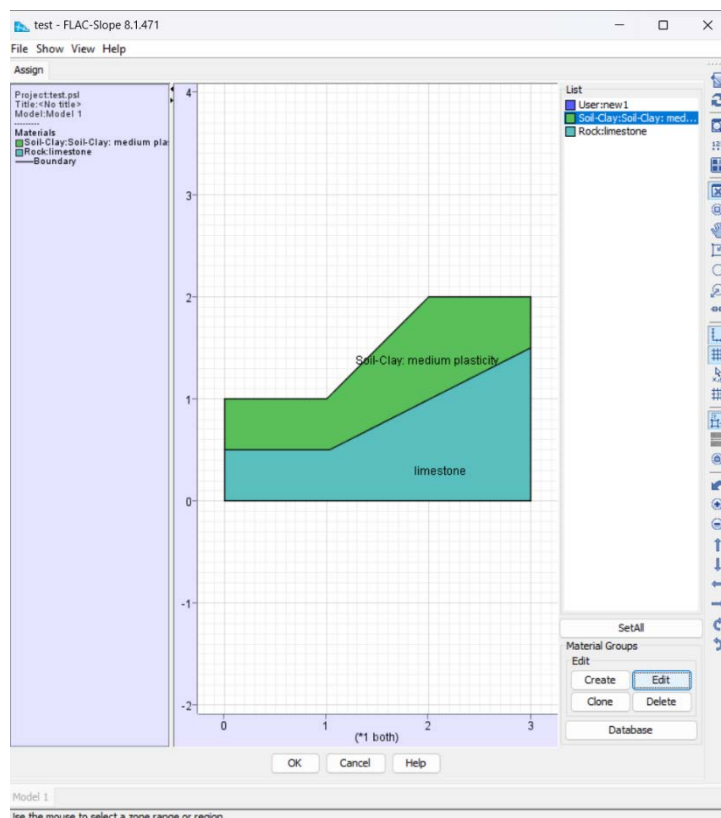
Εικόνα 27: Εισαγωγή γεωυλικού με βάση το κριτήριο Modified Hoek-Brown.

Με το **Database** μπορεί να επιλεγθεί κάποιο υλικό από τη βάση δεδομένων του προγράμματος με καθορισμένες ιδιότητες, οι οποίες, όμως, μπορούν να τροποποιηθούν.



Εικόνα 28: Επιλογή υλικού από το Database του προγράμματος.

Αφού επιλεγούν ή δημιουργηθούν τα υλικά του προσομοιώματος, εισάγονται πατώντας επάνω στο ανάλογο στρώμα και εμφανίζονται στο προσομοίωμα (εικόνα 28).

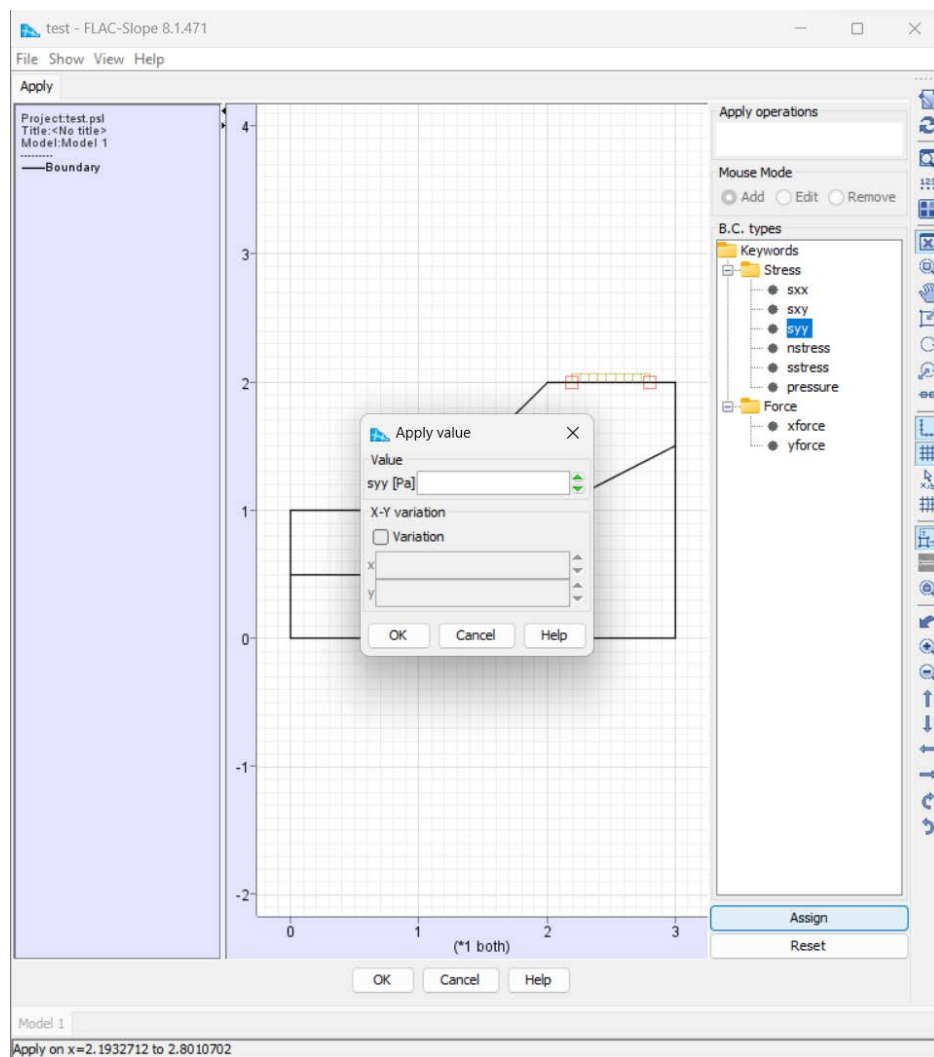


Εικόνα 29: Εισαγωγή των διαφορετικών τύπων εδαφών στο προσομοίωμα.

Με το **Edit** μπορούν να τροποποιηθούν οι ιδιότητες του υλικού, με το **Clone** δημιουργείται ένα ακριβές αντίγραφο ενός υλικού και με το **Delete** διαγράφεται το επιλεγμένο υλικό.

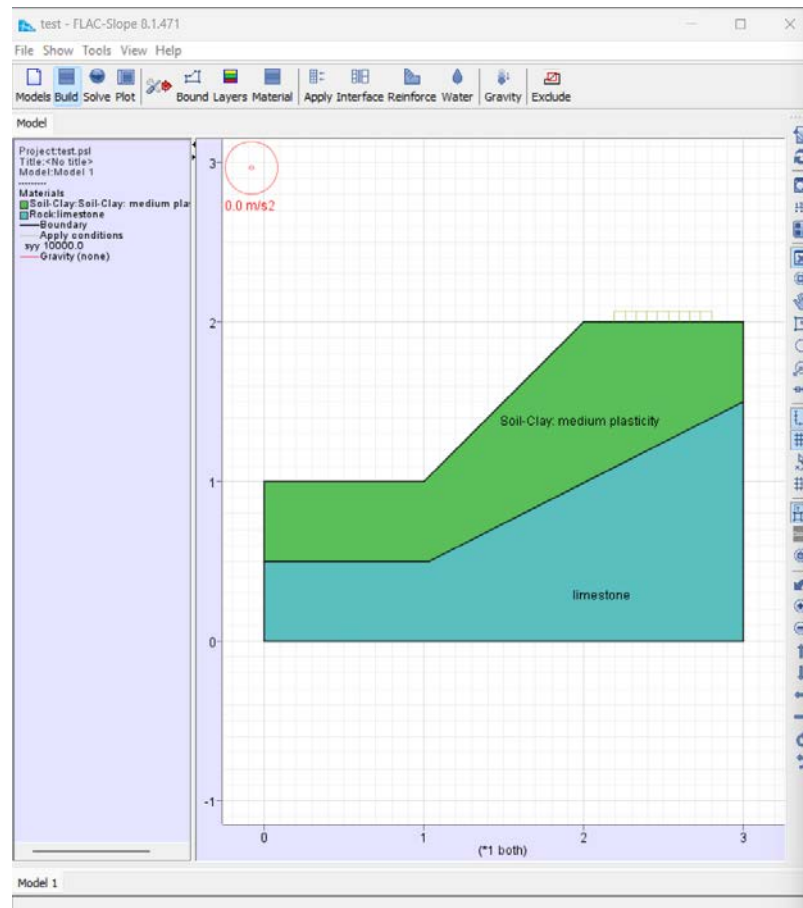
Αφού γίνει η απαραίτητη επεξεργασία των υλικών του προσομοιώματος με το OK μπορεί να συνεχίσει η περαιτέρω εισαγωγή παραμέτρων στο προσομοίωμα.

- Με το **Apply** εισάγονται τάσεις και δυνάμεις στο πρανές. Επιλέγεται ο τύπος της φόρτισης που ασκείται στο πρανές και πατώντας στο σημείο όπου εφαρμόζεται η φόρτιση, εισάγεται στο μοντέλο. Με το **Assign** παραμένει στο σημείο όπου τοποθετήθηκε και ζητείται από το πρόγραμμα να εισαχθεί η τιμή της (εικόνα 30), ενώ με το **Reset** επανατοποθετείται σε νέα θέση εάν έχει εισαχθεί λάθος. Με το **Edit** μπορεί να αλλάξει η τιμή της φόρτισης που έχει επιλεγεί και με το **Remove** διαγράφεται.



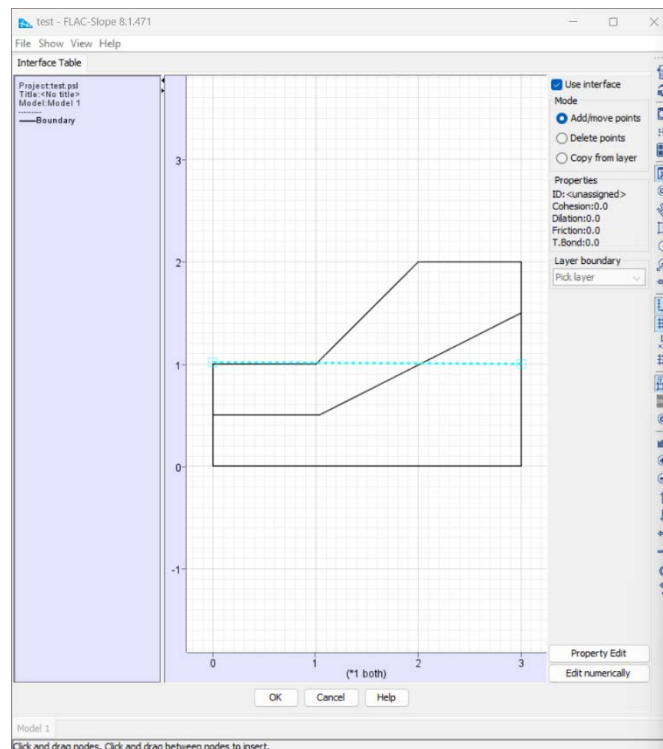
Εικόνα 30: Εισαγωγή φορτίσεων στο μοντέλο.

Αφού εισαχθούν και οι φορτίσεις που ασκούνται στο προσομοίωμα και πατώντας το OK συνεχίζεται η περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου (εικόνα 30).



Εικόνα 31: Το προσομοίωμα μετά από την εισαγωγή των φορτίσεων.

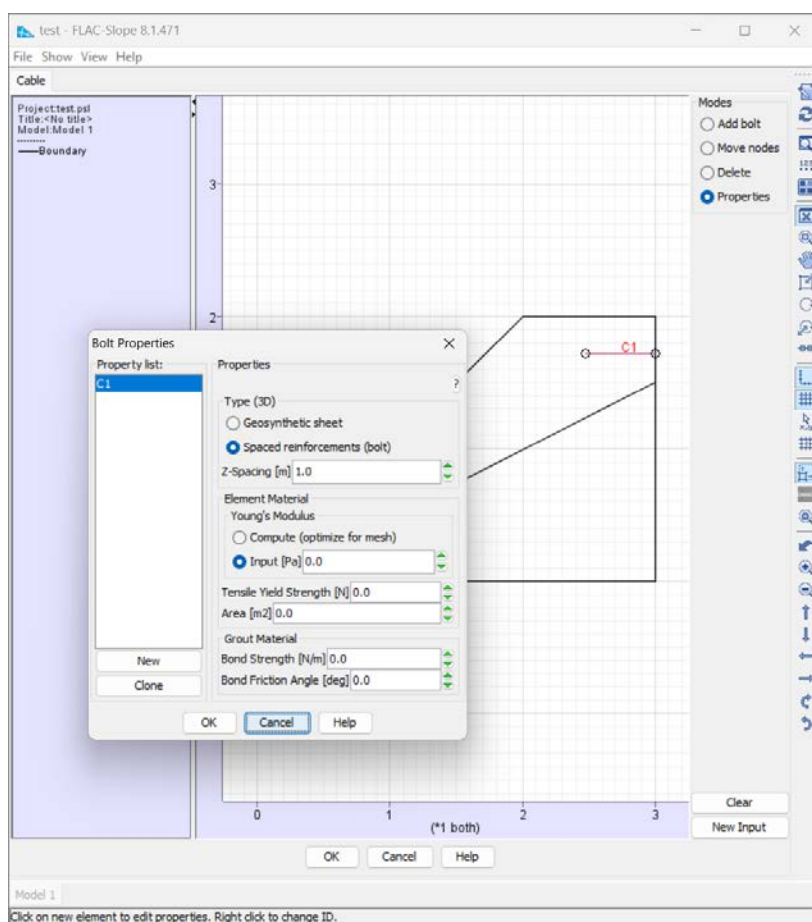
- Με το **Interface** μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο, εάν υπάρχει, κάποια διεπιφάνεια ανάμεσα στα στρώματα [10']



Εικόνα 32: Εισαγωγή διεπιφάνειας στο μοντέλο.

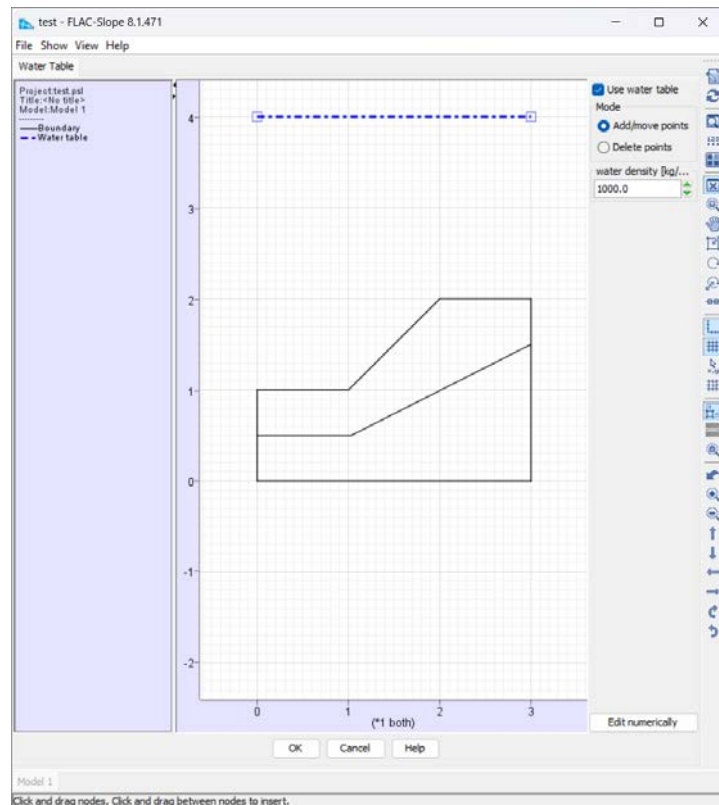
Με το **Add/move points** εισάγονται ή μετακινούνται τα σημεία της διεπιφάνειας. Με το **Delete points** διαγράφονται τα επιλεγμένα σημεία. Με το **Copy from layer** εισάγεται η διεπιφάνεια επάνω στην επιφάνεια επαφής των διαφορετικών στρωμάτων που έχει επιλεγεί από το **Pick layer** στο **Layer boundary**.

- Με το **Reinforce** μπορούν να εισαχθούν αγκύρια στο πρηνές για την ενίσχυση της ευστάθειάς του. Με το Add bolt εισάγεται το νέο αγκύριο στην ανάλογη θέση πατώντας επάνω στο πρηνές, με το Move nodes μπορούν να μετακινηθούν τα άκρα του αγκυρίου, με το Delete διαγράφεται το επιλεγμένο αγκύριο και με το Properties εισάγονται οι ιδιότητες του αγκυρίου, όπως η αντοχή διαρροής, το μέτρο Young, η επιφάνεια, η αντοχή και η γωνία τριβής του (εικόνα 32)



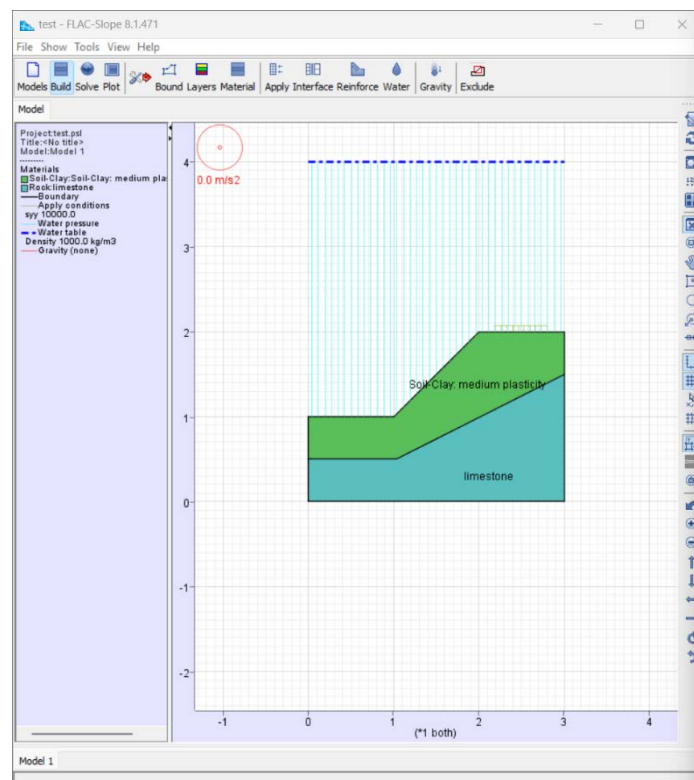
Εικόνα 33: Εισαγωγή αγκυρίων στο προσομοίωμα .

- Με το **Water** εισάγεται ο υδροφόρος ορίζοντας στο μοντέλο. Με το **Add/move points** μπορούν να εισαχθούν αλλά και να μετακινηθούν επιπλέον σημεία και με το **Delete points** διαγράφονται τα επιλεγμένα σημεία. Με το **Water density** μπορεί να αλλάξει η πυκνότητα του νερού.



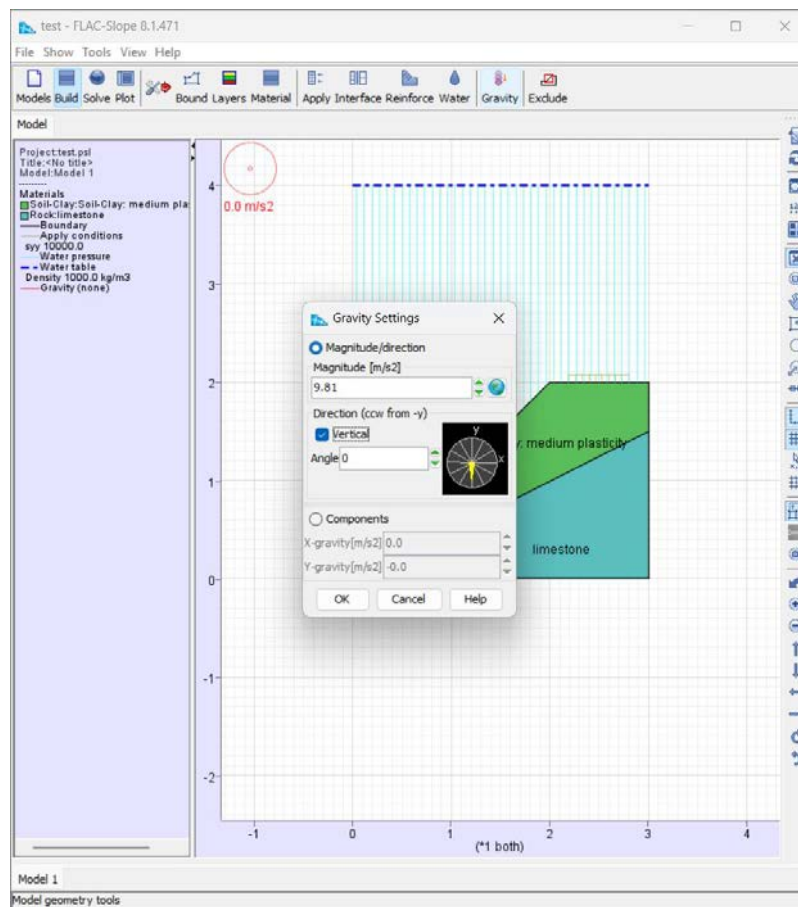
Εικόνα 34: Εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα.

Αφού εισαχθεί ο υδροφόρος ορίζοντας στην επιθυμητή θέση το μοντέλο θα μοιάζει όπως αυτό στην εικόνα 34.



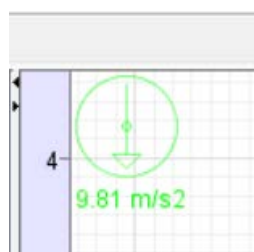
Εικόνα 35: Το προσομοίωμα μετά την εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα.

- Με το **Gravity** εισάγεται η τιμή της βαρύτητας, το διάνυσμα της οποίας είναι κατακόρυφο, καθώς και οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις με το **Nonstandard gravity**, των οποίων το διάνυσμα είναι οριζόντιο .



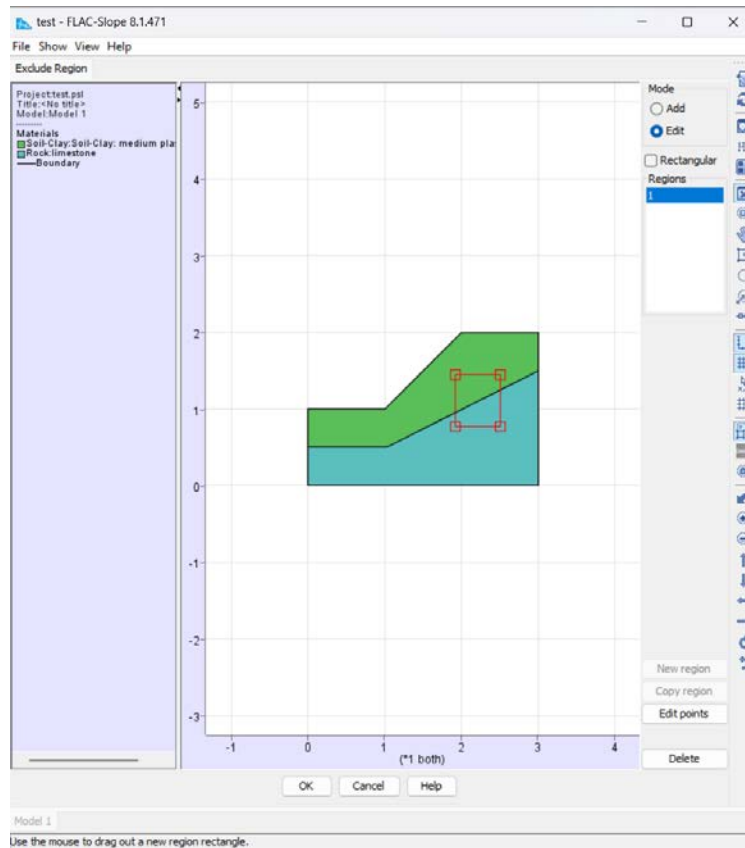
Εικόνα 36: Εισαγωγή βαρύτητας στο μοντέλο.

Οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις χρησιμοποιούνται συνήθως όταν γίνονται αναλύσεις ευστάθειας παρουσία σεισμών. Αφού ορισθεί η τιμή της βαρύτητας, η τιμή και η διεύθυνσή της φαίνονται πάνω αριστερά στο πρόγραμμα (εικόνα 36)



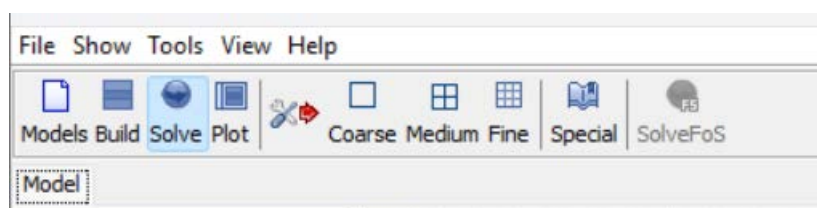
Εικόνα 37: Απεικόνιση της τιμής και της διεύθυνσης της βαρύτητας.

- Με το **Exclude** μπορεί να επιλεγεί μία επιφάνεια του προσομοιώματος, η οποία δεν θα ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Με το **Add** προστίθεται η επιφάνεια πατώντας επάνω στο πραινές και δημιουργώντας το σχήμα που θα έχει και με το **Edit** μπορεί να τροποποιηθεί.



Εικόνα 38: Εισαγωγή επιφάνειας η οποία δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

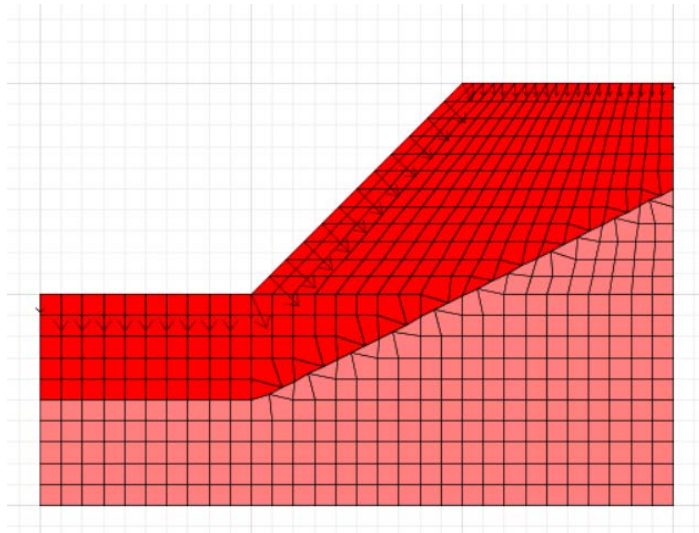
- Αφού δημιουργηθεί το προσομοίωμα με το **Solve** μπορεί να γίνει η επίλυση για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας (εικόνα 38).



Εικόνα 39: Γραμμή εργαλείων **Solve**.

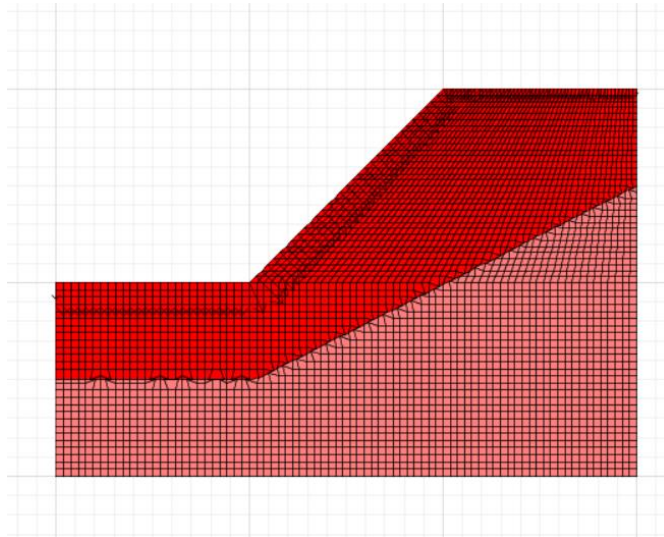
Επιλέγεται το είδος της διακριτοποίησης του κανάβου που μπορεί να είναι:

- **Coarse**, όπου ο κανάβος είναι αραιά διακριτοποιημένος (εικόνα 40).



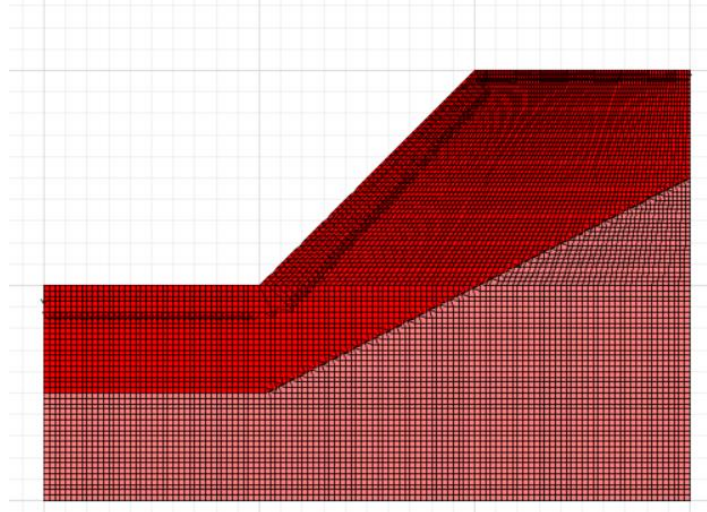
Εικόνα 40: Coarse κάναβος.

- **Medium**, όπου ο κάναβος είναι ενδιάμεσα διακριτοποιημένος (εικόνα 41).



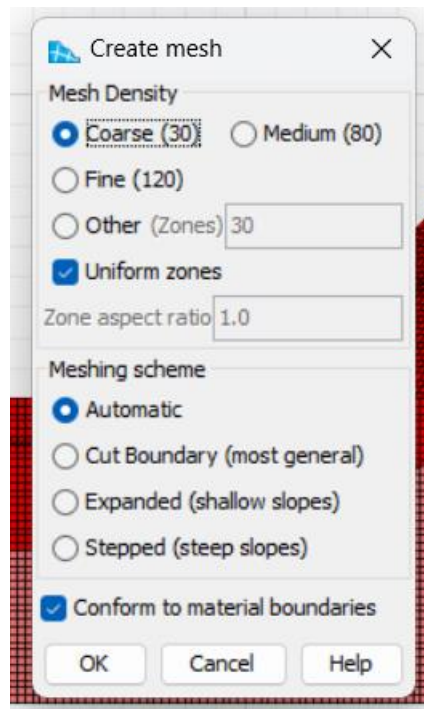
Εικόνα 41: Medium κάναβος.

- **Fine**, όπου ο κάναβος είναι πολύ πυκνά διακριτοποιημένος. (εικόνα 42).



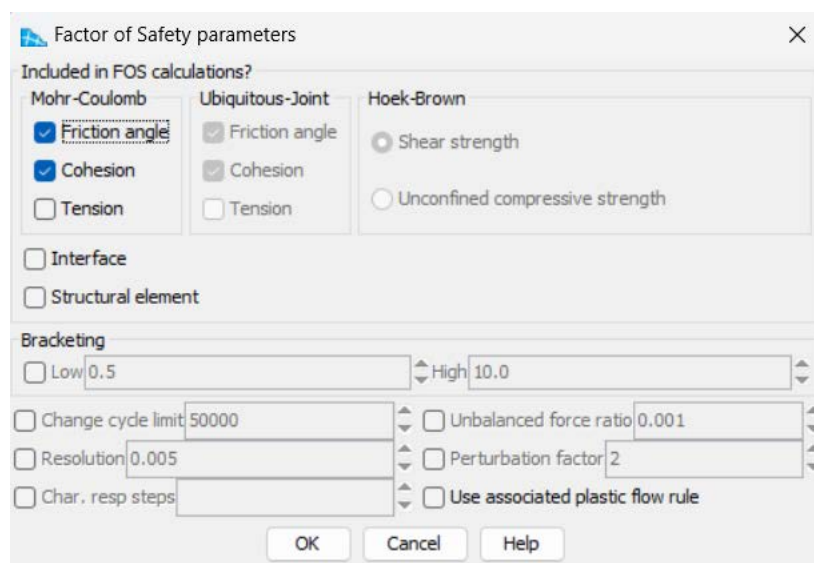
Εικόνα 42: Fine κάναβος.

- Με το **Special** εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Create Mesh** (εικόνα 42), όπου επιλέγεται το είδος της διακριτοποίησης ανάμεσα σε **Coarse**, **Medium** και **Fine**, αλλά επίσης μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει το δικό του πλέγμα εισάγοντας τον αριθμό των ζωνών από το **Uniform zones**.



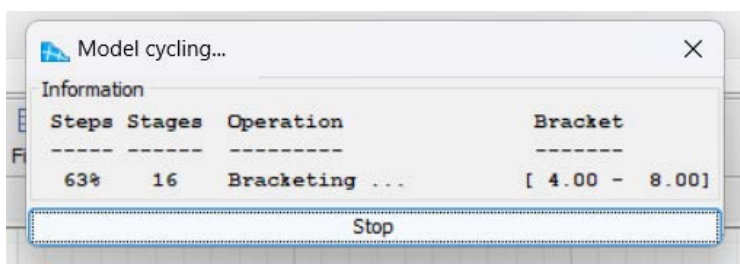
Εικόνα 43: Παράθυρο διαλόγου **Create Mesh**.

Αφού επιλεγεί το είδος της διακριτοποίησης, επιλέγεται το SolveFoS και εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Factor of Safety parameters**, στο οποίο επιλέγονται τα στοιχεία που επιθυμεί ο χρήστης να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, αναλόγως με ποιο κριτήριο έχουν οριστεί τα υλικά. Ακόμη μπορεί να επιλεγεί να ληφθούν υπόψιν η διεπιφάνεια καθώς και τα δομικά στοιχεία επιλέγοντας το **Interface Structural element** αντίστοιχα.



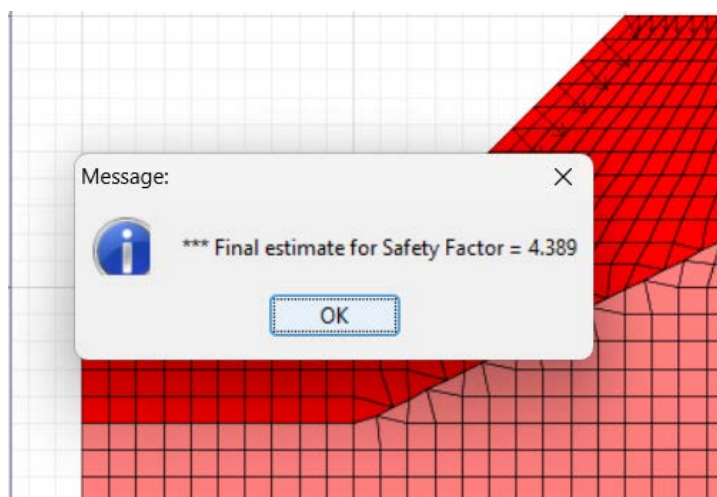
Εικόνα 44: Παράθυρο διαλόγου **Factor of Safety parameters**.

Αφού επιλεγούν οι παραπάνω παράμετροι το πρόγραμμα ξεκινά την επίλυση του προσομοιώματος (εικόνα 44).



Εικόνα 45: Επίλυση του προσομοιώματος.

Τέλος, όταν η ανάλυση ολοκληρωθεί, εμφανίζεται ένα παράθυρο με την τιμή του συντελεστή ασφαλείας (εικόνα 45).



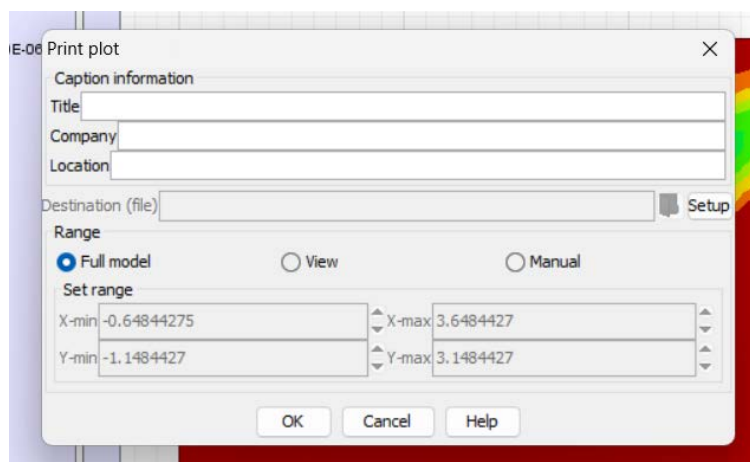
Εικόνα 46: Τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

Εφόσον ολοκληρωθούν οι αναλύσεις, ο χρήστης μπορεί να λάβει τα αποτελέσματα των αναλύσεων και σε μορφή αρχείου και σχηματικά, με τη χρήση της γραμμής εργαλείων **Plot** (εικόνα 46).

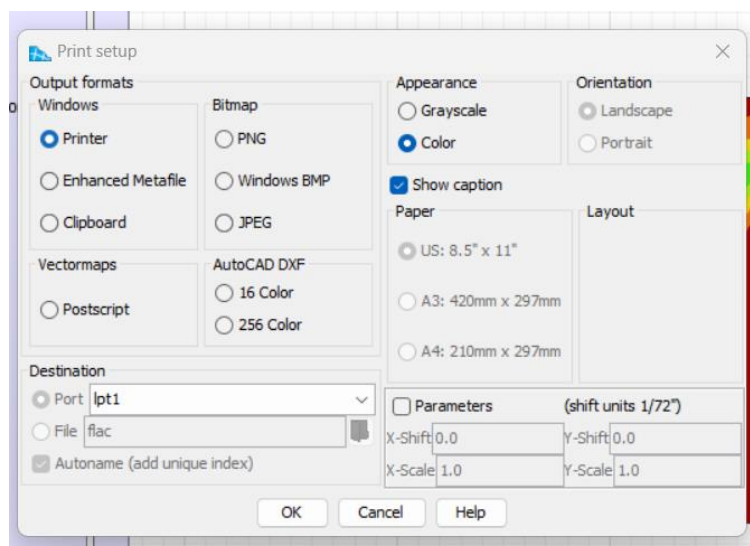


Εικόνα 47: Γραμμή εργαλείων **Plot**.

Με το **Load**, τα αποτελέσματα των αναλύσεων μπορούν να αποθηκευτούν σε κάποιο φάκελο στον υπολογιστή. Με το **Print** εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Print plot**, όπου δίνονται στο αρχείο κάποια στοιχεία (όνομα, τοποθεσία κτλ.) και στη συνέχεια αποθηκεύεται το αρχείο στον υπολογιστή, επιλέγοντας το **Setup**, ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Print setup**, με το οποίο επιλέγεται το είδος του αρχείου που θα εξαχθεί καθώς και διάφοροι παράμετροι για την εκτύπωση του (πχ αν θα είναι έγχρωμο ή ασπρόμαυρο, αν θα έχει υπόμνημα κτλ.).

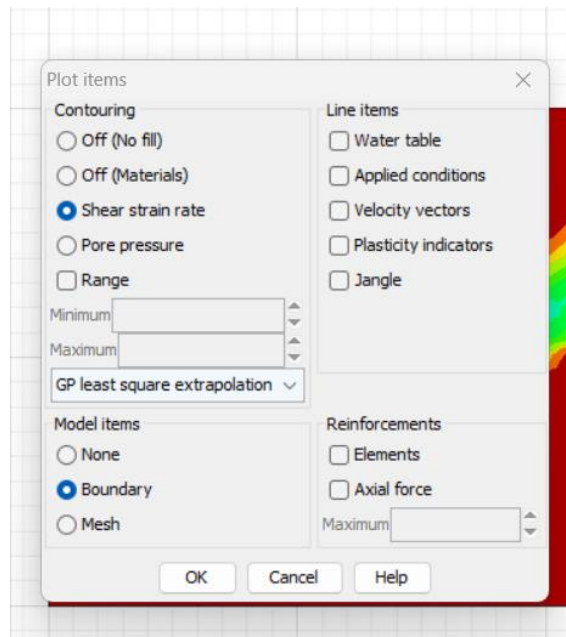


Εικόνα 48: Παράθυρο διαλόγου **Print plot**.



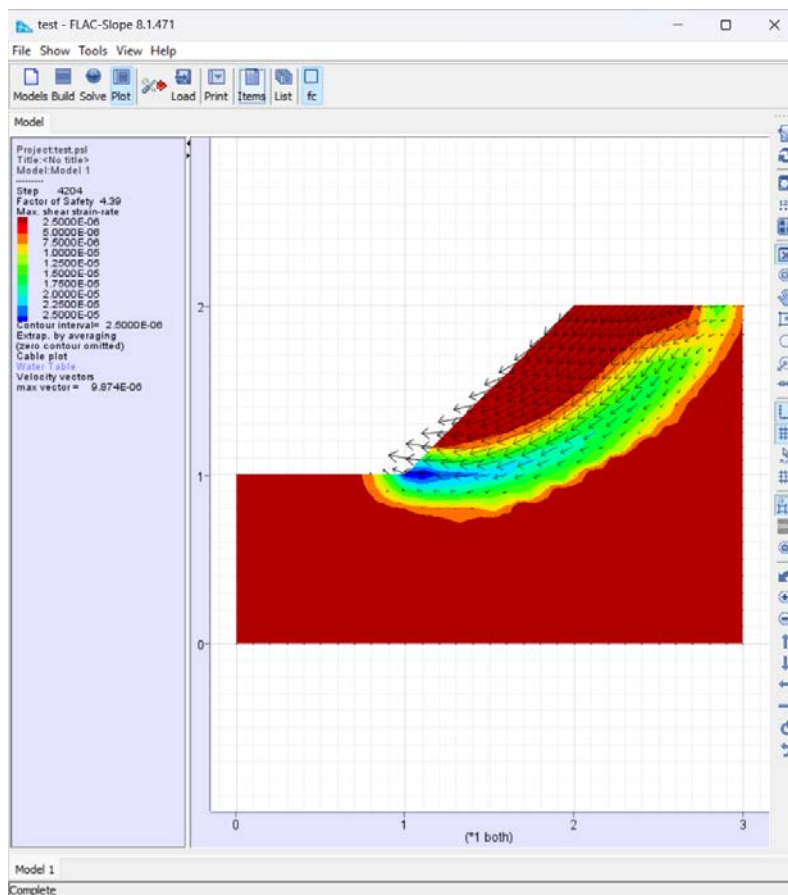
Εικόνα 49: Παράθυρο διαλόγου **Print setup**.

Επιλέγοντας το **Items**, εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Plot items**, από το οποίο επιλέγονται τα στοιχεία που επιθυμεί ο χρήστης να φαίνονται στην εκτύπωση του πρσανούς, όπως τα βέλη της ταχύτητας, οι εφαρμοζόμενες συνθήκες, η πίεση του νερού των πόρων, ο κάναβος κτλ. (εικόνα 49).



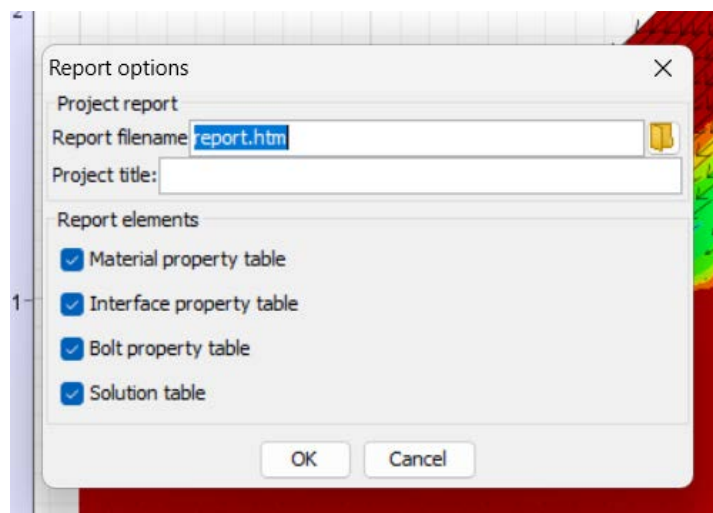
Εικόνα 50: Παράθυρο διαλόγου **Plot items**.

Στην οθόνη του προγράμματος, τελικά εμφανίζεται το προσομοίωμα με τα στοιχεία που επιλέγει ο χρήστης από το **Items** (εικόνα 50).



Εικόνα 51: Τελική εμφάνιση του προσομοιώματος μετά την επίλυσή του.

Τέλος, γίνεται να εξαχθούν τελικοί πίνακες, οι οποίοι θα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Με την επιλογή του **Create Report** από το File ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Report options**, όπου επιλέγονται τα στοιχεία που επιθυμεί ο χρήστης να εμφανίζονται στους πίνακες (εικόνα 51). Έτσι δημιουργείται ένα αρχείο με τα στοιχεία που έχουν επιλεγεί, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων (εικόνα 52).



Εικόνα 52: Παράθυρο διαλόγου **Report options**.

Project file: test.psl
Project title:

Material Properties - Mohr-Coulomb					
Class Name	Density ρ	Cohesion c	Tension σ^t	Friction ϕ	Dilation ψ
Units	kg/m ³	Pa	Pa	Deg.	Deg.
Soil-Clay Soil-Clay: medium plasticity	1800.0	8000.0	0.0	20.0	0.0
Rock limestone	2700.0	6720000.0	1580000.0	42.0	0.0

Material Properties - modified Hoek-Brown									
Class Name	Density ρ	m_b	s	a	σ_c	Tension σ_t	Dilation ψ	Length	SOption
Units	kg/m ³	Pa	Pa	Deg.	Pa	Pa	Deg.	m	
User new1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

Interface Properties				
Class Name	Cohesion Pa	Tensile Str Pa	Friction Deg.	Dilation Deg.
User new 1	0.0	0.0	0.0	0.0

Factor of Safety						
Project	Model	Material Type	Shape	Mesh	Switches	FOS
test	Model_1	Mohr-Coulomb	Simple Slope	Coarse	fc	4.39

Program: FLAC/Slope v8.1.471 & GIIC/Slope v2.20.529
Created: Sun Jan 14 17:41:08 EET 2024

Εικόνα 53: Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το πρόγραμμα.

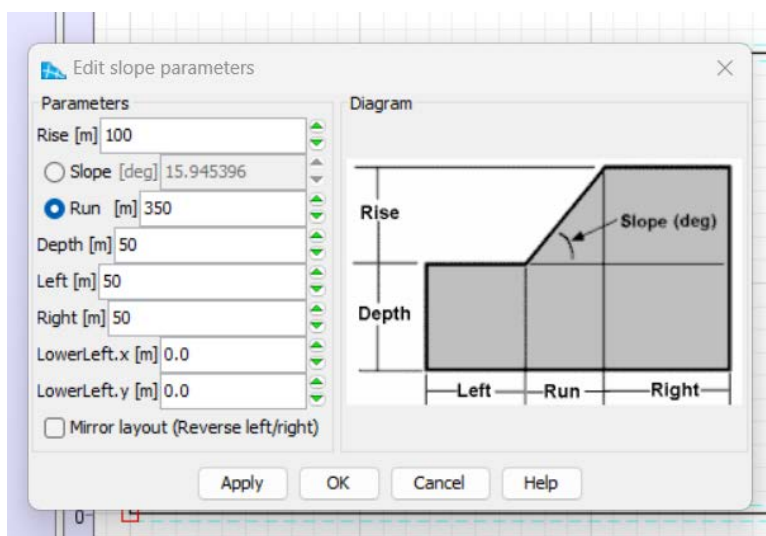
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΣΤΟ FLAC SLOPE

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο, θα επεξηγηθεί αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας του προσομοιώματος, το οποίο απεικονίζει ένα υποθαλάσσιο πρανές, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC/Slope, σε διάφορους συνδυασμούς εδαφών, καταπονήσεων και γεωμετριών. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για να ερευνηθούν οι διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω παραγόντων σε ένα υποθαλάσσιο πρανές, στο οποίο δύναται να κατασκευαστούν υποθαλάσσια έργα υποδομής, όπως π.χ. θαλάσσια αιολικά πάρκα, εξέδρες πετρελαίου και φυσικού αερίου αλλά και υποθαλάσσιοι αγωγοί.

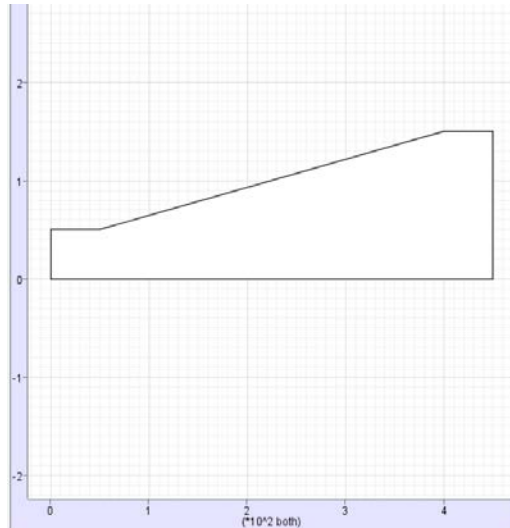
4.2 Τρόπος δημιουργίας του προσομοιώματος

Αρχικά, ορίστηκε η γεωμετρία του πρανούς. Το Rise είναι ίσο με 100m, το Run είναι 350m, το Depth είναι 50m, το Left είναι 50m, και το Right είναι 50m (εικόνα 53). Επομένως το μήκος του πυθμένα είναι 450m, η κλίση του είναι 16° και το ύψος της παρειάς αριστερά είναι 50m και δεξιά 150m. Σε κάποιους συνδυασμούς η κλίση είναι 8° και 10° ενώ τα Rise, Depth, Left και Right παραμένουν ίδια.



Εικόνα 54: Εισαγωγή της γεωμετρίας του πρανούς.

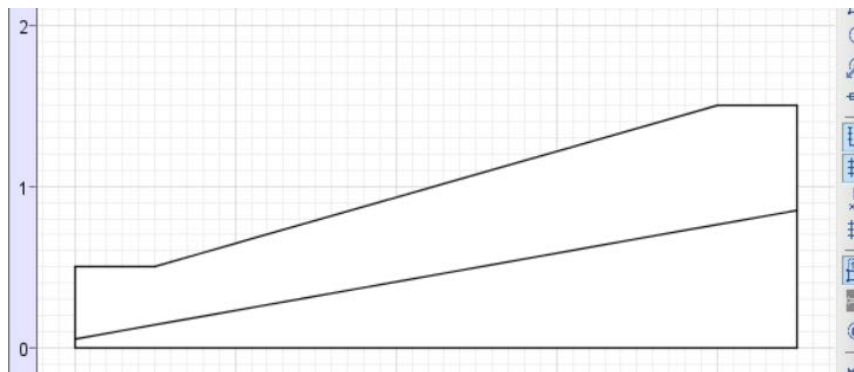
Η γεωμετρία του πρανούς φαίνεται στην εικόνα 54 παρακάτω.



Εικόνα 55: Η γεωμετρία του παραγόμενου πρανούς.

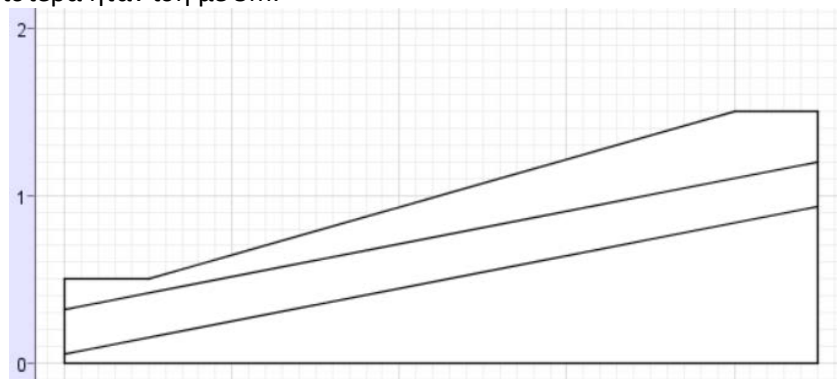
Στη συνέχεια ορίστηκαν τα στρώματα του εδάφους.

- A. Για διστρωματικό έδαφος, η επιφάνεια επαφής των δύο στρωμάτων ορίστηκε υπό κλίση 10° και η τιμή του γ δεξιά ήταν ίση με 85m, ενώ αριστερά ήταν ίση με 5m. Οπότε δημιουργήθηκε το διστρωματικό πρανές της εικόνας 55.



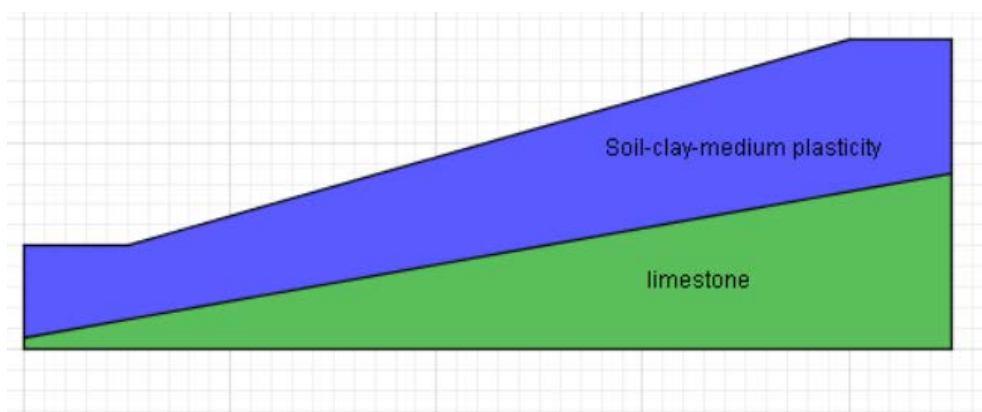
Εικόνα 56: Η γεωμετρία του διστρωματικού πρανούς.

- B. Για τριστρωματικό έδαφος, η πρώτη επιφάνεια επαφής ορίστηκε υπό κλίση 10° και η τιμή του γ δεξιά ήταν ίση με 120m και αριστερά ήταν ίση με 32m, ενώ η δεύτερη επιφάνεια επαφής ορίστηκε υπό κλίση 10° και η τιμή του γ δεξιά ήταν ίση με 93m και αριστερά ήταν ίση με 5m.



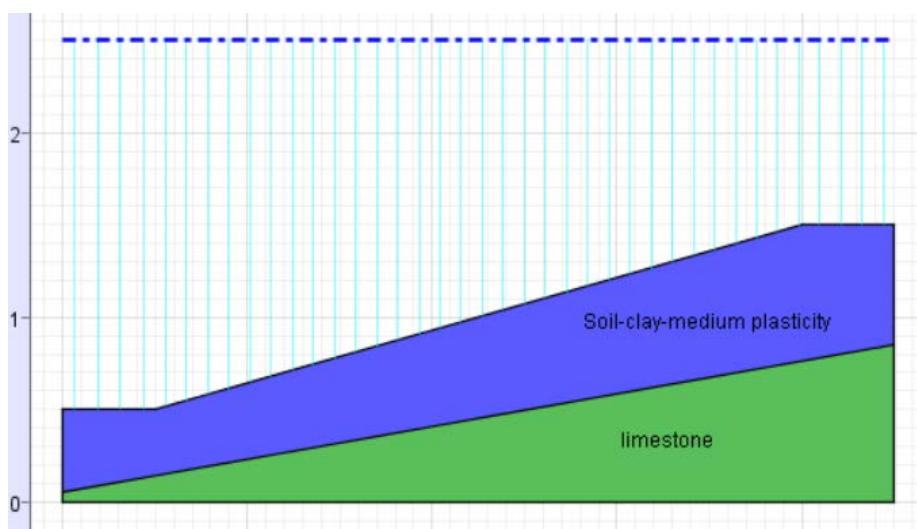
Εικόνα 57: Η γεωμετρία του τριστρωματικού πρανούς.

Έπειτα ορίστηκαν τα υλικά του πρανού. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί υλικών. Ένα μονοστρωματικό αργιλικό πρανές, τέσσερα διστρωματικά πρανή τα οποία είναι: άργιλος-ασβεστόλιθος, άμμος-ασβεστόλιθος, άργιλος-άμμος, ψαμμίτης-ασβεστόλιθος και ένα τριστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές άργιλος-άμμος-ασβεστόλιθος. Οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών πάρθηκαν από το Database του προγράμματος και αυξομειωνόντουσαν έως $\pm 30\%$ ανά 10% , στην άργιλο, τον ασβεστόλιθο και τον ψαμμίτη η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ , ενώ στην άμμο η γωνία τριβής ϕ και το πορώδες n . Σε όλους τους παραπάνω συνδυασμούς χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb, εκτός του συνδυασμού ασβεστόλιθος-ψαμμίτης, όπου χρησιμοποιήθηκε το Modified Hoek-Brown. Στο Modified Hoek-Brown εισήχθησαν οι παράμετροι στο Alternate input και ορίστηκε το D να είναι ίσο με μηδέν, δηλαδή να είναι αδιατάρακτη η βραχομάζα, το m_i για το ψαμμίτη να είναι ίσο με 17 ± 4 , ενώ στον ασβεστόλιθο να είναι ίσο με 10 ± 2 , το GSI να είναι ίσο με 20 και μεγαλύτερο ή ίσο του 60, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου σ_{ci} για το ψαμμίτη είναι σταθερή και ίση με 175MPa, ενώ για τον ασβεστόλιθο είναι επίσης σταθερή και ίση με 75MPa και τέλος το tension παραμένει σταθερό και για τα δύο υλικά και συγκεκριμένα για το ψαμμίτη είναι ίσο με 1,17MPa, ενώ για τον ασβεστόλιθο είναι ίσο με 1,58MPa. Ένα ενδεικτικό πρανές με τα γεωυλικά του φαίνεται στην εικόνα 57.



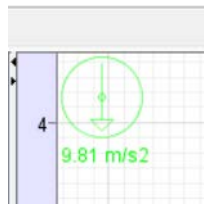
Εικόνα 58: Ενδεικτικό πρανές με ορισμένα τα γεωυλικά του.

Στη συνέχεια εισήχθη ο υδροφόρος ορίζοντας (που αντιστοιχεί στη στάθμη της θάλασσας), ο οποίος σε όλους τους συνδυασμούς βρισκόταν σε γ ίσο με 250m.



Εικόνα 59: Ενδεικτικό πρανές με υδροφόρο ορίζοντα.

Το διάνυσμα της βαρύτητας είναι κατακόρυφο και ίσο με $9,81 \frac{m}{s^2}$.



Εικόνα 60: Βαρύτητα σε στατικές αναλύσεις.

Επιπλέον εισάχθηκε και μία ενδεικτική φόρτιση, η οποία αντιπροσώπευε την ύπαρξη ανεμογεννήτριας είτε στη στέψη, είτε στο μέσο, είτε στον πόδα του πρσανούς. Παρατηρήθηκε πως οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας στους διάφορους συνδυασμούς, ήταν ίδιες ανεξάρτητα από τη θέση στην οποία βρισκόταν το φορτίο. Η τιμή του φορτίου της ανεμογεννήτριας ήταν ίση με $-8 \times 10^7 \text{ N}$, όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει θλίψη (οι θετικές δυνάμεις είναι εφελκυστικές). Ένα ενδεικτικό τελικό προσομοίωμα μετά και την εισαγωγή της φόρτισης από την ανεμογεννήτρια φαίνεται στην εικόνα 61.



Εικόνα 61: Ενδεικτικό, τελικό προσομοίωμα μετά την εισαγωγή του φορτίου της ανεμογεννήτριας.

Όλοι οι συνδυασμοί έγιναν σε medium διακριτοποίηση, καθώς οι fine απαιτούσαν μεγάλο χρονικό διάστημα για να επιλυθούν και έδιναν παρόμοια αποτελέσματα συντελεστών ασφαλείας με τις medium, οι οποίες χρειαζόντουσαν μικρότερο χρονικό διάστημα για την επίλυση τους (5 λεπτά περίπου η κάθε μία).

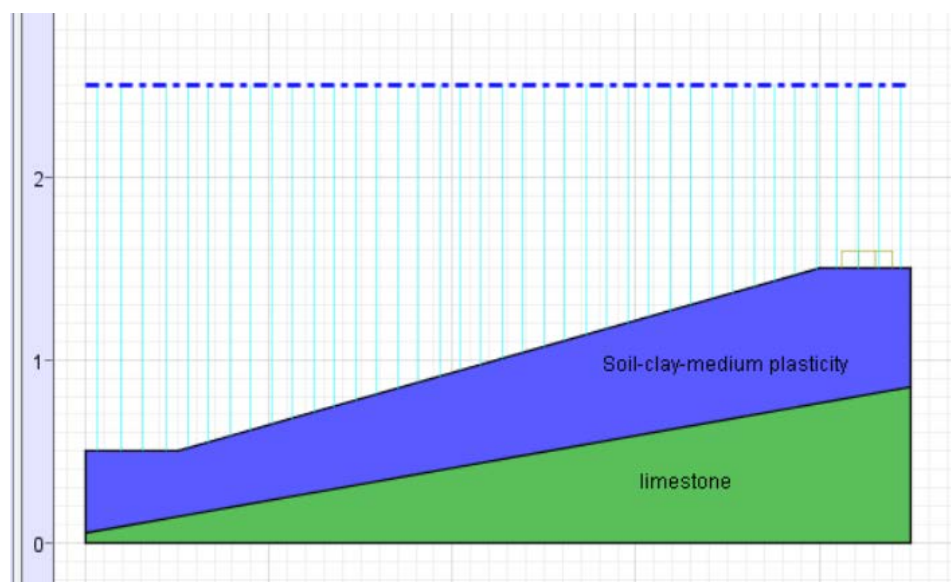
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας του πρανού, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη γεωυλικών, εδαφικών και βραχωδών, διαφορετικές κλίσεις υποθαλάσσιων πρανών και διαφορετικές καταπονήσεις, ώστε να διερευνηθούν πολλές περιπτώσεις υποθαλάσσιων πρανών, καθώς και ο τρόπος που αντιδρούν τα γεωυλικά (με την πρόκληση ή μη αστοχίας) σε διάφορες φορτίσεις. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν βοηθούν στο σχεδιασμό αλλά και την προστασία υποθαλάσσιων ή και παράκτιων έργων υποδομής έναντι αστοχίας. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων, δηλαδή οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε περίπτωση, οι επιφάνειες ολίσθησης-αστοχίας καθώς και οι τιμές του ρυθμού μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης. Υπάρχουν δύο εναλλακτικές περιπτώσεις, είτε θα αστοχεί το πρανές εμφανίζοντας μία επιφάνεια ολίσθησης, είτε δεν θα αστοχεί και η επιφάνεια ολίσθησης που θα εμφανίζεται θα είναι δυνητική, δηλαδή θα είναι η επιφάνεια αστοχίας που θα εμφανιζόταν στο πρανές αν αστοχούσε.

5.2 Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Ασβεστόλιθος

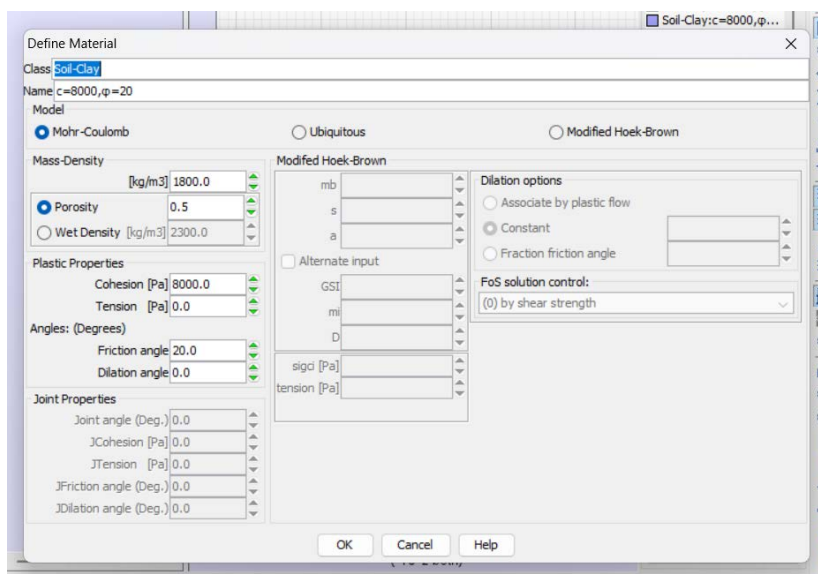
Παρακάτω απεικονίζεται το πρώτο προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από δύο στρώματα, ένα αργιλικό και ένα ασβεστολιθικό.



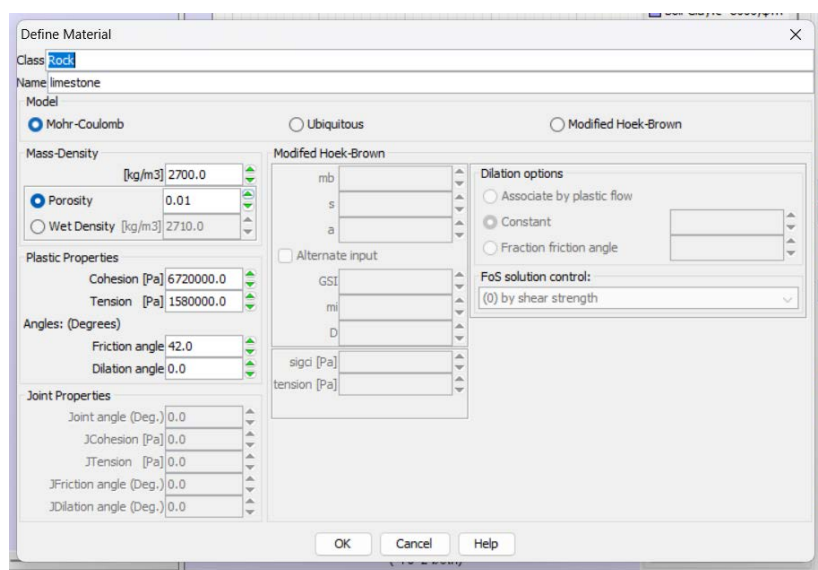
Εικόνα 62: Διστρωματικό πρανές: Άργιλος- Ασβεστόλιθος.

Οι αναλύσεις έγιναν με τη χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb που περιεγράφηκε παραπάνω. Για τον ορισμό των μηχανικών παραμέτρων των γεωυλικών χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, οι τιμές που υπήρχαν στη βάση δεδομένων του προγράμματος για τα συγκεκριμένα υλικά. Η συνοχή c για την άργιλο ήταν ίση με 8kPa, ενώ για τον ασβεστόλιθο ήταν ίση με 6,72MPa. Η τιμή της γωνίας τριβής για την άργιλο ήταν ίση με 20°, ενώ για τον ασβεστόλιθο ήταν 42°. Για τη διερεύνηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για τον συγκεκριμένο

συνδυασμό, οι παραπάνω τιμές αυξομειώθηκαν κατά $\pm 30\%$, με τις τιμές να κυμαίνονται για τη συνοχή της αργίλου από 5,6kPa έως 10,4kPa, τη συνοχή του ασβεστόλιθου από 4,704MPa έως 8,736MPa, τη γωνία τριβής της αργίλου από 14° έως 26° και τη γωνία τριβής του ασβεστόλιθου από $29,4^\circ$ έως $54,6^\circ$. Παρακάτω απεικονίζονται οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων όπως δίνονται από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.



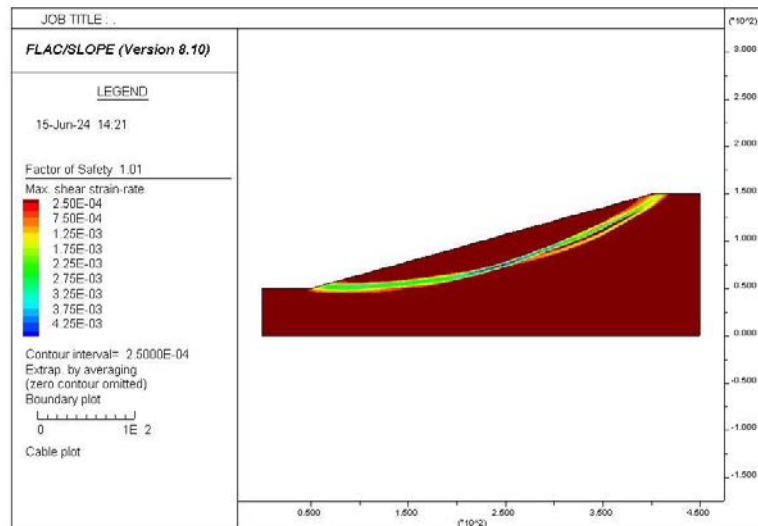
Εικόνα 63: Τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο, από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.



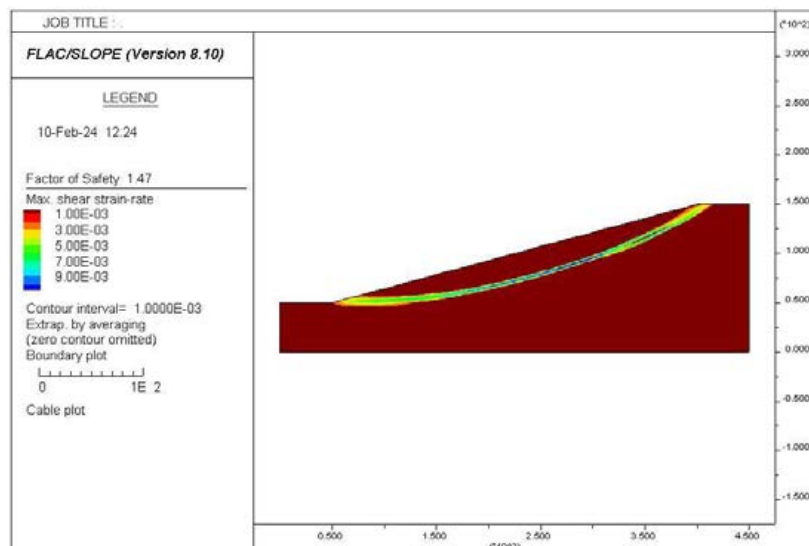
Εικόνα 64: Τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ασβεστόλιθο, από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας, μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές της συνοχής και της γωνίας τριβής της αργίλου και κρατώντας σταθερές τις αντίστοιχες τιμές για τον ασβεστόλιθο. Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ήταν στατική και το πρηνές δεν δεχόταν κανένα άλλο φορτίο εκτός από αυτό της βαρύτητας. Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης στο πρηνές καθώς και ο συντελεστής ασφαλείας, όπως προκύπτουν για τη χρήση των ελάχιστων,

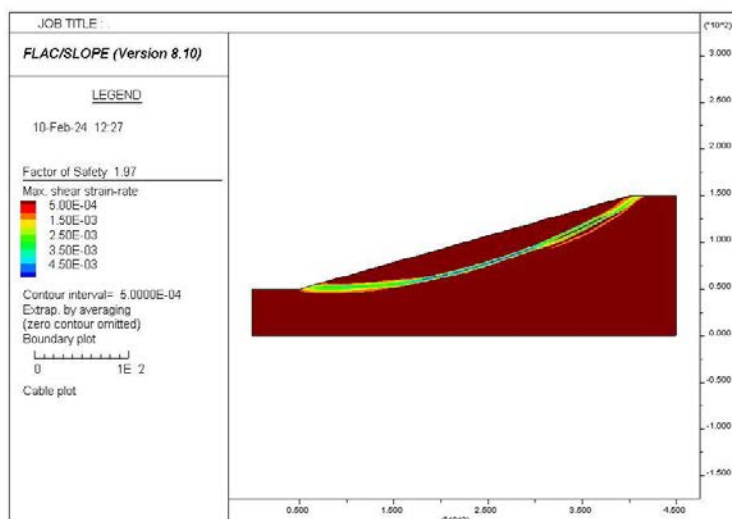
των κανονικών και των μέγιστων τιμών των μηχανικών παραμέτρων της αργίλου. Παρατηρείται πως και στις τρεις περιπτώσεις δεν υπάρχει αστοχία των πρανών, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος του 1 και οι εικονιζόμενες επιφάνειες ολίσθησης είναι δυνητικές. Στην πρώτη περίπτωση η ευστάθεια είναι σχεδόν οριακή, μιας και ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,01.



Εικόνα 65: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=5600\text{Pa}$ και $\phi=14^\circ$) ($FoS=1,01$, σχεδόν οριακή ισορροπία).

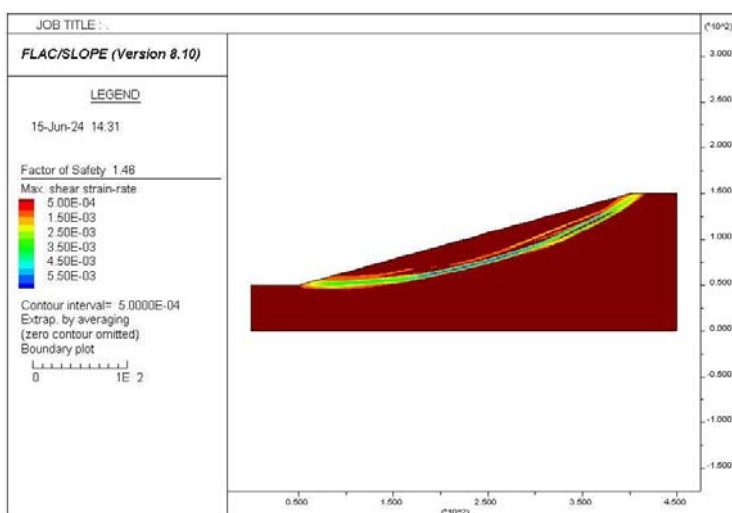


Εικόνα 66: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=8000\text{Pa}$ και $\phi=20^\circ$) ($FoS=1,47$).



Εικόνα 67: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=10400\text{Pa}$ και $\phi=24^\circ$) ($\text{FoS}=1,97$).

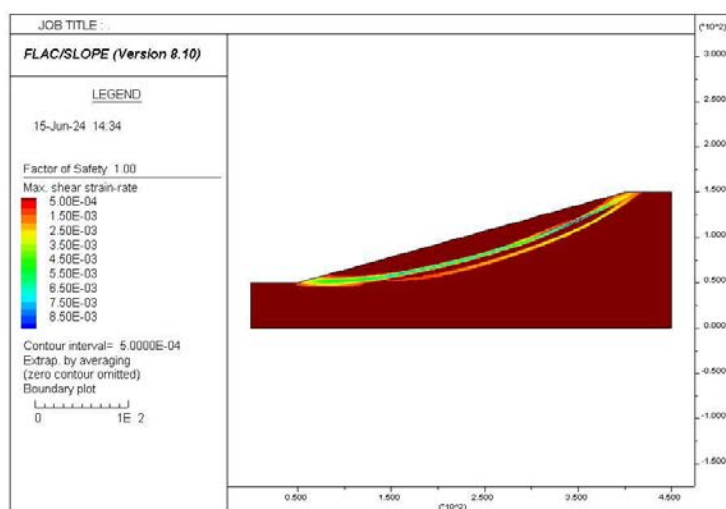
Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερές τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων της άργιλου και μεταβάλλοντας τις αντίστοιχες τιμές για τον ασβεστόλιθο. Και σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ήταν στατική και η μόνη φόρτιση του πρσανούς ήταν η βαρυτική. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή του συντελεστή ασφαλείας δεν μεταβαλλόταν για αλλαγές των c και ϕ του ασβεστόλιθου. Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης σε αυτή την περίπτωση καθώς και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας.



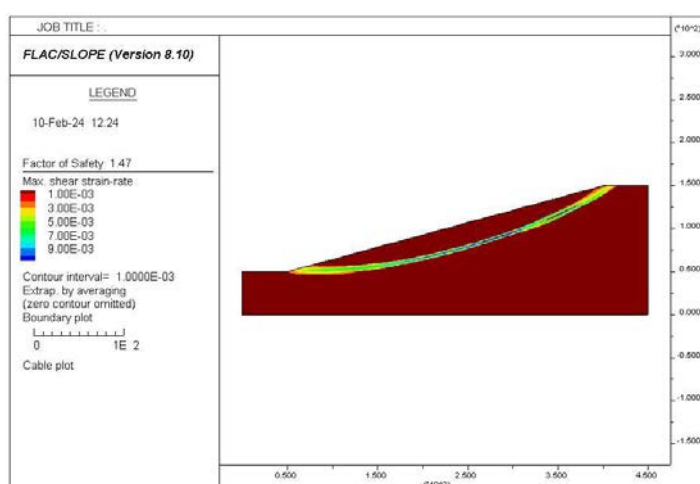
Εικόνα 68: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τον ασβεστόλιθο ($\text{FoS}=1,46$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί. Αν αστοχήσει το πρανές, η αστοχία θα συμβεί στο αργιλικό στρώμα, καθώς εκεί αναπτύσσεται η δυνητική επιφάνεια ολίσθησης.

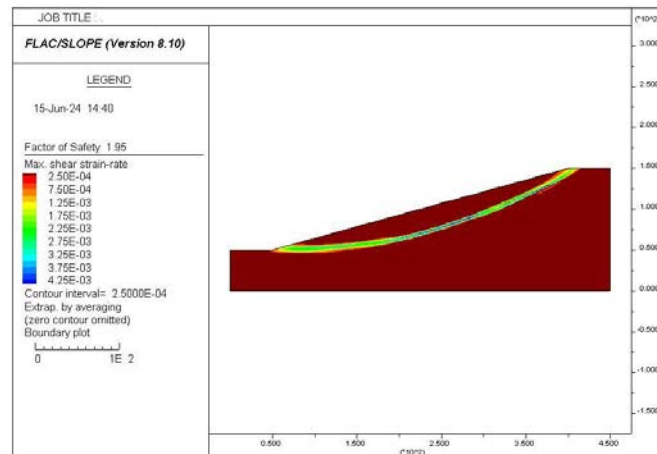
Έπειτα στις αναλύσεις αυξομειωνόντουσαν ταυτόχρονα οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων και για την άργιλο και για τον ασβεστόλιθο. Η ανάλυση ήταν και πάλι στατική και η μόνη δράση που ασκούσαν στο πρανές ήταν η βαρυτική. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις παραπάνω αναλύσεις, ξανά και σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρατηρείται αστοχία των πρανών και οι εικονιζόμενες επιφάνειες ολίσθησης είναι δυνητικές, όμως στην εικόνα 69 έχουμε οριακή ισορροπία, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1.



Εικόνα 69: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άργιλου και του ασβεστόλιθου (FoS=1,00, οριακή ισορροπία).



Εικόνα 70: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άργιλου και του ασβεστόλιθου (FoS=1,46).

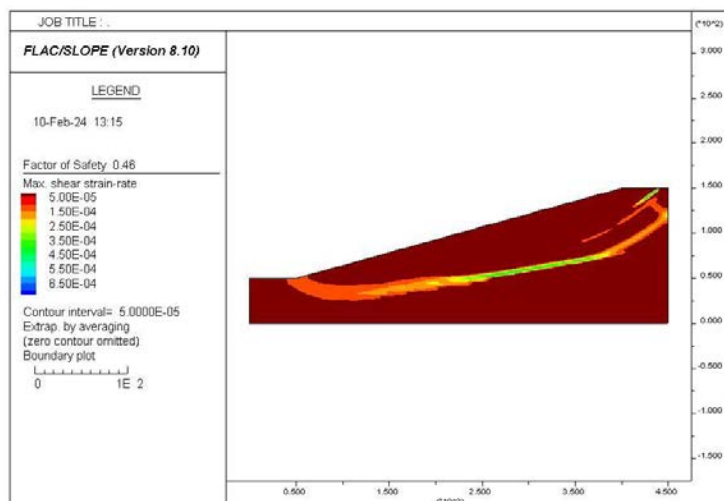


Εικόνα 71: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου (FoS=1,95).

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
	minFoS	maxFoS
Αυξομειώσεις ϕ, c αργίλου	1,00	1,97
Αυξομειώσεις ϕ, c ασβεστόλιθου	1,46	1,46
Αυξομειώσεις και των 2	1,00	1,95

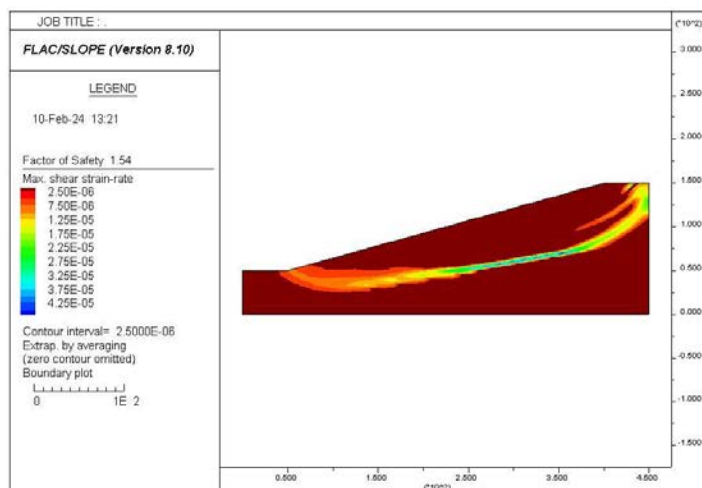
Πίνακας 1: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις στατικές αναλύσεις.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες και οι μέσες τιμές των c και ϕ . Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36, 0,5 και 1,0. Αρχικά έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του πρανού και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων. Στη συνέχεια ταυτόχρονα με τις μεταβολές των c και ϕ , η κλίση του πρανού μειώθηκε σε 10° και 8° . Και τέλος διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία και μεταβάλλοντας τις μηχανικές παραμέτρους, επιβλήθηκε φορτίο ίσο με $-8 \times 10^7 N$ στη στέψη, στη μέση και στον πόδα του πρανού. Το θλιπτικό φορτίο μπαίνει με αρνητικό πρόσημο διότι στο πρόγραμμα με θετικό πρόσημο λαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω αναλύσεις.



Εικόνα 72: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου και για $\alpha=1$ ($FoS=0,46$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά λίγο πιο κάτω από την στέψη και καταλήγει στην αρχή του πόδα, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 85m, μέσο πάχος 15m και είναι καμπυλωτή. Η αστοχία πραγματοποιείται στο αργιλικό στρώμα, καθώς εκεί αναπτύσσεται η επιφάνεια ολίσθησης.



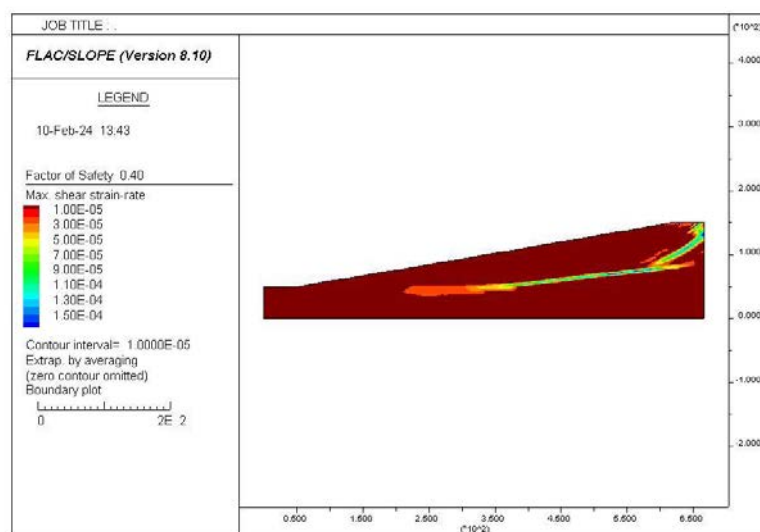
Εικόνα 73: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου και για $\alpha=0,16$ ($FoS=1,54$).

Εδώ, ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί και στη δυνητική επιφάνεια ολίσθησης που φαίνεται στην εικόνα 74 αναπτύσσονται οι μέγιστοι ρυθμοί διατμητικής παραμόρφωσης.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α)			
α	min c,φ	ενδιάμεσα c,φ	max c,φ
0,16	0,807	1,166	1,537
0,36	0,584	0,846	1,123
0,5	0,529	0,771	1,025
1	0,463	0,67	0,896

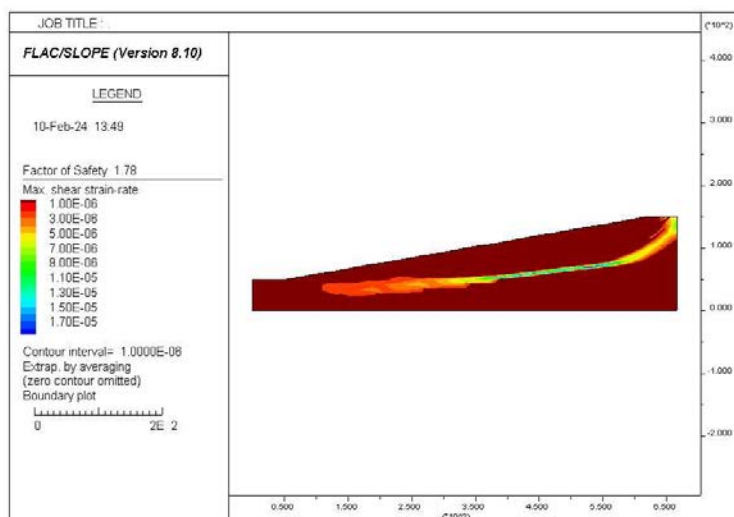
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c,φ και α).

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα του FoS για αλλαγή στην κλίση. Αρχικά η κλίση μειώνεται στις 10° και στη συνέχεια στις 8°. Υπό αυτές τις κλίσεις αυξομειώνονταν τα c και φ, και το α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36 και 1.



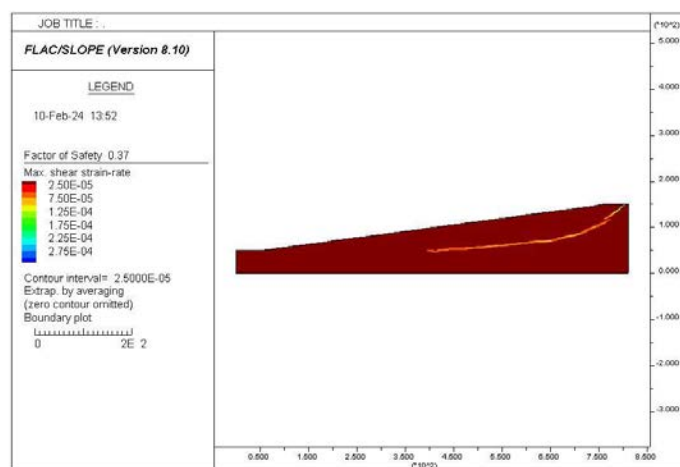
Εικόνα 74: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για α=1 και κλίση 10° (FoS=0,40).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο δεξί άκρο της στέψης και καταλήγει κοντά στον πόδα αλλά στη μέση του προσομοιώματος, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 70m, μέσο πάχος 10m και η γεωμετρία της είναι ακανόνιστη, καθώς αποτελείται και από ευθύγραμμα και από καμπυλωτά τμήματα. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο γεωυλικών.



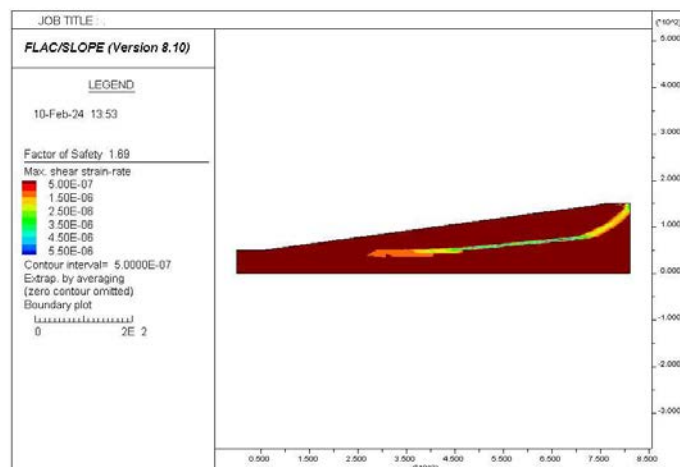
Εικόνα 75: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 10° (FoS=1,78).

Ο συντελεστής ασφαλείας (FoS=1,78) είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.



Εικόνα 76: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και κλίση 8° (FoS=0,37).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο δεξί άκρο της στέψης και καταλήγει κοντά στον πόδα αλλά στη μέση του προσομοιώματος, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 60m, μέσο πάχος 2m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή και σχετικά μικρού εύρους. Η αστοχία πραγματοποιείται κοντά στην επιφάνεια επαφής των δύο γεωυλικών.



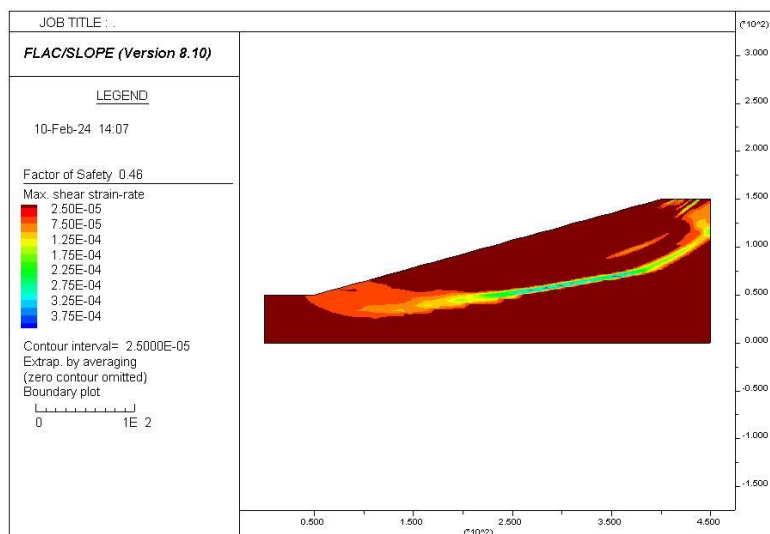
Εικόνα 77: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 8° ($FoS=1,69$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και κλίσης)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,889	1,686	κλίση 8 μοίρες
0,36	0,482	0,928	
1	0,369	0,717	
0,16	0,939	1,779	κλίση 10 μοίρες
0,36	0,51	0,982	
1	0,4	0,775	

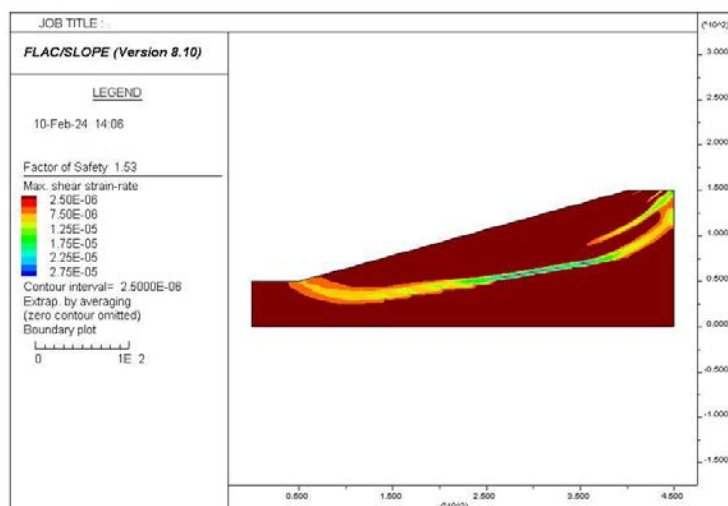
Πίνακας 3: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, ϕ , α και κλίσης).

Τέλος, προστέθηκε και η φόρτιση στο πρανές, αρχικά στη στέψη και έπειτα στη μέση και στον πόδα του πρανούς. Από τις παραπάνω αναλύσεις, διαπιστώθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας δεν παρουσίασε αξιόλογη μεταβολή όταν μεταβαλλόταν η θέση του φορτίου στο πρανές. Ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης a έλαβε τιμές ίσες με 0,16, 0,5 και 1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 78: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=0,46$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο άκρο της στέψης και καταλήγει στον πόδα, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 70m, μέσο πάχος 30m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Ακόμη παρατηρείται πως διαχέεται σε μεγάλη έκταση στα άκρα της. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια των δύο γεωυλικών.



Εικόνα 79: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=1,53$).

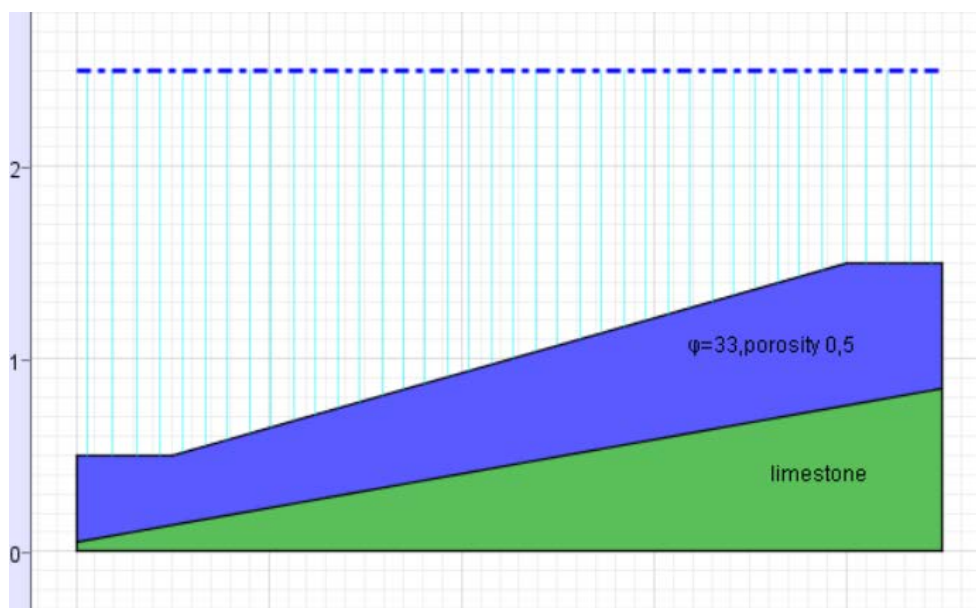
Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και επιβολή φορτίου)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,803	1,533	Φορτίο στη στέψη
0,5	0,533	1,025	
1	0,463	0,896	
0,16	0,803	1,533	Φορτίο στη μέση
0,5	0,533	1,025	
1	0,463	0,896	
0,16	0,803	1,533	Φορτίο στον πόδα
0,5	0,533	1,025	
1	0,463	0,896	

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c,φ και α, και επιβολή φορτίου) .

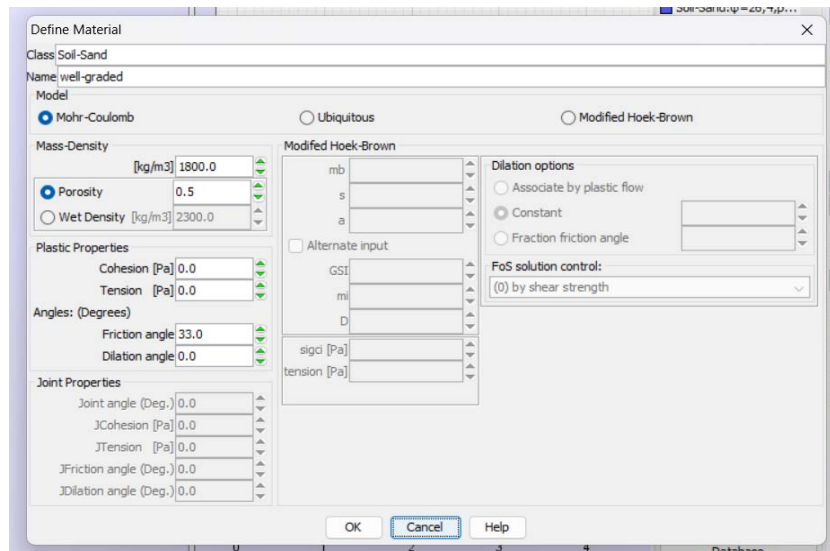
5.3 Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άμμος-Ασβεστόλιθος

Παρακάτω απεικονίζεται το δεύτερο προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από δύο στρώματα, ένα αμμώδες και ένα ασβεστολιθικό.



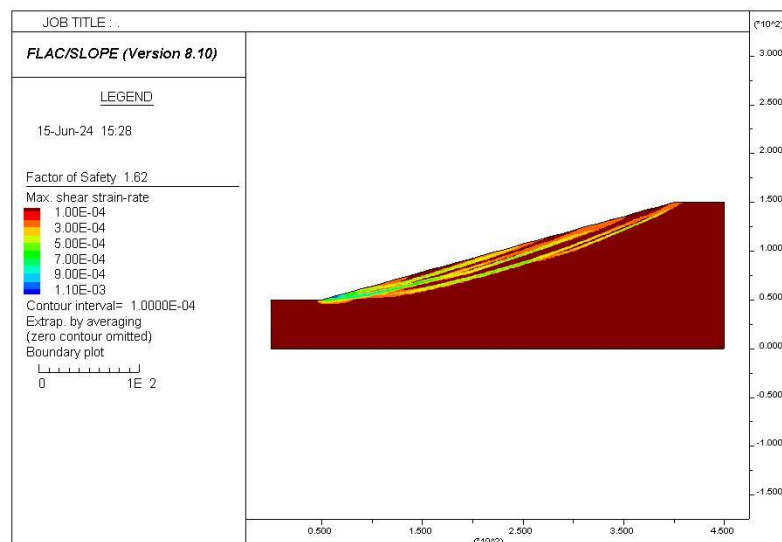
Εικόνα 80: Διστρωματικό πρανές: Άμμος- Ασβεστόλιθος.

Οι αναλύσεις έγιναν με τη χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb που περιεγράφηκε παραπάνω. Για τον ορισμό των μηχανικών παραμέτρων των υλικών χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, οι τιμές που υπήρχαν στη βάση δεδομένων του προγράμματος για τα συγκεκριμένα εδάφη. Το πορώδες για την άμμο ήταν ίσο με $n=0,5$, ενώ για τον ασβεστόλιθο η συνοχή ήταν ίση με $6,72\text{MPa}$. Η τιμή της γωνίας τριβής για την άμμο ήταν ίση με 33° , ενώ για τον ασβεστόλιθο ήταν 42° . Για τη διερεύνηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για τον συγκεκριμένο συνδυασμό, οι παραπάνω τιμές αυξομειώθηκαν κατά $\pm 30\%$, με τις τιμές να κυμαίνονται για το πορώδες της άμμου από $0,35$ έως $0,65$, τη συνοχή του ασβεστόλιθου από $4,704\text{MPa}$ έως $8,736\text{MPa}$, τη γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου από $23,1^\circ$ έως $42,9^\circ$ και τη γωνία τριβής του ασβεστόλιθου από $29,4^\circ$ έως $54,6^\circ$. Παρακάτω απεικονίζονται οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων όπως δίνονται από τη βάση δεδομένων του προγράμματος για την άμμο, αφού για τον ασβεστόλιθο παρουσιάστηκαν παραπάνω.

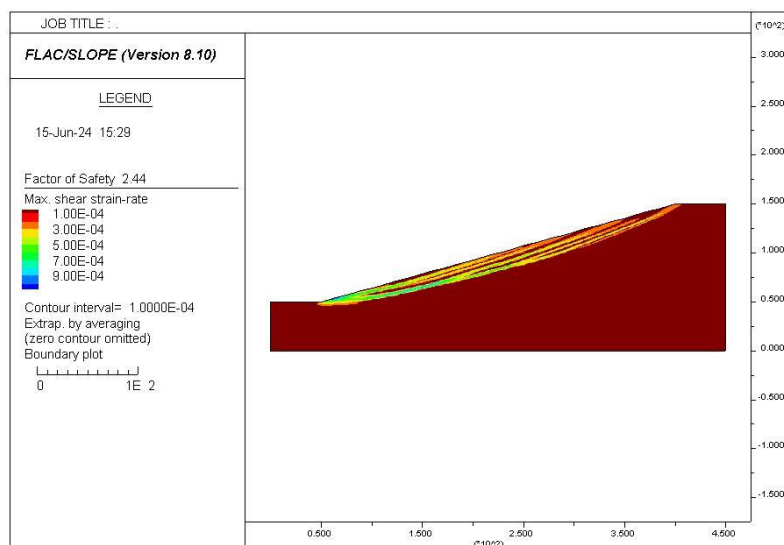


Εικόνα 81: Τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο, από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.

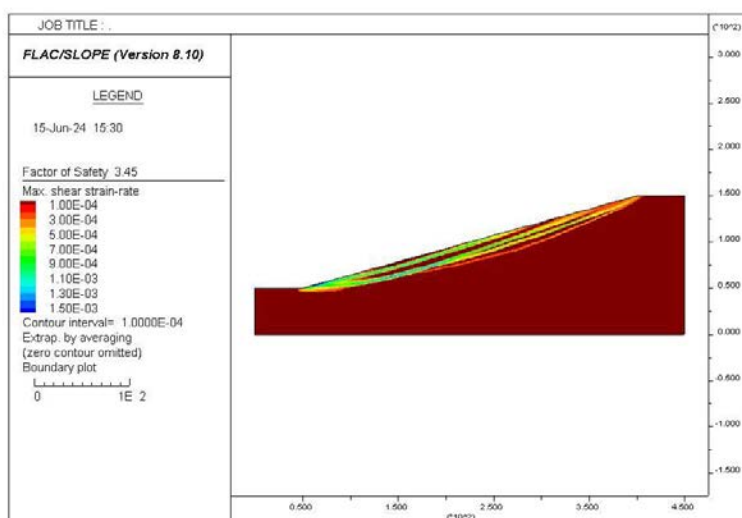
Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις, στις οποίες μεταβάλλονταν το πορώδες και η γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου, με τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής του ασβεστόλιθου να παραμένουν σταθερές. Στο προσομοίωμα ασκούταν μόνο η βαρυτική δύναμη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων της άμμου. Παρατηρείται πως και στις 3 περιπτώσεις τα πρηνή δεν αστοχούν καθώς οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτεροι της μονάδας.



Εικόνα 82: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,35$ και $\phi=23,1^\circ$) ($FoS=1,62$).

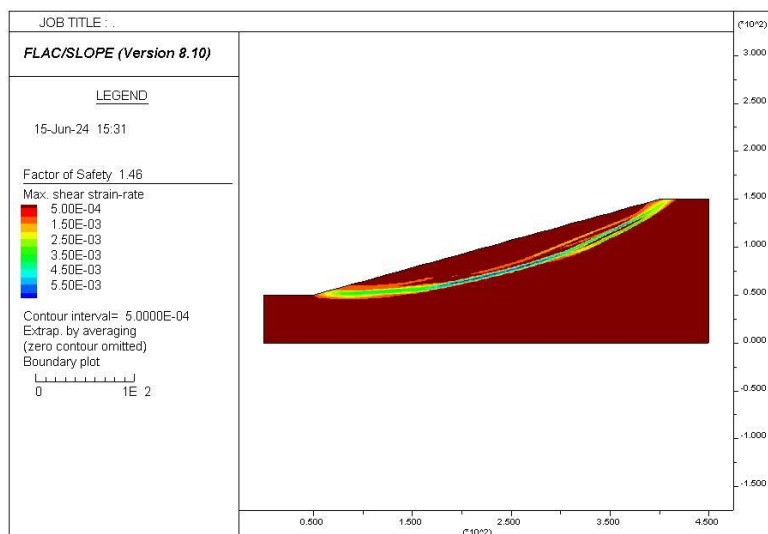


Εικόνα 83: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,50$ και $\phi=33^\circ$) ($FoS=2,44$).



Εικόνα 84: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,65$ και $\phi=42,9^\circ$) ($FoS=3,45$).

Οι επόμενες αναλύσεις έγιναν διατηρώντας σταθερές τις μηχανικές παραμέτρους της άμμου και μεταβάλλοντας εκείνες του ασβεστόλιθου. Η αναλύσεις ήταν στατικές και μόνο η βαρυτική δύναμη ασκούταν στο πραινός. Στις αναλύσεις αυτές παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας παρέμενε σταθερός σε οποιαδήποτε αλλαγή των c και ϕ του ασβεστόλιθου. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.



Εικόνα 85: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τον ασβεστόλιθο (FoS=1,46).

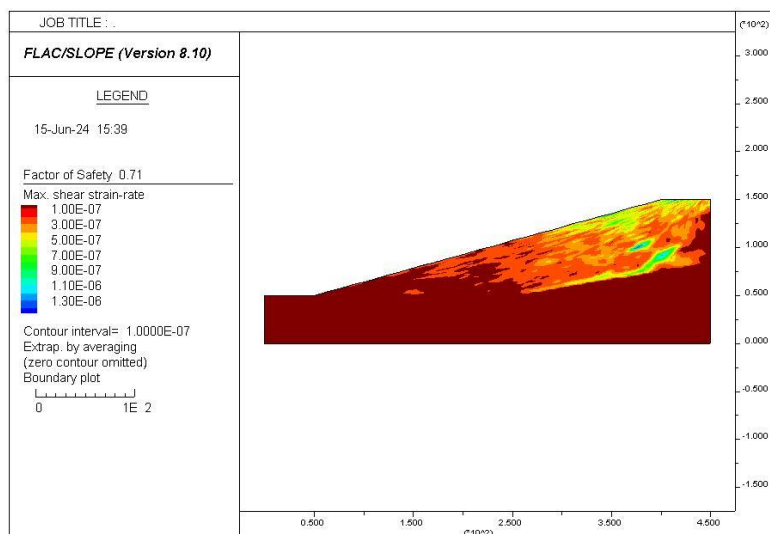
Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πραινές δεν αστοχεί.

Έπειτα, στις αναλύσεις ευαισθησίας, αυξομειώνονταν ταυτόχρονα οι μηχανικές παράμετροι των δύο γεωυλικών του υποθαλάσσιου πραινούς. Οι αναλύσεις ήταν και πάλι στατικές και υπήρχε μόνο η βαρυτική φόρτιση. Παρατηρήθηκε πως οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας του προσομοιώματος ήταν ίσες με εκείνων που προέκυψαν κατά τη μεταβολή των μηχανικών παραμέτρων της άμμου. Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις παραπάνω αναλύσεις.

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
	minFoS	maxFoS
Αυξομειώσεις ϕ, c άμμου	1,623	3,451
Αυξομειώσεις ϕ, c ασβεστόλιθου	2,443	2,443
Αυξομειώσεις και των 2	1,623	1,947

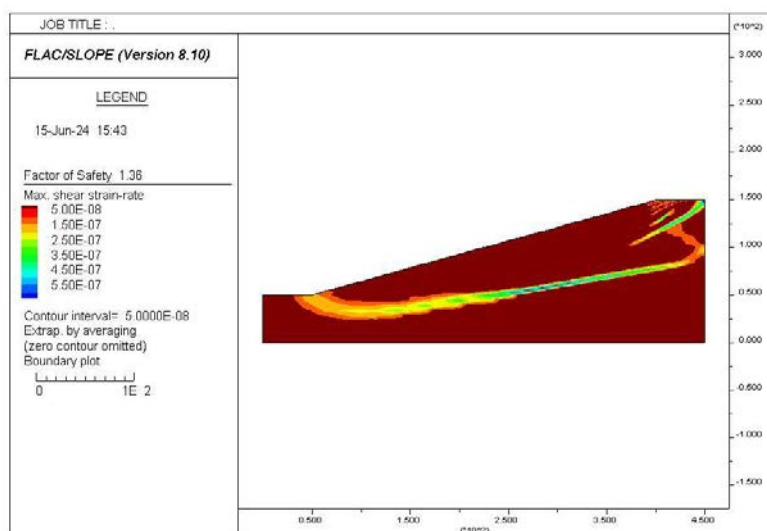
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις στατικές αναλύσεις.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν οι δυναμικές αναλύσεις. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες και οι μέσες τιμές των c , η και ϕ . Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης a έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36, 0,5 και 1,0. Αρχικά έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του πραινούς και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων.



Εικόνα 86: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και $\alpha=1$ (FoS=0,71).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησης αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια των δύο γεωυλικών, βρίσκεται σε μέσο βάθος 80m από την επιφάνεια του πρανούς και η γεωμετρία της είναι ακανόνιστη. Η παραμόρφωση του πρανούς διαχέεται σχεδόν σε όλη την έκταση του άνω τμήματος του πρανούς. Η αστοχία πραγματοποιείται στο αμμόδες στρώμα.



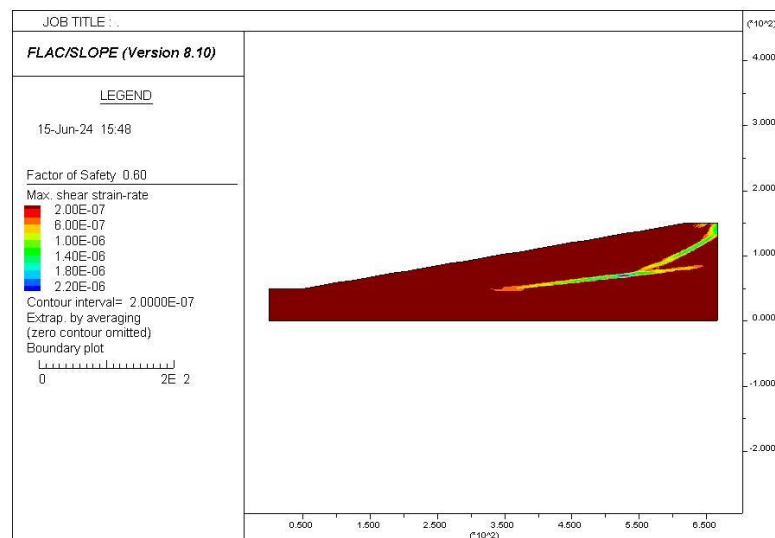
Εικόνα 87: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και $\alpha=0,16$ (FoS=1,36).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α)			
α	min c,φ	ενδιάμεσα c,φ	max c,φ
0,16	0,541	0,795	1,084
0,36	0,502	0,721	0,99
0,5	0,49	0,717	0,998
1	0,463	0,67	0,896

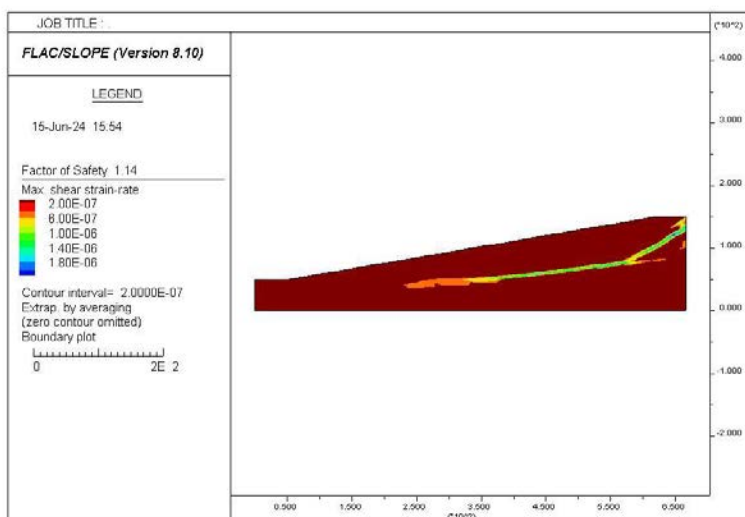
Πίνακας 6: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, φ, η και α).

Έπειτα ακολούθησαν οι δυναμικές αναλύσεις με μεταβολή της κλίσης του πρανούς και των μηχανικών παραμέτρων. Αρχικά η κλίση μειώθηκε στις 10° και μετά στις 8° . Η τιμή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης ήταν ίση με 0,16, 0,36 και 1. Παρατηρήθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για σταθερή κλίση και σταθερές τιμές των μηχανικών παραμέτρων, παρέμενε σταθερή για τις μεταβολές του α και για 8° και για 10° .



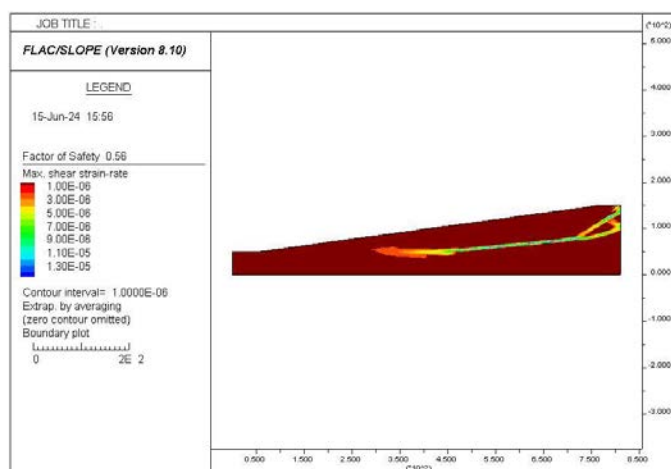
Εικόνα 88: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και κλίση 10° (FoS=0,60).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά από τη στέψη και καταλήγει περίπου στο μέσο της απόστασης έως τον πόδα, έχει μέγιστο βάθος από την επιφάνεια του πρανούς περίπου 50m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή στην αρχή και μετά πιο ευθύγραμμη. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια των δύο γεωυλικών.



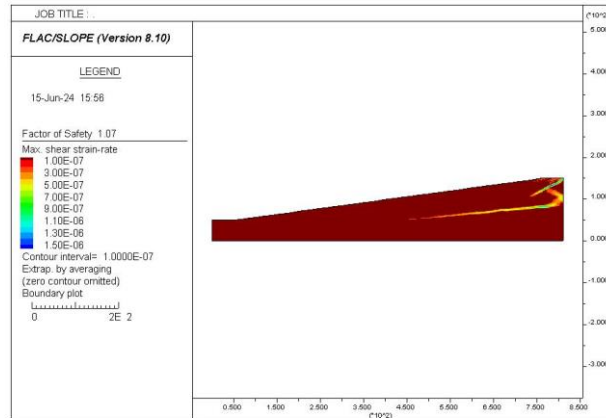
Εικόνα 89: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 10° (FoS=1,14).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι λίγο μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.



Εικόνα 90: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και κλίση 8° (FoS=0,56).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στη στέψη και καταλήγει στη μέση περίπου του πρανούς, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 45m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Η αστοχία φαίνεται ότι πραγματοποιείται στην επιφάνεια επαφής των στρωμάτων.



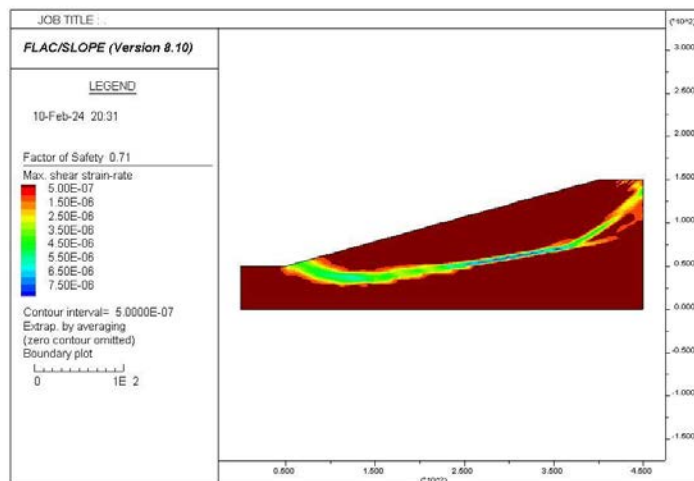
Εικόνα 91: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 8° ($FoS=1,07$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι λίγο μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και κλίσης)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,561	1,068	Κλίση 8 μοίρες
0,36	0,561	1,068	
1	0,561	1,068	
0,16	0,604	1,143	Κλίση 10 μοίρες
0,36	0,6	1,143	
1	0,6	1,143	

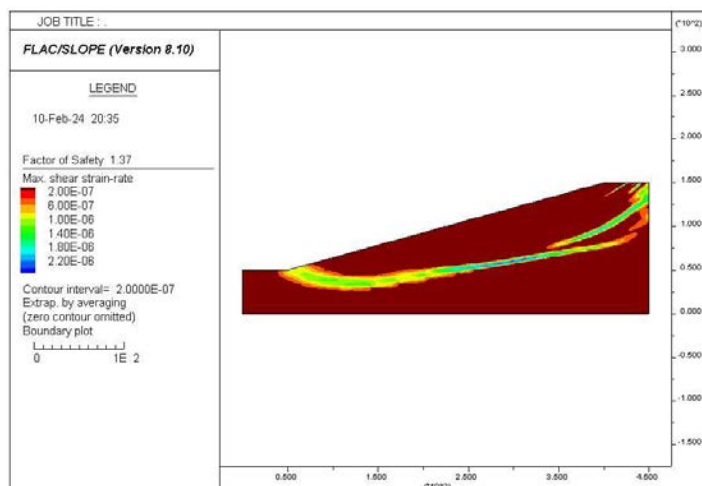
Πίνακας 7: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, ϕ, n, α και κλίσης).

Τέλος πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις με επιβολή φορτίου. Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης πήρε τιμές ίσες με 0,16, 0,5 και 1. Το φορτίο επιβαλλόταν στη στέψη, στη μέση και στον πόδα του πρανούς. Παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας ήταν ανεξάρτητος της θέσης που επιβαλλόταν το φορτίο. Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στον συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 92: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=0,71$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο άκρο της στέψης και καταλήγει στον πόδα, έχει μέγιστο βάθος από την επιφάνεια του πρανούς ίσο με 60m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια των δύο γεωυλικών.



Εικόνα 93: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=1,37$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

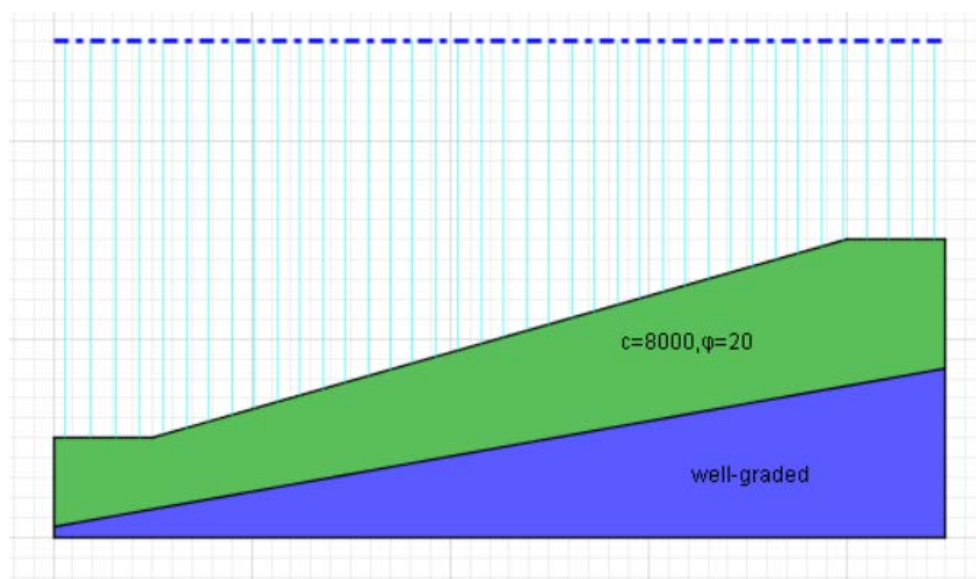
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και επιβολή φορτίου)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,713	1,369	Φορτίο στη στέψη
0,5	0,713	1,369	
1	0,713	1,369	
0,16	0,713	1,369	Φορτίο στη μέση
0,5	0,713	1,369	
1	0,713	1,369	
0,16	0,713	1,369	Φορτίο στον πόδα
0,5	0,713	1,369	
1	0,713	1,369	

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c,φ,η,α και ύπαρξη φορτίου).

Συμπερασματικά, το πρανές στις στατικές αναλύσεις είναι αρκετά σταθερό και δεν οδηγείται σε αστοχία. Στις δυναμικές αναλύσεις παρατηρείται αστοχία η οποία δεν συνδέεται με τις αυξομειώσεις του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης, αλλά με τις αυξομειώσεις των μηχανικών παραμέτρων του πρανούς.

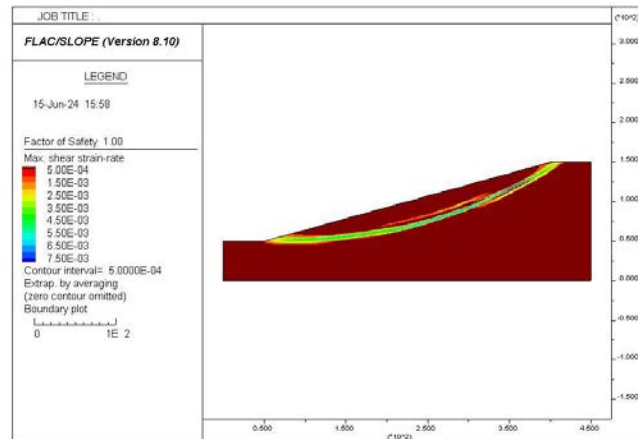
5.4 Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Άμμος

Παρακάτω απεικονίζεται το τρίτο προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από δύο εδαφικά στρώματα, ένα αργιλικό και ένα αμμώδες.

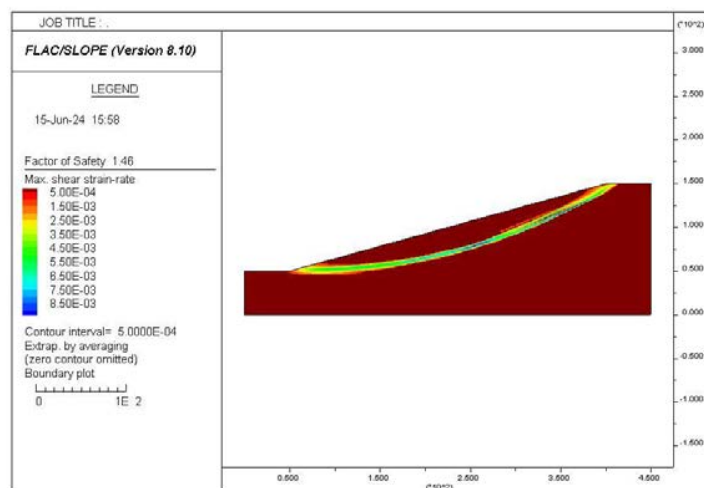


Εικόνα 94: Διστρωματικό πρανές άργιλος-άμμος.

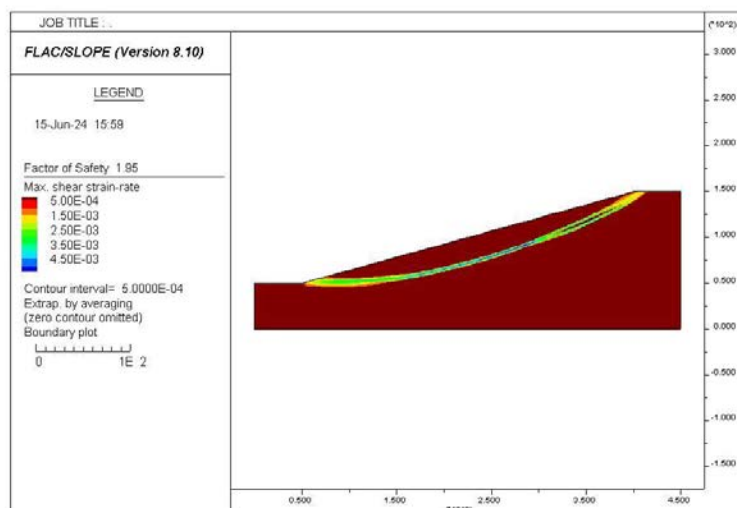
Οι αναλύσεις έγιναν με τη χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb που περιεγράφηκε παραπάνω. Για τον ορισμό των μηχανικών παραμέτρων των εδαφών χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, οι τιμές που υπήρχαν στη βάση δεδομένων του προγράμματος για τα συγκεκριμένα εδάφη. Η συνοχή c για την άργιλο ήταν ίση με 8kPa , ενώ για την άμμο το πορώδες ήταν ίσο με $n=0,5$. Η τιμή της γωνίας τριβής για την άργιλο ήταν ίση με 20° , ενώ για την άμμο ήταν 33° . Για τη διερεύνηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για τον συγκεκριμένο συνδυασμό, οι παραπάνω τιμές αυξομειώθηκαν κατά $\pm 30\%$, με τις τιμές να κυμαίνονται για τη συνοχή της αργίλου από $5,6\text{kPa}$ έως $10,4\text{kPa}$, το πορώδες της άμμου από $n=0,35$ έως $n=0,65$, τη γωνία εσωτερικής τριβής της αργίλου από 14° έως 26° και τη γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου από $23,1^\circ$ έως $42,9^\circ$. Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων όπως δίνονται από τη βάση δεδομένων του προγράμματος έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις, στις οποίες μεταβάλλονταν η συνοχή και η γωνία τριβής της αργίλου, με το πορώδες και τη γωνία τριβής της άμμου να παραμένουν σταθερές. Στο προσομοίωμα ασκούταν μόνο η βαρυτική δύναμη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων της αργίλου. Και στις 3 ακόλουθες περιπτώσεις τα πρανή δεν αστοχούν, όμως στην εικόνα 95 έχουμε οριακή κατάσταση αστοχίας καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1. Παρακάτω απεικονίζονται τα πρανή με τις δυνητικές επιφάνειες αστοχίας τους.



Εικόνα 95: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=5,6\text{kPa}$ και $\phi=14^\circ$) ($FoS=1,00$, οριακή κατάσταση ισορροπίας).

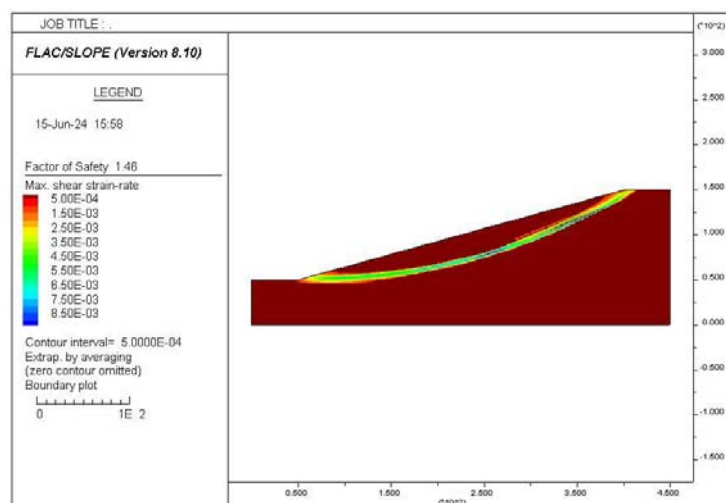


Εικόνα 96: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=8\text{kPa}$ και $\phi=20^\circ$) ($FoS=1,46$).



Εικόνα 98: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=10,4\text{ka}$ και $\phi=26^\circ$) ($\text{FoS}=1,95$).

Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερές τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων της αργίλου και μεταβάλλοντας τις αντίστοιχες τιμές για την άμμο. Και σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ήταν στατική και η μόνη φόρτιση του πρανού ήταν η βαρυτική. Εδώ παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας ήταν σε όλες τις περιπτώσεις ίσος με 1,46.

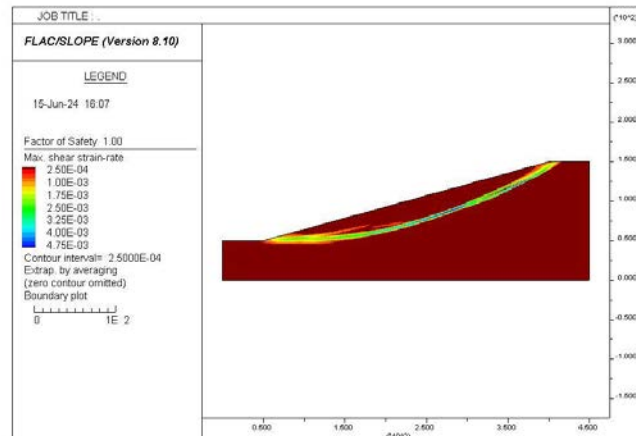


Εικόνα 99: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για την άμμο ($\text{FoS}=1,46$).

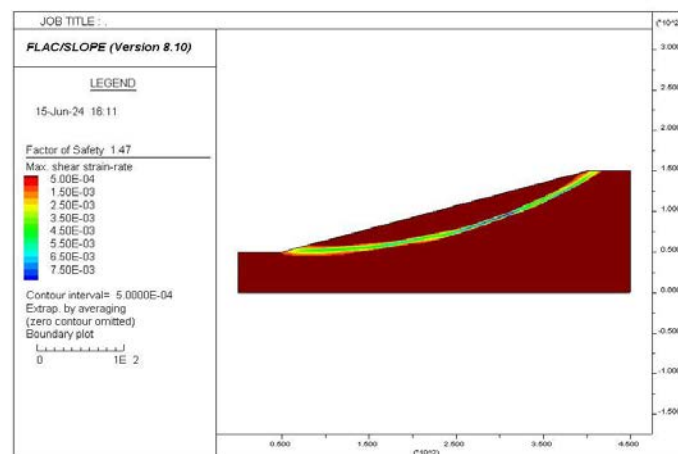
Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το 1, επομένως το πρανές δεν αστοχεί.

Έπειτα, στις αναλύσεις αυξομειώνονταν ταυτόχρονα οι μηχανικές παράμετροι και της αργίλου και της άμμου. Η αναλύσεις ήταν και πάλι στατικές και υπήρχε μόνο η βαρυτική φόρτιση. Παρατηρήθηκε πως οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας του προσομοιώματος ήταν πολύ κοντά με εκείνων που προέκυψαν κατά τη μεταβολή των μηχανικών παραμέτρων

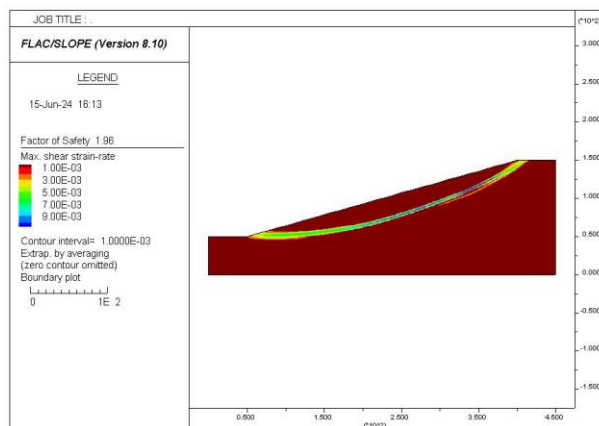
της αργίλου. Παρακάτω απεικονίζονται οι κατανομές του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τους συνδυασμούς των ελάχιστων, ενδιάμεσων και μέγιστων τιμών των μηχανικών παραμέτρων, καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις παραπάνω αναλύσεις. Δεν παρατηρείται αστοχία του πρανούς καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 1. Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1 (εικόνα 99), η ευστάθεια είναι σχεδόν οριακή.



Εικόνα 99: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου (FoS=1,00, σχεδόν οριακή ισορροπία).



Εικόνα 100: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου (FoS=1,47).

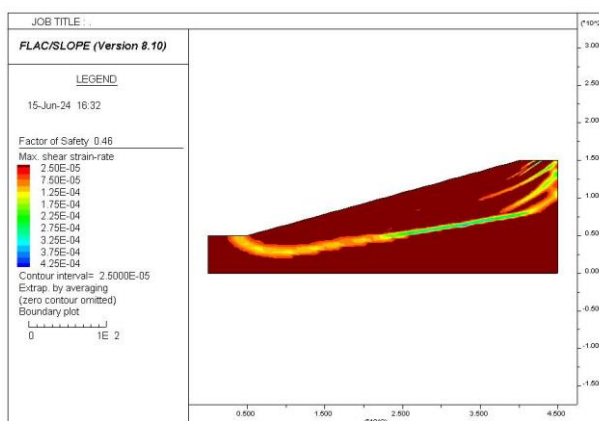


Εικόνα 101: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου (FoS=1,96).

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
	minFoS	maxFoS
Αύξηση c και φ αργίλου	1,002	1,947
Αύξηση c και φ άμμου	1,463	1,459
Ταυτόχρονη αύξηση	1,002	1,955

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις στατικές αναλύσεις.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν οι δυναμικές αναλύσεις. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες και οι μέσες τιμές των c και φ. Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36, 0,5 και 1,0. Αρχικά έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του πρανούς και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων.



Εικόνα 102: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και α=1 (FoS=0,46).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο άκρο της στέψης και καταλήγει στον πόδα, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 75m και το σχήμα της είναι ευθύγραμμο και καμπυλωτό στα άκρα. Η αστοχία πραγματοποιείται στην διεπιφάνεια των γεωυλικών.

Στην περίπτωση της ανάλυσης με τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και για συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=0,16$, η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται στο κάτω μέρος του πρανούς, οπότε επηρεάζεται από τα άκρα του προσομοιώματος και επομένως δεν είναι ακριβές σαν αποτέλεσμα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α)			
α	min c,φ	ενδιάμεσα c,φ	max c,φ
0,16	8,658	24,467	>64
0,36	4,803	11,869	>64
0,5	3,896	9,033	26,221
1	2,65	5,307	13,908

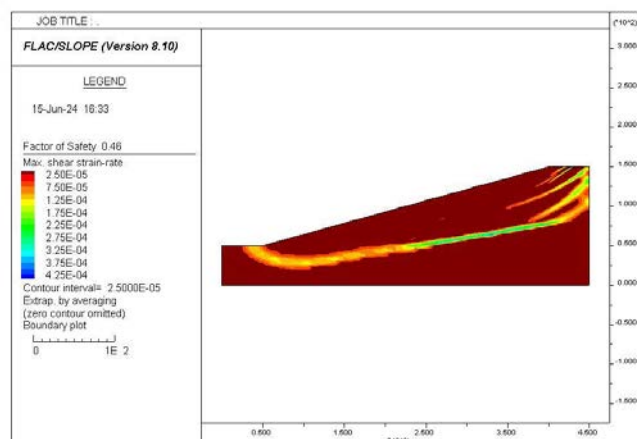
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, φ, η και α).

Έπειτα ακολούθησαν οι δυναμικές αναλύσεις με μεταβολή της κλίσης του πρανούς και των μηχανικών παραμέτρων. Αρχικά η κλίση μειώθηκε στις 10° και μετά στις 8° . Η τιμή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης ήταν ίση με 0,16, 0,36 και 1. Και σε αυτές τις περιπτώσεις της ανάλυσης, η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται στο κάτω μέρος του πρανούς, οπότε επηρεάζεται από τα άκρα του προσομοιώματος και επομένως δεν είναι ακριβές σαν αποτέλεσμα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και κλίσης)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,342	0,709	Κλίση 8 μοίρες
0,36	0,361	0,729	
1	0,342	0,717	
0,16	0,416	0,799	Κλίση 10 μοίρες
0,36	0,408	0,787	
1	0,393	0,771	

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c,φ,η,α και κλίσης).

Τέλος, προστέθηκε και η φόρτιση στο πρανές, αρχικά στη στέψη και έπειτα στη μέση και στον πόδα του πρανούς. Από τις παραπάνω αναλύσεις, διαπιστώθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας δεν μεταβαλλόταν όταν μεταβαλλόταν η θέση του φορτίου στο πρανές. Το α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,5 και 1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 103: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου, για $\alpha=1$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=0,46$).

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1, επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο άκρο της στέψης και καταλήγει στον πόδα έχει μέγιστο βάθος ίσο με 70m, η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή στα άκρα και ευθύγραμμη στο κεντρικό τμήμα, ενώ παρατηρούνται κάποιες διακλαδώσεις στην στέψη. Η αστοχία πραγματοποιείται στην διεπιφάνεια των γεωολικών.

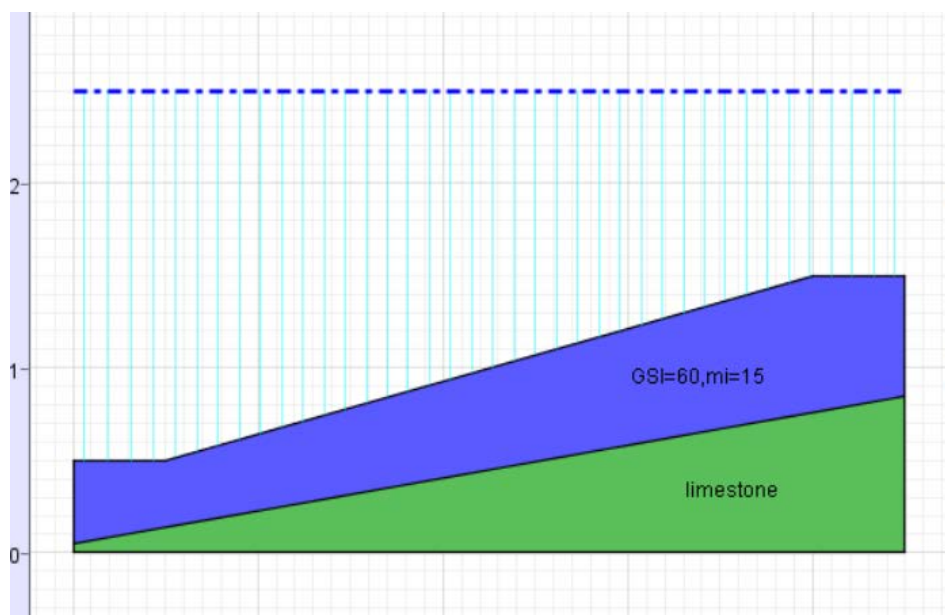
Στην περίπτωση της ανάλυσης με τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων, για συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου, η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται στο κάτω μέρος του πρανούς, οπότε επηρεάζεται από τα όρια του προσομοιώματος και επομένως δεν είναι ακριβές σαν αποτέλεσμα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και επιβολή φορτίου)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,541	1,084	Φορτίο στη στέψη
0,5	0,49	0,998	
1	0,463	0,896	
0,16	0,541	1,088	Φορτίο στη μέση
0,5	0,486	0,998	
1	0,463	0,896	
0,16	0,541	1,088	Φορτίο στον πόδα
0,5	0,486	0,998	
1	0,463	0,896	

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, ϕ, η, α και ύπαρξη φορτίου).

5.5 Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Ψαμμίτης-Ασβεστόλιθος

Παρακάτω απεικονίζεται το τέταρτο προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από δύο βραχώδη στρώματα, ένα ψαμμίτη και ένα ασβεστόλιθου.



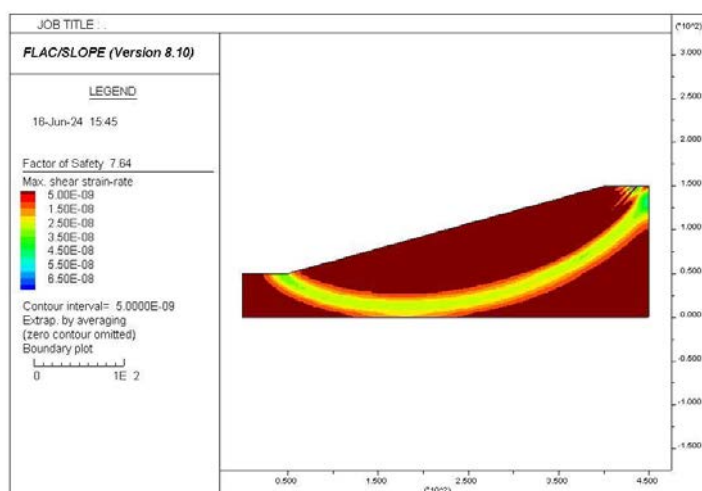
Εικόνα 104: Διστρωματικό πρανές: Ψαμμίτης-Ασβεστόλιθος.

Οι αναλύσεις έγιναν με τη χρήση του κριτηρίου Modified Hoek-Brown που περιεγράφηκε παραπάνω. Για τον ορισμό των μηχανικών παραμέτρων των βραχωδών υλικών εισάχθηκαν στο πρόγραμμα οι τιμές για τα GSI (Γεωλογικός δείκτης αντοχής), m_i , D με την επιλογή του Alternate input, όπως φαίνεται παρακάτω.

Εικόνα 105: Εισαγωγή των μηχανικών παραμέτρων για το κριτήριο Modified Hoek-Brown.

Η τιμή για το GSI λήφθηκε 60 και αυξανόταν κατά 10% μέχρι να γίνει 100 και για τα δύο εδάφη. Το D ορίστηκε ίσο με μηδέν, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχουμε αδιατάρακτη βραχώμαζα. Το m_i , το οποίο είναι σταθερά για τον άρρηκτο βράχο ορίστηκε για τον ψαμμίτη ίσο με 17 και αυξομειώθηκε κατά ± 4 , παίρνοντας ελάχιστη τιμή ίση με 15 και μέγιστη ίση με 19, ενώ για τον ασβεστόλιθο ορίστηκε ίσο με 10 και αυξομειώθηκε κατά ± 2 , παίρνοντας ελάχιστη τιμή ίση με 8 και μέγιστη ίση με 12. Ακόμη εισάχθηκαν οι τιμές του σ_{ci} (Pa) και του

tension (Pa), οι οποίες διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των αναλύσεων. Για τον ψαμμίτη το σ_{c} ορίστηκε ίσο με 175MPa και το tension ίσο με 1,17MPa, ενώ για τον ασβεστόλιθο το σ_{c} ορίστηκε ίσο με 75MPa και το tension ίσο με 1,58MPa. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις, στις οποίες μεταβάλλονταν το GSI και το m_i του ψαμμίτη με τις αντίστοιχες παραμέτρους για τον ασβεστόλιθο να παραμένουν σταθερές. Στο προσομοίωμα ασκούταν μόνο η βαρυτική δύναμη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των παραμέτρων του ψαμμίτη.

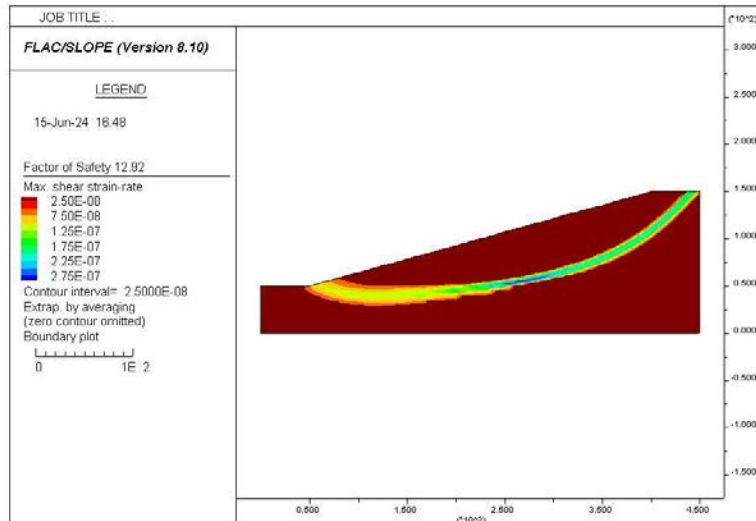


Εικόνα 106: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ψαμμίτη ($GSI=60$ και $m_i=15$) ($FoS=7,64$).

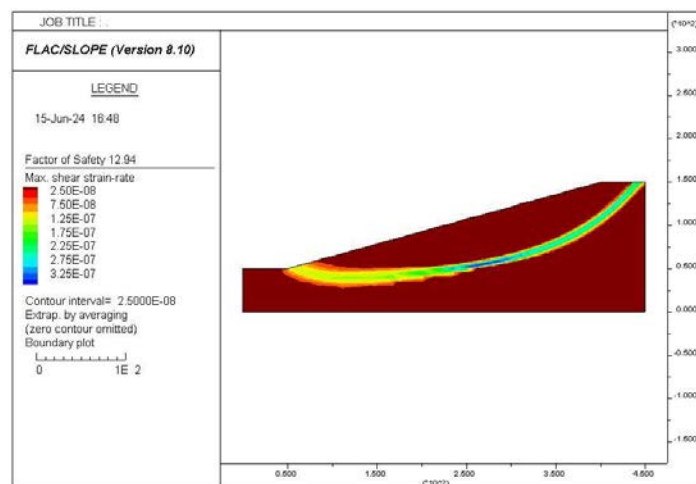
Εδώ ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ μεγαλύτερος από το 1, οπότε δεν υπάρχει αστοχία. Ακόμη ο μέγιστος ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης έχει πολύ μικρές τιμές.

Στην περίπτωση της ανάλυσης με τις μέσες και μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ψαμμίτη σε στατική ανάλυση, δεν υπήρχε αστοχία.

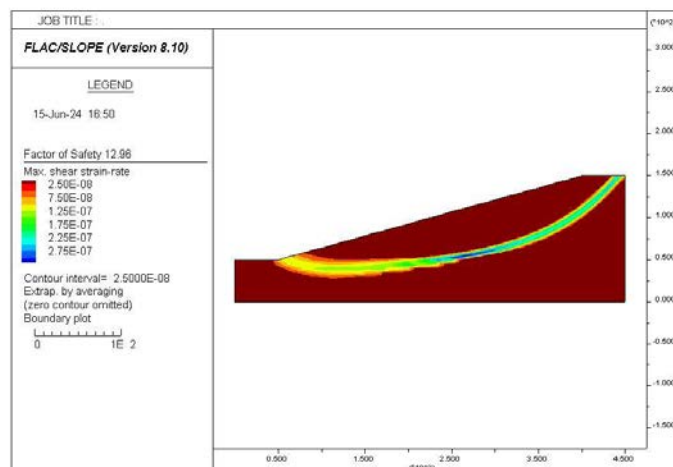
Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερές τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων του ψαμμίτη και μεταβάλλοντας τις αντίστοιχες τιμές για τον ασβεστόλιθο. Και σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ήταν στατική και η μόνη φόρτιση του πρηνούς ήταν η βαρυτική. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των παραμέτρων του ασβεστόλιθου. Δεν εμφανίζεται αστοχία σε καμία από τις παρακάτω περιπτώσεις και μάλιστα εμφανίζονται πολύ μεγάλοι συντελεστές ασφαλείας.



Εικόνα 107: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ασβεστόλιθο (GSI=60 και $m_i=8$) (FoS=12,92).



Εικόνα 108: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ασβεστόλιθο (GSI=80 και $m_i=10$) (FoS=12,94).



Εικόνα 109: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ασβεστόλιθο ($GSI=100$ και $m_i=12$) ($FoS=12,96$).

Έπειτα, στις αναλύσεις αυξομειώνονταν ταυτόχρονα οι μηχανικές παράμετροι και του ψαμμίτη και του ασβεστόλιθου. Η αναλύσεις ήταν και πάλι στατικές και υπήρχε μόνο η βαρυτική φόρτιση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των παραμέτρων του ασβεστόλιθου και παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις παραπάνω αναλύσεις που είναι πολύ μεγαλύτερες της μονάδας

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
	minFoS	maxFoS
Αύξηση GSI , m_i ψαμμίτη	7,65	11,299
Αύξηση GSI , m_i ασβεστόλιθου	12,92	12,955
Ταυτόχρονη αύξηση	5,814	15,15

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις στατικές αναλύσεις.

Ακολουθως, πραγματοποιήθηκαν οι δυναμικές αναλύσεις. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες και οι μέσες τιμές των GSI και m_i . Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36, 0,5 και 1,0. Αρχικά έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του πρανούς και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων. Παρατηρήθηκε πως για $\alpha=0,16$ ή $\alpha=0,36$ και για τον ψαμμίτη $GSI=100$, $m_i=19$ και τον ασβεστόλιθο $GSI=100$, $m_i=12$, ο συντελεστής ασφαλείας έβγαине μεγαλύτερος από 64 και το πρόγραμμα σταματούσε τον υπολογισμό του, δηλαδή δεν εκδηλωνόταν αστοχία στο πρανές.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α)		
α	minFoS	maxFoS
0,16	8,658	>64
0,36	4,803	>64
0,5	3,896	26,221
1	2,65	13,908

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή GSI, m_i και α).

Έπειτα ακολούθησαν οι δυναμικές αναλύσεις με μεταβολή της κλίσης του πρανούς και των μηχανικών παραμέτρων. Αρχικά η κλίση μειώθηκε στις 10° και μετά στις 8° . Ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36 και 1. Παρατηρήθηκε πως για $\alpha=0,16$, για τον ψαμμίτη $GSI=100$, $m_i=19$, τον ασβεστόλιθο $GSI=100$, $m_i=12$ και για κλίση 8° και 10° , ο συντελεστής ασφαλείας έβγαине μεγαλύτερος από 64 και το πρόγραμμα σταματούσε τον υπολογισμό του. Παρόλαυτα δεν υπάρχει αστοχία στο πρανές.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και κλίσης)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	6,561	>64	Κλίση 8 μοίρες
0,36	3,592	27,037	
1	1,982	10,498	
0,16	7,189	>64	Κλίση 10 μοίρες
0,36	3,932	29,389	
1	2,178	11,455	

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή GSI, m_i , α και κλίσης).

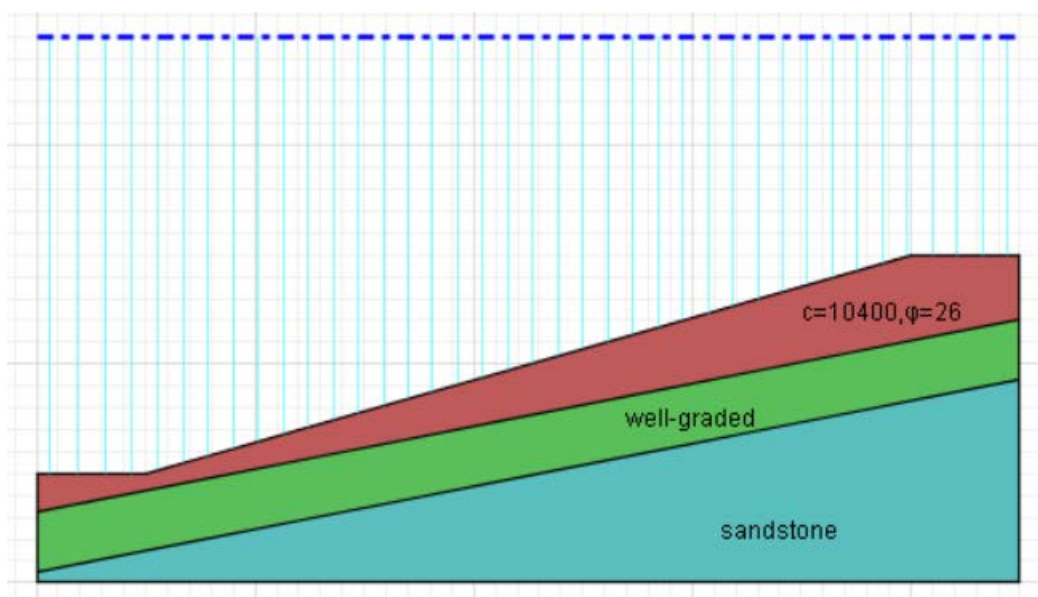
Τέλος, προστέθηκε και η φόρτιση στο πρανές, αρχικά στη στέψη και έπειτα στη μέση και στον πόδα του πρανούς. Το α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,5 και 1. Από τις παραπάνω αναλύσεις, διαπιστώθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας δεν μεταβαλλόταν όταν μεταβαλλόταν η θέση του φορτίου στο πρανές. Παρατηρήθηκε πως για $\alpha=0,16$, για τον ψαμμίτη $GSI=100$, $m_i=19$, τον ασβεστόλιθο $GSI=100$, $m_i=12$ και για φόρτιση σε οποιοδήποτε μέρος του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας έβγαине μεγαλύτερος από 64 και το πρόγραμμα σταματούσε τον υπολογισμό του. Παρόλαυτα δεν υπάρχει αστοχία στο πρανές.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και επιβολή φορτίου)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	8,674	>64	Φορτίο στη στέψη
0,5	3,893	26,182	
1	2,654	13,873	
0,16	8,674	>64	Φορτίο στη μέση
0,5	3,896	26,209	
1	2,65	13,896	
0,16	8,674	>64	Φορτίο στον πόδα
0,5	3,896	26,209	
1	2,65	13,896	

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή GSI, m_i , α και ύπαρξη φορτίου).

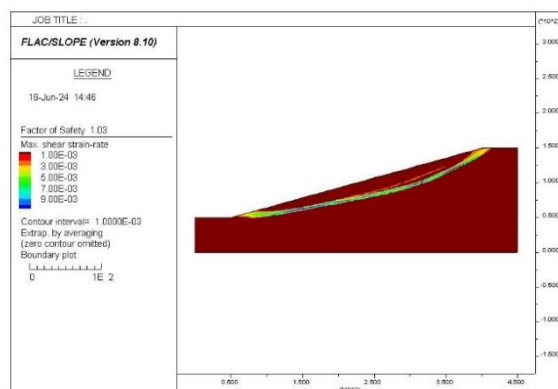
5.6 Τριστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος -Άμμος -Ασβεστόλιθος

Παρακάτω απεικονίζεται το πέμπτο προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από τρία στρώματα, ένα αργιλικό, ένα αμμώδες και ένα ασβεστολιθικό.

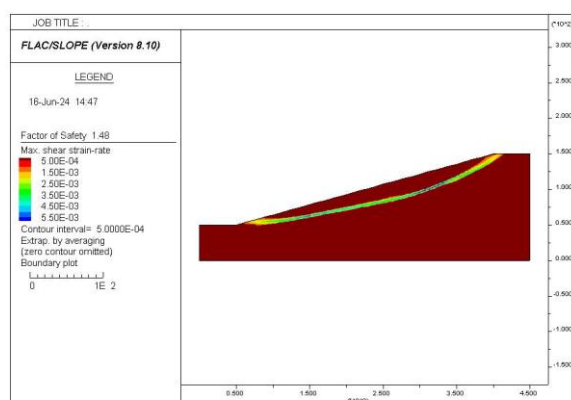


Εικόνα 110: Τριστρωματικό πρανές άργιλος-άμμος-ασβεστόλιθος.

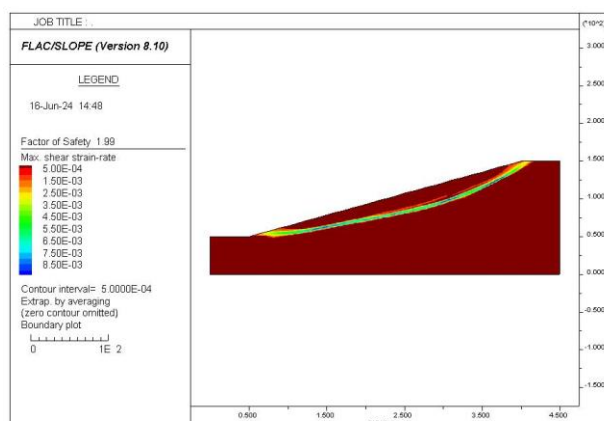
Οι αναλύσεις έγιναν με τη χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb που περιεγράφηκε παραπάνω. Για τον ορισμό των μηχανικών παραμέτρων των εδαφών χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, οι τιμές που υπήρχαν στη βάση δεδομένων του προγράμματος για τα συγκεκριμένα εδάφη. Η συνοχή c για την άργιλο ήταν ίση με 8kPa, για την άμμο το πορώδες ήταν ίσο με $n=0,5$ και για τον ασβεστόλιθο η συνοχή c ήταν ίση με 6,72MPa. Η τιμή της γωνίας τριβής για την άργιλο ήταν ίση με 20° , για την άμμο ήταν 33° και για τον ασβεστόλιθο ήταν ίση με 42° . Για τη διερεύνηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για τον συγκεκριμένο συνδυασμό, οι παραπάνω τιμές αυξομειώθηκαν κατά $\pm 30\%$, με τις τιμές να κυμαίνονται για τη συνοχή της αργίλου από 5,6kPa έως 10,4kPa, το πορώδες της άμμου από $n=0,35$ έως $n=0,65$, τη συνοχή του ασβεστόλιθου από 4,704MPa έως 8,736MPa, τη γωνία εσωτερικής τριβής της αργίλου από 14° έως 26° , τη γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου από $23,1^\circ$ έως $42,9^\circ$ και τη γωνία εσωτερικής τριβής του ασβεστόλιθου από $29,4^\circ$ έως $54,6^\circ$. Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων όπως δίνονται από τη βάση δεδομένων του προγράμματος έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις, στις οποίες μεταβάλλονταν η συνοχή και η γωνία τριβής της αργίλου, με το πορώδες και τη γωνία τριβής της άμμου και τη συνοχή και τη γωνία τριβής του ασβεστόλιθου να παραμένουν σταθερές. Στο προσομοίωμα ασκούταν μόνο η βαρυτική δύναμη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις ελάχιστες, ενδιάμεσες και μέγιστες τιμές των παραμέτρων της αργίλου, όπου δεν παρατηρείται αστοχία καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος του 1, εκτός από την εικόνα 111 που ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,03 όποτε παρατηρείται κατάσταση σχεδόν οριακής ισορροπίας.



Εικόνα 111: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=5,6\text{kPa}$ και $\phi=14^\circ$) ($FoS=1,03$, σχεδόν οριακή ισορροπία).

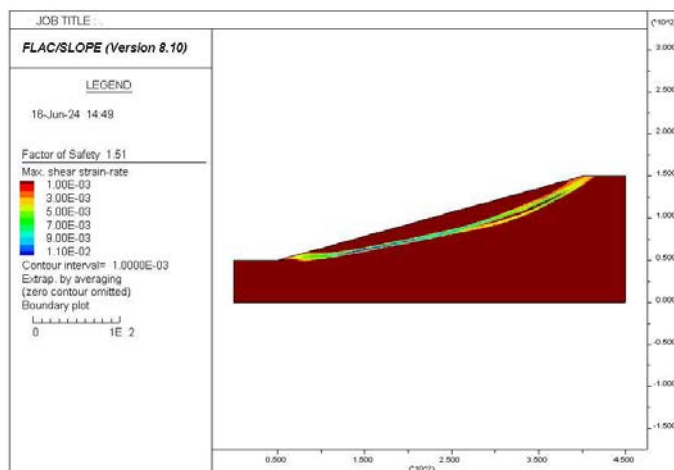


Εικόνα 112: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=8\text{kPa}$ και $\phi=20^\circ$) ($FoS=1,48$).

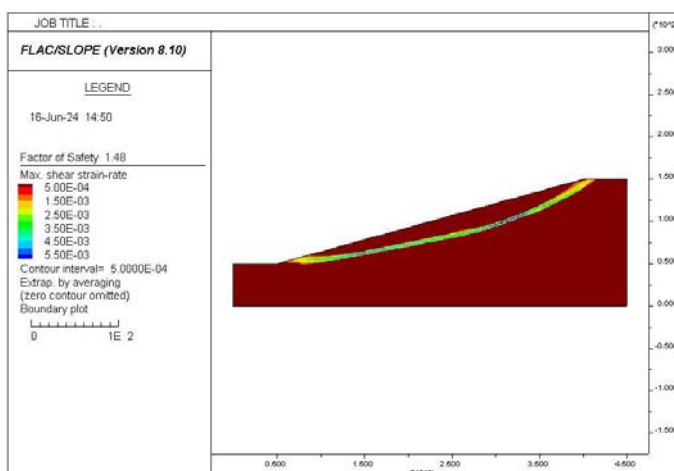


Εικόνα 113: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άργιλο ($c=10,4\text{kPa}$ και $\phi=24^\circ$) ($FoS=1,99$).

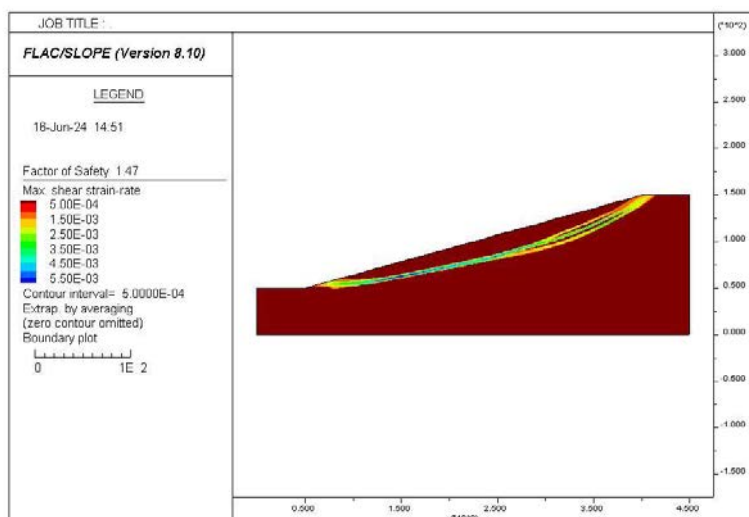
Στη συνέχεια, οι επόμενες αναλύσεις έγιναν διατηρώντας σταθερές τις μηχανικές παραμέτρους της αργίλου και του ασβεστόλιθου και μεταβάλλοντας εκείνες της άμμου. Η αναλύσεις ήταν στατικές και μόνο η βαρυτική δύναμη ασκούταν στο πρηνές. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών. Σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας ήταν μεγαλύτερος από 1, επομένως το πρηνές δεν αστοχεί.



Εικόνα 114: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,35$ και $\phi=23,1^\circ$) ($FoS=1,51$).

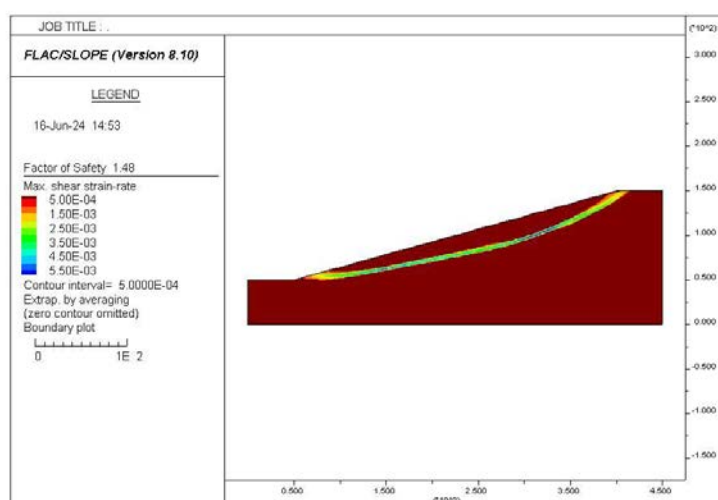


Εικόνα 115: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,50$ και $\phi=33^\circ$) ($FoS=1,48$).



Εικόνα 116: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για την άμμο ($n=0,65$ και $\phi=42,9^\circ$) ($FoS=1,47$).

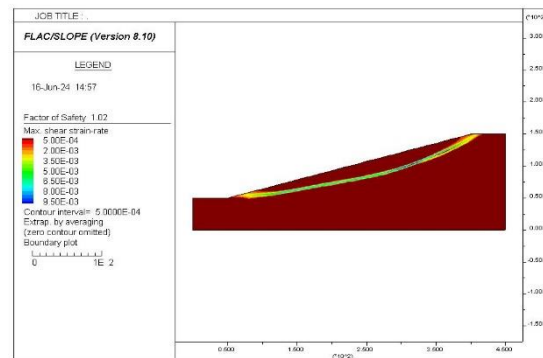
Έπειτα, οι αναλύσεις έγιναν διατηρώντας σταθερές τις μηχανικές παραμέτρους της αργίλου και της άμμου και μεταβάλλοντας εκείνες του ασβεστόλιθου. Η αναλύσεις ήταν στατικές και μόνο η βαρυτική δύναμη ασκούταν στο πρανές. Παρατηρήθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας παρέμενε σταθερή και ίση με 1,48. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, όπου και εδώ δεν υπάρχει αστοχία.



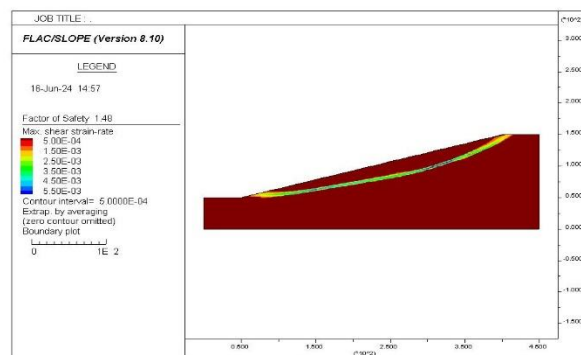
Εικόνα 117: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για όλες τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τον ασβεστόλιθο ($FoS=1,48$).

Έπειτα στις αναλύσεις αυξομειωνόντουσαν ταυτόχρονα οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων και για την άργιλο και για την άμμο και για τον ασβεστόλιθο. Η ανάλυση ήταν και πάλι στατική και η μόνη δράση που ασκούσαν στο πρανές ήταν η βαρυτική. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις παραπάνω αναλύσεις. Παρατηρείται πως ούτε σε αυτές τις

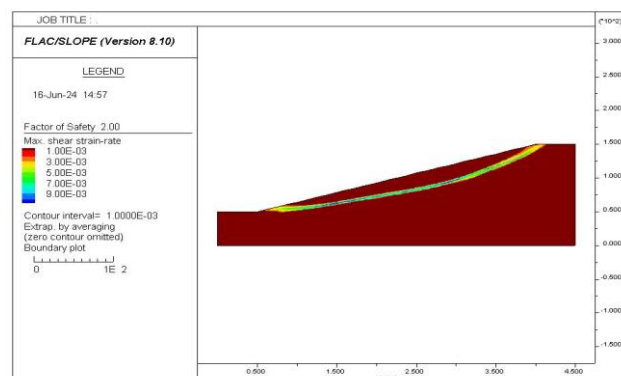
περιπτώσεις εμφανίζεται αστοχία στα πρανή, όμως στην εικόνα 118 παρουσιάζεται σχεδόν οριακή ισορροπία, αφού ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,02.



Εικόνα 118: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου (FoS=1,02, πρακτικά οριακή ισορροπία).



Εικόνα 119: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης εων για τις ενδιάμεσες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου (FoS=1,48).

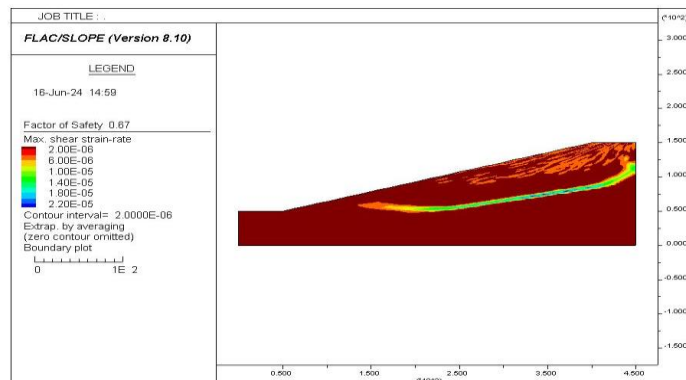


Εικόνα 120: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου (FoS=2,00).

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
	minFoS	maxFoS
Αύξηση c και φ αργίλου	1,029	1,99
Αύξηση c και φ άμμου	1,506	1,475
Αύξηση c και φ ψαμμίτη	1,479	1,479
Ταυτόχρονη αύξηση	1,018	2,002

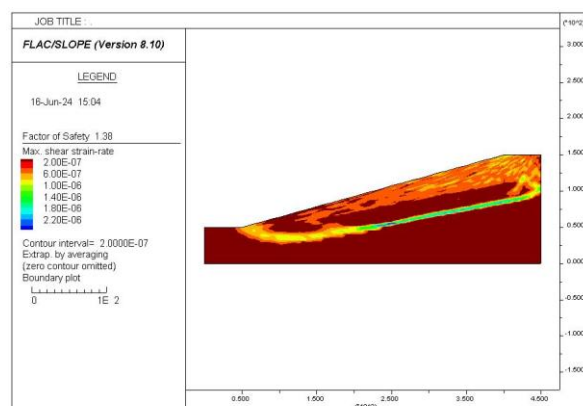
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις στατικές αναλύσεις.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν οι δυναμικές αναλύσεις. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες και οι μέσες τιμές των c, η και φ. Ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,36, 0,5 και 1,0. Αρχικά έγιναν αναλύσεις διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του πρανούς και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων.



Εικόνα 121: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και α=1 (FoS=0,67) .

Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος του 1 και επομένως το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά λίγο πιο κάτω από το άκρο της στέψης και καταλήγει κοντά στον πόδα, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 60m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Η αστοχία πραγματοποιείται κοντά στη διεπιφάνεια της άμμου και του ασβεστόλιθου. Ενώ για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και για α=0,16 (εικόνα 123) δεν παρατηρείται αστοχία.

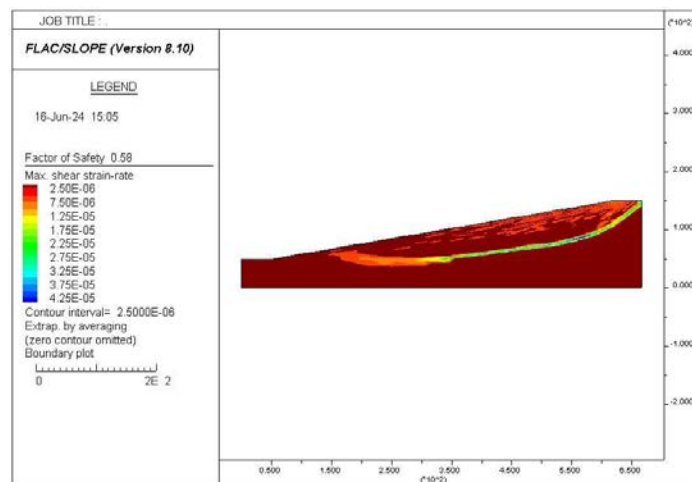


Εικόνα 122: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και α=0,16 (FoS=1,38).

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α)			
α	min c, ϕ	ενδιάμεσα c, ϕ	max c, ϕ
0,16	0,709	0,967	1,381
0,36	0,67	0,975	1,393
0,5	0,658	1,01	1,311
1	0,67	0,986	1,338

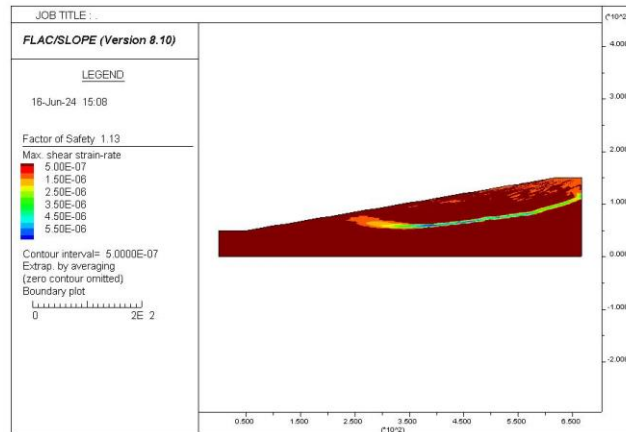
Πίνακας 18: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, ϕ , η και α).

Έπειτα ακολούθησαν οι δυναμικές αναλύσεις με μεταβολή της κλίσης του πρανούς και των μηχανικών παραμέτρων. Αρχικά η κλίση μειώθηκε στις 10° και μετά στις 8° . Η τιμή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης ήταν ίση με 0,16, 0,36 και 1.

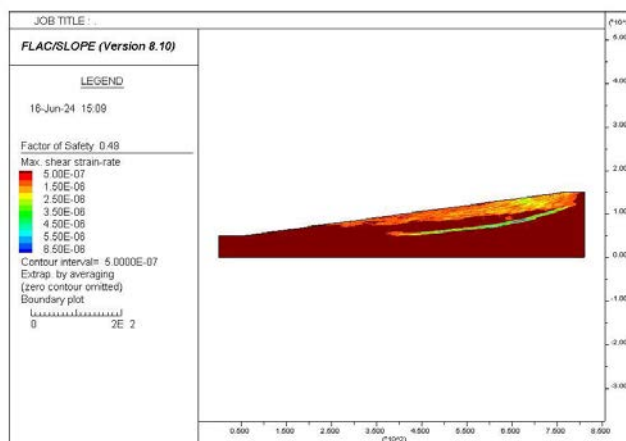


Εικόνα 123: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και κλίση 10° (FoS=0,58).

Εδώ εμφανίζεται αστοχία καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από 1. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στο άκρο της στέψης και καταλήγει στο κάτω μέρος του πρανούς κοντά στον πόδα, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 50m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια άμμου-ασβεστόλιθου. Για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών, $\alpha=0,16$ και κλίση 10° (εικόνα 125) δεν παρατηρείται αστοχία.

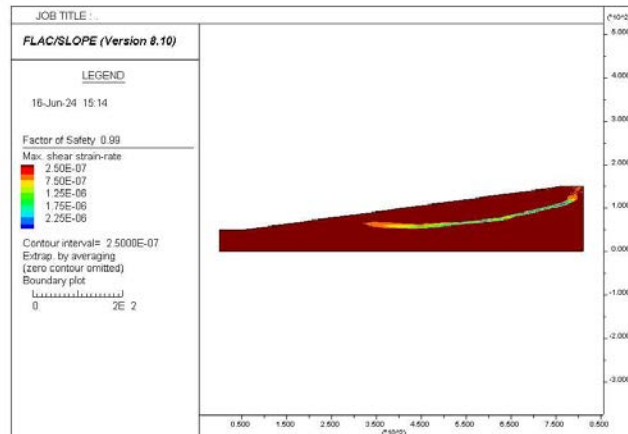


Εικόνα 124: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 10° ($FoS=1,13$, κοντά σε κατάσταση οριακής ισορροπίας).



Εικόνα 125: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και κλίση 8° ($FoS=0,49$).

Σε αυτήν την περίπτωση το πρανές αστοχεί, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από 1. Η επιφάνεια ολίσθησής ξεκινά στη μέση της στέψης και καταλήγει στο μέσο του πρανούς, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 50m και η γεωμετρία της είναι καμπυλωτή. Η αστοχία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια άμμου-ασβεστόλιθου, ενώ παρατηρείται και αστοχία στο αργιλικό στρώμα. Για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών, $\alpha=0,16$ και κλίση 8° (εικόνα 127), το πρανές αστοχεί παρουσιάζοντας καμπυλωτή επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια άμμου-ασβεστόλιθου και ξεκινά από τη στέψη και καταλήγει στο μέσο του πρανούς, έχει μέγιστο βάθος ίσο με 50m και μέσο πάχος 5m.

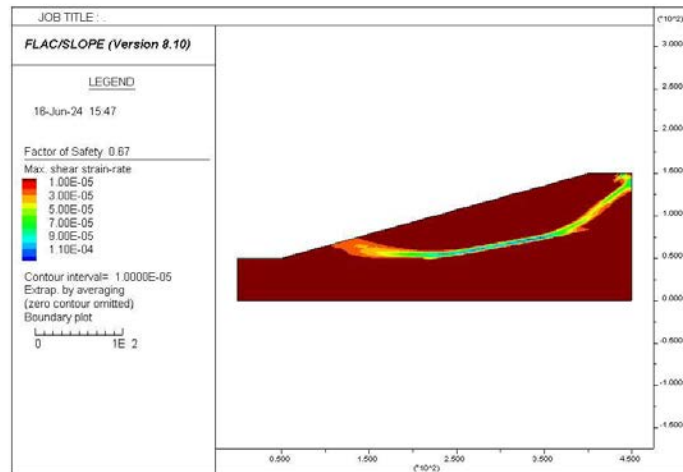


Εικόνα 126: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και κλίση 8° ($FoS=0,994$).

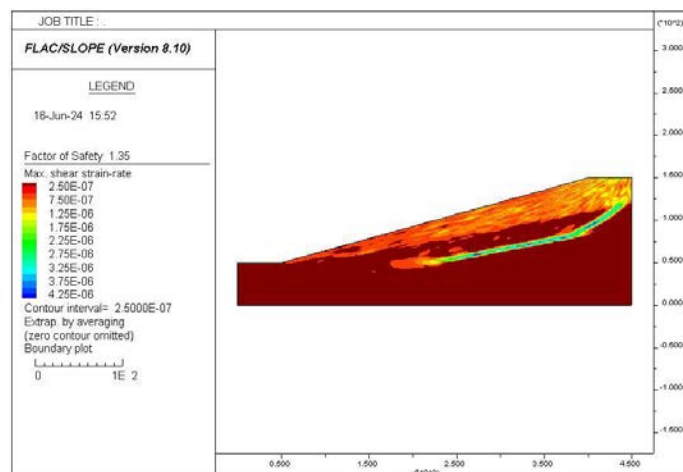
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και κλίσης)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,49	0,994	Κλίση 8 μοίρες
0,36	0,49	0,99	
1	0,49	1,014	
0,16	0,592	1,135	Κλίση 10 μοίρες
0,36	0,529	1,084	
1	0,58	1,111	

Πίνακας 19: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c, ϕ, n, α και κλίσης).

Τέλος, προστέθηκε και η φόρτιση στο πρανές, αρχικά στη στέψη και έπειτα στη μέση και στον πόδα του πρανούς. Από τις παραπάνω αναλύσεις, διαπιστώθηκε πως ο συντελεστής ασφαλείας δεν μεταβαλλόταν όταν μεταβαλλόταν η θέση του φορτίου στο πρανές. Το α έπαιρνε τιμές ίσες με 0,16, 0,5 και 1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Για την πρώτη περίπτωση (εικόνα 128) ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από 1, οπότε το πρανές αστοχεί. Η επιφάνεια ολίσθησης αναπτύσσεται στο αμμώδες στρώμα, είναι καμπυλωτή, έχει μέγιστο βάθος 55m και ξεκινά από την άκρη της στέψης και καταλήγει στο κάτω μέρος του πρανούς. Για τη δεύτερη περίπτωση (εικόνα 129) ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από 1, οπότε δεν υπάρχει αστοχία.



Εικόνα 127: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=1$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=0,67$).



Εικόνα 128: Κατανομή του μέγιστου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και της αργίλου και της άμμου και του ασβεστόλιθου, για $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου ($FoS=1,35$).

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (μεταβολή α και επιβολή φορτίου)			
α	minFoS	maxFoS	
0,16	0,705	1,408	Φορτίο στη στέψη
0,5	0,682	1,365	
1	0,67	1,35	
0,16	0,705	1,408	Φορτίο στη μέση
0,5	0,682	1,365	
1	0,67	1,35	
0,16	0,705	1,408	Φορτίο στον πόδα
0,5	0,682	1,365	
1	0,67	1,35	

Πίνακας 20: Συγκεντρωτικές τιμές FoS για τις δυναμικές αναλύσεις (μεταβολή c,φ,η,α και ύπαρξη φορτίου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε παραμετρική διερεύνηση ευστάθειας υποθαλάσσιων πρανών με σκοπό τη χρήση τους ως έδαφος έδρασης υποθαλάσσιων ενεργειακών υποδομών. Η διερεύνηση έγινε τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες, σε διάφορα είδη γεωϋλικών (εδafικών και βραχωδών) με μεταβαλλόμενες μηχανικές παραμέτρους, μεταβαλλόμενους συντελεστές σεισμικής επιτάχυνσης, μεταβαλλόμενες κλίσεις των πρανών και με επιβολή φορτίσεων σε διαφορετικές θέσεις του πρανούς, με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε διαφορετική περίπτωση. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα, βοήθησαν στην περαιτέρω κατανόηση των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων.

1. Για το διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές με συνδυασμό άργιλο-αβεστόλιθο παρατηρείται πως στις στατικές αναλύσεις δεν υπάρχει αστοχία και πως για αυξομειώσεις των μηχανικών παραμέτρων του αβεστόλιθου δεν μεταβάλλεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 0,37 και παρατηρείται για την περίπτωση που το πρανές έχει κλίση 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha=1$ και χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τα υλικά. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,97 και σημειώνεται για την περίπτωση της στατικής ανάλυσης στο συνδυασμό με τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων της αργίλου. Οι επιφάνειες ολίσθησης εμφανίζονται στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, είναι καμπυλωτές, ξεκινάνε από τη στέψη του πρανούς και καταλήγουν στον πόδα. Το μέγιστο βάθος που παρατηρείται είναι ίσο με 85m στη δυναμική ανάλυση με συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=1$ και τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών. Ακόμη βρέθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη της θέσης που επιβάλλεται το φορτίο.
2. Για το διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές με συνδυασμό άμμο-αβεστόλιθο παρατηρείται πως στις στατικές αναλύσεις δεν υπάρχει αστοχία και πως για αυξομειώσεις των μηχανικών παραμέτρων του αβεστόλιθου δεν μεταβάλλεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 0,56 και παρατηρείται για την περίπτωση που το πρανές έχει κλίση 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha=1$ και χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τα εν λόγω γεωϋλικά. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 3,45 και σημειώνεται για την περίπτωση της στατικής ανάλυσης στο συνδυασμό με τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και των δύο υλικών. Οι επιφάνειες ολίσθησης εμφανίζονται στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, είναι καμπυλωτές κυρίως με μερικά ευθύγραμμα τμήματα, ξεκινάνε από τη στέψη του πρανούς και καταλήγουν στη μέση του πρανούς. Το μέγιστο βάθος που παρατηρείται είναι ίσο με 80m στη δυναμική ανάλυση με συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=1$ και τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών. Ακόμη βρέθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη της θέσης που επιβάλλεται το φορτίο.
3. Για το διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές με συνδυασμό άργιλο-άμμο παρατηρείται πως στις στατικές αναλύσεις δεν υπάρχει αστοχία. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 0,34 και παρατηρείται για την περίπτωση που το πρανές έχει κλίση 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha=1$ και χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τα υλικά. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,96 και σημειώνεται για την περίπτωση της στατικής ανάλυσης στο συνδυασμό με τις μέγιστες τιμές των

μηχανικών παραμέτρων και των δύο υλικών. Οι επιφάνειες ολίσθησης εμφανίζονται στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, είναι καμπυλωτές. Το μέγιστο βάθος που παρατηρείται είναι ίσο με 75m στη δυναμική ανάλυση με συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=1$ και τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών. Επίσης πολλές από τις επιφάνειες ολίσθησης αναπτύσσονται στο κάτω μέρος του πρανούς, οπότε δεν θεωρούνται ακριβείς καθώς μπορεί να επηρεάζονται από τα όρια του προσομοιώματος. Ακόμη βρέθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη της θέσης που επιβάλλεται το φορτίο.

4. Για το διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές με συνδυασμό ψαμμίτη-ασβεστόλιθο παρατηρείται πως δεν υπάρχει αστοχία σε καμία από τις αναλύσεις, πράγμα που μπορεί να συμβαίνει γιατί και τα δύο είναι βραχώδη άρρηκτα υλικά. Ακόμη σε ορισμένες περιπτώσεις το πρόγραμμα δεν ολοκλήρωνε την ανάλυση καθώς ο συντελεστής ασφαλείας έβγαινε πολύ μεγάλος. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 1,982 και παρατηρείται για την περίπτωση που το πρανές έχει κλίση 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha=1$ και χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τα υλικά. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από 64 και σημειώνεται σε αρκετές περιπτώσεις. Επίσης βρέθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη της θέσης που επιβάλλεται το φορτίο.
5. Για το τριστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές με συνδυασμό άργιλο-άμμο-ασβεστόλιθο παρατηρείται πως στις στατικές αναλύσεις δεν υπάρχει αστοχία και πως για αυξομειώσεις των μηχανικών παραμέτρων του ασβεστόλιθου δεν μεταβάλλεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 0,49 και παρατηρείται για την περίπτωση που το πρανές έχει κλίση 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha=1$ και χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων για τα υλικά. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με 2,00 και σημειώνεται για την περίπτωση της στατικής ανάλυσης στο συνδυασμό με τις μέγιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων και των τριών υλικών. Οι επιφάνειες ολίσθησης εμφανίζονται στην διεπιφάνεια άμμου-ασβεστόλιθου, είναι καμπυλωτές, ξεκινάνε από τη στέψη του πρανούς και καταλήγουν στον πόδα. Το μέγιστο βάθος που παρατηρείται είναι ίσο με 60m στη δυναμική ανάλυση με συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=1$ και τις ελάχιστες τιμές των μηχανικών παραμέτρων των υλικών. Ακόμη βρέθηκε πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη της θέσης που επιβάλλεται το φορτίο.

Οπότε προκύπτει ότι η μικρότερη τιμή συντελεστή ασφαλείας είναι ίση με 0,34 και σημειώνεται για τον συνδυασμό αργίλου-άμμου, συντελεστή σεισμικής διέγερσης $\alpha=0,16$, κλίση $\phi=8^\circ$, συνοχή $c=5,6\text{kPa}$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=14^\circ$ για την άργιλο και για την άμμο πορώδες $n=0,35$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=23,1^\circ$. Η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι μεγαλύτερη του 64 και σημειώνεται για διάφορους συνδυασμούς μηχανικών παραμέτρων, α , κλίσεων και φορτίσεων για τον συνδυασμό ασβεστόλιθος-ψαμμίτης. Ακόμη παρατηρείται πως η δυσμενέστερη περίπτωση για όλους τους συνδυασμούς είναι όταν η κλίση του πρανούς είναι 8° , ο συντελεστής σεισμικής διέγερσης α είναι $\alpha=1$ και οι μηχανικές παράμετροι των υλικών είναι οι ελάχιστες. Οι ελάχιστη κλίση που χρησιμοποιείται είναι σκοπίμως 8° , παρόλο που υποθαλάσσιες κατολισθήσεις συμβαίνουν και σε πρανή με πολύ μικρότερες κλίσεις, καθώς το πρόγραμμα δεν μπορεί να τρέξει με μικρότερες τιμές κλίσεων.

Ως πρόταση για μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε να είναι η παρόμοια διερεύνηση θαλάσσιων πρανών στον ελλαδικό αλλά και τον παγκόσμιο χώρο, με σκοπό την εύρεση των ιδανικών τοποθεσιών για τοποθέτηση υποθαλάσσιων ενεργειακών υποδομών. Ακόμη θα

μπορούσαν οι αναλύσεις να γίνουν χρησιμοποιώντας και το FLAC3D, καθώς παρέχει δυνατότητες τρισδιάστατης επεξεργασίας στον χρήστη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ FOS.

Α) Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Ασβεστόλιθος

φ/ε	5600	6400	7200	8000	8800	9600	10400	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14	1,010	1,025	1,033	1,045	1,057	1,053	1,061			
16	1,150	1,166	1,170	1,189	1,189	1,205	1,213			
18	1,299	1,303	1,314	1,326	1,346	1,342	1,357			
20	1,443	1,455	1,463	1,475	1,475	1,482	1,498			
22	1,584	1,596	1,619	1,631	1,639	1,639	1,658			
24	1,736	1,744	1,764	1,787	1,791	1,791	1,803			
26	1,912	1,904	1,924	1,936	1,959	1,971	1,971			
φ/ε	4704000	5376000	6048000	6720000	7392000	8064000	8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
29,4	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
33,6	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
37,8	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
42	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
46,2	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
50,4	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
54,6	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459	1,459			
φ/ε	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14/29,4	1,002	1,014	1,025	1,037	1,045	1,057	1,064			
16/33,6	1,139	1,154	1,166	1,178	1,186	1,197	1,205			
18/37,8	1,287	1,291	1,307	1,322	1,33	1,338	1,35			
20/42	1,439	1,439	1,447	1,459	1,475	1,486	1,498			
22/46,2	1,568	1,584	1,604	1,604	1,623	1,631	1,646			
24/50,4	1,725	1,74	1,748	1,764	1,775	1,791	1,799			
26/54,6	1,885	1,908	1,904	1,912	1,932	1,932	1,947			
φ/ε	5600/4704000	8000/6720000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16		φ/ε	5600/4704000	8000/6720000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,36 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,807					14/29,4	0,584			
20/42		1,166				20/42		0,846		
26/56,4			1,537			26/56,4			1,123	
φ/ε	5600/4704000	8000/6720000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5		φ/ε	5600/4704000	8000/6720000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,529					14/29,4	0,463			
20/42		0,771				20/42		0,67		
26/56,4			1,025			26/56,4			0,896	
φ/ε	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14/29,4	0,889									
16/33,6		1,018								
18/37,8			1,15							
20/42				1,279						
22/46,2					1,412					
24/50,4						1,549				
26/54,6							1,686			
φ/ε	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,36 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14/29,4	0,482									
16/33,6		0,553								
18/37,8			0,623							
20/42				0,697						
22/46,2					0,771					
24/50,4						0,85				
26/54,6							0,928			
φ/ε	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14/29,4	0,369									
16/33,6		0,424								
18/37,8			0,486							
20/42				0,537						
22/46,2					0,604					
24/50,4						0,654				
26/54,6							0,717			
φ/ε	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)		
14/29,4	0,939									
16/33,6		1,076								
18/37,8			1,213							
20/42				1,354						
22/46,2					1,49					
24/50,4						1,639				
26/54,6							1,779			

φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,36 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,51							
16/33,6		0,584						
18/37,8			0,662					
20/42				0,74				
22/46,2					0,818			
24/50,4						0,9		
26/54,6							0,982	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,4							
16/33,6		0,455						
18/37,8			0,514					
20/42				0,58				
22/46,2					0,643			
24/50,4						0,701		
26/54,6							0,775	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,803							
16/33,6		0,924						
18/37,8			1,045					
20/42				1,166				
22/46,2					1,287			
24/50,4						1,408		
26/54,6							1,533	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,533							
16/33,6		0,611						
18/37,8			0,689					
20/42				0,771				
22/46,2					0,854			
24/50,4						0,939		
26/54,6							1,025	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,463							
16/33,6		0,529						
18/37,8			0,604					
20/42				0,67				
22/46,2					0,744			
24/50,4						0,818		
26/54,6							0,896	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,803							
16/33,6		0,924						
18/37,8			1,045					
20/42				1,166				
22/46,2					1,287			
24/50,4						1,408		
26/54,6							1,533	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,533							
16/33,6		0,611						
18/37,8			0,689					
20/42				0,771				
22/46,2					0,854			
24/50,4						0,939		
26/54,6							1,025	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,463							
16/33,6		0,529						
18/37,8			0,604					
20/42				0,67				
22/46,2					0,744			
24/50,4						0,818		
26/54,6							0,896	

φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,803							
16/33,6		0,924						
18/37,8			1,045					
20/42				1,166				
22/46,2					1,287			
24/50,4						1,408		
26/54,6							1,533	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,533							
16/33,6		0,611						
18/37,8			0,689					
20/42				0,771				
22/46,2					0,854			
24/50,4						0,939		
26/54,6							1,025	
φ/c	5600/4704000	6400/5376000	7200/6048000	8000/6720000	8800/7392000	9600/8064000	10400/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/29,4	0,463							
16/33,6		0,529						
18/37,8			0,604					
20/42				0,67				
22/46,2					0,744			
24/50,4						0,818		
26/54,6							0,896	

Β) Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άμμος-Ασβεστόλιθος

φ/η	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1	1,623	1,627	1,611	1,604	1,592	1,596	1,588		
26,4	1,893	1,873	1,869	1,873	1,842	1,854	1,826		
29,7	2,154	2,158	2,139	2,131	2,127	2,123	2,115		
33	2,459	2,455	2,443	2,443	2,432	2,404	2,404		
36,3	2,738	2,768	2,771	2,760	2,744	2,740	2,736		
39,6	3,158	3,135	3,107	3,107	3,084	3,080	3,068		
42,9	3,549	3,498	3,498	3,486	3,479	3,455	3,451		
φ/ς	4704000	5376000	6048000	6720000	7392000	8064000	8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς ΚΑΙ φ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
29,4	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
33,6	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
37,8	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
42	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
46,2	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
50,4	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
54,6	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443	2,443		
φ/η,ς	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1/29,4	1,623	1,627	1,611	1,604	1,592	1,596	1,588		
26,4/33,6	1,893	1,873	1,869	1,873	1,842	1,854	1,826		
29,7/37,8	2,154	2,158	2,139	2,131	2,127	2,123	2,115		
33/42	2,459	2,455	2,443	2,443	2,432	2,404	2,404		
36,3/46,2	2,738	2,768	2,771	2,760	2,744	2,740	2,736		
39,6/50,4	3,158	3,135	3,107	3,107	3,084	3,080	3,068		
42,9/54,6	3,549	3,498	3,498	3,486	3,479	3,455	3,451		
φ/η,ς	0,35/4704000	0,5/6720000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16	φ/η,ς	0,35/4704000	0,5/6720000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΠΑ α=0,36 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713				23,1/29,4	0,713			
33/42		1,018			33/42		1,018		
42,9/54,6			1,357		42,9/54,6			1,369	
φ/η,ς	0,35/4704000	0,5/6720000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5	φ/η,ς	0,35/4704000	0,5/6720000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς, η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713				23,1/29,4	0,713			
33/42		1,014			33/42		1,014		
42,9/54,6			1,369		42,9/54,6			1,369	
φ/η,ς	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΠΑ α=0,16 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1/29,4	0,561								
26,4/33,6		0,635							
29,7/37,8			0,717						
33/42				0,795					
36,3/46,2					0,881				
39,6/50,4						0,971			
42,9/54,6							1,068		
φ/η,ς	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΠΑ α=0,36 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1/29,4	0,561								
26,4/33,6		0,635							
29,7/37,8			0,713						
33/42				0,795					
36,3/46,2					0,881				
39,6/50,4						0,971			
42,9/54,6							1,068		
φ/η,ς	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΠΑ α=1 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1/29,4	0,561								
26,4/33,6		0,635							
29,7/37,8			0,713						
33/42				0,795					
36,3/46,2					0,881				
39,6/50,4						0,971			
42,9/54,6							1,068		

φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,604							
26,4/33,6		0,686						
29,7/37,8			0,764					
33/42				0,854				
36,3/46,2					0,947			
39,6/50,4						1,049		
42,9/54,6							1,143	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,36 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,6							
26,4/33,6		0,686						
29,7/37,8			0,764					
33/42				0,854				
36,3/46,2					0,947			
39,6/50,4						1,041		
42,9/54,6							1,143	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,6							
26,4/33,6		0,686						
29,7/37,8			0,764					
33/42				0,854				
36,3/46,2					0,951			
39,6/50,4						1,049		
42,9/54,6							1,143	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στην στέψη του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/η,ζ	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ ζ,η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	

φ/n,c	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/n,c	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στην μέση του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/n,c	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/n,c	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	
φ/n,c	0,35/4704000	0,4/5376000	0,45/6048000	0,5/6720000	0,55/7392000	0,6/8064000	0,65/8736000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ/ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα του πρανούς (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
23,1/29,4	0,713							
26,4/33,6		0,811						
29,7/37,8			0,916					
33/42				1,018				
36,3/46,2					1,127			
39,6/50,4						1,244		
42,9/54,6							1,369	

Γ) Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος-Άμμος

φ/η	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
23,1	1,463	1,459	1,459	1,467	1,463	1,467	1,455		
26,4	1,463	1,459	1,463	1,463	1,459	1,463	1,459		
29,7	1,459	1,467	1,463	1,463	1,463	1,463	1,463		
33	1,463	1,467	1,459	1,463	1,463	1,467	1,459		
36,3	1,463	1,459	1,463	1,455	1,463	1,459	1,463		
39,6	1,459	1,463	1,459	1,459	1,463	1,463	1,463		
42,9	1,467	1,463	1,471	1,463	1,463	1,459	1,459		
φ/ς	5600	6400	7200	8000	8800	9600	10400	ΑΛΛΑΓΕΣ ς ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
14,0	1,002	1,014	1,025	1,033	1,045	1,061	1,064		
16,0	1,139	1,158	1,166	1,174	1,182	1,197	1,209		
18,0	1,283	1,299	1,311	1,318	1,326	1,334	1,346		
20	1,428	1,439	1,459	1,463	1,479	1,486	1,494		
22,0	1,58	1,576	1,604	1,627	1,627	1,627	1,643		
24,0	1,74	1,744	1,756	1,768	1,779	1,787	1,803		
26,0	1,928	1,896	1,916	1,939	1,928	1,955	1,947		
φ/ς,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
14/23,1	1,002	1,018	1,025	1,029	1,045	1,061	1,061		
16/26,4	1,143	1,146	1,162	1,178	1,186	1,197	1,205		
18/29,7	1,287	1,299	1,303	1,318	1,330	1,338	1,350		
20/33	1,436	1,439	1,447	1,463	1,467	1,482	1,494		
22/36,3	1,572	1,588	1,604	1,611	1,623	1,635	1,650		
24/39,6	1,76	1,744	1,752	1,768	1,764	1,787	1,803		
26/42,9	1,939	1,932	1,932	1,939	1,943	1,947	1,955		
φ/ς,η	5600/0,35	8000/0,5	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ	φ/ς,η	5600/0,35	8000/0,5	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ
14/23,1	0,541			ΑΡΓΙΛΟΥ/	14/23,1	0,502			ΑΡΓΙΛΟΥ/ΑΜΜΟΥ
20/33		0,795		ΑΜΜΟΥ	20/33		0,721		Υ ΠΙΑ α=0,36
26/42,9			1,084		26/42,9			0,99	
φ/ς,η	5600/0,35	8000/0,5	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ	φ/ς,η	5600/0,35	8000/0,5	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς, η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΙΑ α=1
14/23,1	0,49			ΑΡΓΙΛΟΥ/	14/23,1	0,463			(ΔΥΝΑΜΙΚΗ
20/33		0,717		ΑΜΜΟΥ	20/33		0,67		
26/42,9			0,998		26/42,9			0,896	
φ/ς,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΙΑ α=0,16 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
14/23,1	0,342								
16/26,4		0,412							
18/29,7			0,471						
20/33				0,506					
22/36,3					0,584				
24/39,6						0,658			
26/42,9							0,709		
φ/ς,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ ς,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΙΑ α=0,36 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)	
14/23,1	0,361								
16/26,4		0,412							
18/29,7			0,451						
20/33				0,498					
22/36,3					0,557				
24/39,6						0,619			
26/42,9							0,729		

$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=1$ και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,342							
16/26,4		0,389						
18/29,7			0,451					
20/33				0,51				
22/36,3					0,576			
24/39,6						0,643		
26/42,9							0,717	
$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,416							
16/26,4		0,451						
18/29,7			0,506					
20/33				0,572				
22/36,3					0,701			
24/39,6						0,717		
26/42,9							0,799	
$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=0,36$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,408							
16/26,4		0,479						
18/29,7			0,533					
20/33				0,58				
22/36,3					0,627			
24/39,6						0,701		
26/42,9							0,787	
$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=1$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,393							
16/26,4		0,455						
18/29,7			0,514					
20/33				0,58				
22/36,3					0,643			
24/39,6						0,701		
26/42,9							0,771	
$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου στη στέψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,541							
16/26,4		0,615						
18/29,7			0,705					
20/33				0,795				
22/36,3					0,893			
24/39,6						0,975		
26/42,9							1,084	
$\phi/c, n$	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c, n ΚΑΙ ϕ ΑΡΓΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ $\alpha=0,5$ και ύπαρξη φορτίου στη στέψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,49							
16/26,4		0,576						
18/29,7			0,646					
20/33				0,717				
22/36,3					0,818			
24/39,6						0,904		
26/42,9							0,998	

φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στη στεψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ Η ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,463							
16/26,4		0,529						
18/29,7			0,6					
20/33				0,67				
22/36,3					0,744			
24/39,6						0,822		
26/42,9							0,896	
φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,541							
16/26,4		0,619						
18/29,7			0,705					
20/33				0,787				
22/36,3					0,881			
24/39,6						0,99		
26/42,9							1,088	
φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=0.5 και ύπαρξη φορτίου στη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,486							
16/26,4		0,553						
18/29,7			0,631					
20/33				0,721				
22/36,3					0,807			
24/39,6						0,896		
26/42,9							0,998	
φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,463							
16/26,4		0,529						
18/29,7			0,6					
20/33				0,674				
22/36,3					0,744			
24/39,6						0,818		
26/42,9							0,896	
φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,541							
16/26,4		0,619						
18/29,7			0,705					
20/33				0,787				
22/36,3					0,881			
24/39,6						0,99		
26/42,9							1,088	
φ/с,η	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ с,η ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΠΑ α=0.5 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,486							
16/26,4		0,553						
18/29,7			0,631					
20/33				0,721				
22/36,3					0,807			
24/39,6						0,896		
26/42,9							0,998	

φ/c,n	5600/0,35	6400/0,4	7200/0,45	8000/0,5	8800/0,55	9600/0,6	10400/0,65	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΡΠΙΛΟΥ/ ΑΜΜΟΥ ΓΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1	0,463							
16/26,4		0,529						
18/29,7			0,6					
20/33				0,674				
22/36,3					0,744			
24/39,6						0,818		
26/42,9							0,896	

Δ) Διστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Ασβεστόλιθος-Ψαμμίτης

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΨΑΜΜΙΤΗ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15,0	7,65					
16,0		8,096				
17,0			8,670			
18,0				9,639		
19,0					11,299	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
8,0	12,92					
9,0		12,979				
10,0			12,936			
11				12,951		
12,0					12,955	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑ ΜΜΙΤΗ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	5,814					
16/9		7,018				
17/10			8,670			
18/11				11,139		
19/12					15,150	

mi/GSI	60	80	100	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜΙ ΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	8,658			
17/10		24,467		
19/12			>64	

mi/GSI	60	80	100	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜΙ ΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,5$ (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,896			
17/10		9,033		
19/12			26,221	

mi/GSI	60	80	100	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,36$ (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	4,803			
17/10		11,869		
19/12			>64	

mi/GSI	60	80	100	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=1$ (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	2,65			
17/10		5,307		
19/12			13,908	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	6,561					
16/9		10,799				
17/10			18,592			
18/11				>64		
19/12					>64	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,36$ και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,592					
16/9		5,51				
17/10			8,971			
18/11				15,346		
19/12					27,037	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=1$ και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	1,982					
16/9		2,705				
17/10			3,986			
18/11				6,291		
19/12					10,498	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	7,189					
16/9		11,787				
17/10			20,213			
18/11				>64		
19/12					>64	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,36$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,932					
16/9		6,049				
17/10			9,811			
18/11				16,701		
19/12					29,389	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=1$ και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	2,178					
16/9		2,951				
17/10			4,393			
18/11				6,885		
19/12					11,455	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου στη στέψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	8,674					
16/9		14,252				
17/10			24,494			
18/11				>64		
19/12					>64	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0.5$ και ύπαρξη φορτίου στη στέψη (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,893					
16/9		7,314				
17/10			11,869			
18/11				15,041		
19/12					26,182	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=1$ και ύπαρξη φορτίου στη στέψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	2,654					
16/9		3,619				
17/10			5,299			
18/11				8,318		
19/12					13,873	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mi και GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΓΙΑ $\alpha=0,16$ και ύπαρξη φορτίου στη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	8,674					
16/9		14,232				
17/10			24,486			
18/11				>64		
19/12					>64	

mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mί ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΠΙΑ α=0.5 και ύπαρξη φορτίου στη μέση (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,896					
16/9		5,736				
17/10			9,025			
18/11				15,053		
19/12					26,209	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mί ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΠΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	2,65					
16/9		3,619				
17/10			5,303			
18/11				8,334		
19/12					13,896	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mί και GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΠΙΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	8,674					
16/9		14,232				
17/10			24,486			
18/11				>64		
19/12					>64	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mί ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΠΙΑ α=0.5 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	3,896					
16/9		5,736				
17/10			9,025			
18/11				15,053		
19/12					26,209	
mi/GSI	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	ΑΛΛΑΓΕΣ mί ΚΑΙ GSI ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ/ΨΑΜΜ ΙΤΗ ΠΙΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
15/8	2,65					
16/9		3,619				
17/10			5,303			
18/11				8,334		
19/12					13,896	

Ε) Τριστρωματικό υποθαλάσσιο πρανές, Άργιλος -Άμμος -Ψαμμίτης

φ/ς	5600	6400	7200	8000	8800	9600	10400	
14	1,029	1,033	1,064	1,049	1,072	1,076	1,104	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
16	1,162	1,174	1,182	1,197	1,205	1,221	1,236	
18	1,307	1,311	1,346	1,342	1,381	1,365	1,373	
20	1,451	1,463	1,471	1,479	1,510	1,533	1,541	
22	1,596	1,611	1,627	1,635	1,662	1,670	1,678	
24	1,764	1,764	1,787	1,803	1,814	1,826	1,830	
26	1,904	1,924	1,936	1,951	1,971	1,979	1,990	

φ/η	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	
23,1	1,506	1,486	1,490	1,482	1,490	1,498	1,482	ΑΛΛΑΓΕΣ η ΚΑΙ φ ΑΜΜΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
26,4	1,482	1,486	1,498	1,506	1,479	1,490	1,502	
29,7	1,475	1,502	1,502	1,506	1,49	1,510	1,506	
33	1,486	1,502	1,482	1,479	1,502	1,502	1,486	
36,3	1,506	1,506	1,502	1,502	1,494	1,482	1,479	
39,6	1,49	1,502	1,502	1,502	1,482	1,498	1,479	
42,9	1,482	1,482	1,486	1,502	1,486	1,482	1,475	

φ/ς	19040000	21760000	24480000	27200000	29920000	32640000	35360000	
19,4	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	ΑΛΛΑΓΕΣ c ΚΑΙ φ ΨΑΜΜΙΤΗ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
22,2	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	
25,0	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	
27,8	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	
30,6	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	
33,4	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	
36,2	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	1,479	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	
14/23,1/19,4	1,018							ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ (ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
16/26,4/22,2		1,170						
18/29,7/25			1,322					
20/33/27,8				1,479				
22/36,3/30,6					1,654			
24/39,6/33,4						1,908		
26/42,9/36,2							2,002	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	8000/0,5/27200000	10400/0,65/35360000	ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,Ψ ΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=0,16 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,709			
20/33/27,8		0,967		
26/42,9/36,2			1,381	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	8000/0,5/27200000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,Ψ ΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=0,5 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ
14/23,1/19,4	0,658			
20/33/27,8		1,01		
26/42,9/36,2			1,311	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	8000/0,5/27200000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=0,36 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,67			
20/33/27,8		0,975		
26/42,9/36,2			1,393	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	8000/0,5/27200000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=1 (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,67			
20/33/27,8		0,986		
26/42,9/36,2			1,338	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	
14/23,1/19,4	0,49							ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=0,16 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
16/26,4/22,2		0,666						
18/29,7/25			0,689					
20/33/27,8				0,779				
22/36,3/30,6					0,842			
24/39,6/33,4						0,955		
26/42,9/36,2							0,994	

φ/η,ς	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	
14/23,1/19,4	0,49							ΑΛΛΑΓΕΣ c,η ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΓΙΑ α=0,36 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
16/26,4/22,2		0,584						
18/29,7/25			0,650					
20/33/27,8				0,814				
22/36,3/30,6					0,846			
24/39,6/33,4						0,839		
26/42,9/36,2							0,990	

Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=1 και κλίση 8 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,49							
16/26,4/22,2		0,557						
18/29,7/25			0,697					
20/33/27,8				0,729				
22/36,3/30,6					0,799			
24/39,6/33,4						0,939		
26/42,9/36,2							1,014	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,16 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,592							
16/26,4/22,2		0,662						
18/29,7/25			0,768					
20/33/27,8				0,834				
22/36,3/30,6					0,904			
24/39,6/33,4						1,100		
26/42,9/36,2							1,135	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,36 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,529							
16/26,4/22,2		0,666						
18/29,7/25			0,693					
20/33/27,8				0,779				
22/36,3/30,6					0,873			
24/39,6/33,4						0,982		
26/42,9/36,2							1,084	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=1 και κλίση 10 μοίρες (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,58							
16/26,4/22,2		0,615						
18/29,7/25			0,740					
20/33/27,8				0,822				
22/36,3/30,6					0,932			
24/39,6/33,4						1,037		
26/42,9/36,2							1,111	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στη στέψη (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,705							
16/26,4/22,2		0,787						
18/29,7/25			0,865					
20/33/27,8				1,006				
22/36,3/30,6					1,061			
24/39,6/33,4						1,213		
26/42,9/36,2							1,408	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στη στέψη (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,682							
16/26,4/22,2		0,775						
18/29,7/25			0,889					
20/33/27,8				0,990				
22/36,3/30,6					1,115			
24/39,6/33,4						1,240		
26/42,9/36,2							1,365	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στη στέψη(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,67							
16/26,4/22,2		0,771						
18/29,7/25			0,881					
20/33/27,8				0,986				
22/36,3/30,6					1,104			
24/39,6/33,4						1,229		
26/42,9/36,2							1,350	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,16 και ύπαρξη φορτίου στη μέση (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,705							
16/26,4/22,2		0,787						
18/29,7/25			0,865					
20/33/27,8				1,006				
22/36,3/30,6					1,061			
24/39,6/33,4						1,213		
26/42,9/36,2							1,408	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στη μέση (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,682							
16/26,4/22,2		0,775						
18/29,7/25			0,889					
20/33/27,8				0,990				
22/36,3/30,6					1,115			
24/39,6/33,4						1,240		
26/42,9/36,2							1,365	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0,5 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,682							
16/26,4/22,2		0,775						
18/29,7/25			0,889					
20/33/27,8				0,990				
22/36,3/30,6					1,115			
24/39,6/33,4						1,240		
26/42,9/36,2							1,365	
Φ/η,ε	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ ε,η ΚΑΙ Φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=1 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,67							
16/26,4/22,2		0,771						
18/29,7/25			0,881					
20/33/27,8				0,986				
22/36,3/30,6					1,104			
24/39,6/33,4						1,229		
26/42,9/36,2							1,350	

φ/n,c	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=1 και ύπαρξη φορτίουστη μέση(ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,67							
16/26,4/22,2		0,771						
18/29,7/25			0,881					
20/33/27,8				0,986				
22/36,3/30,6					1,104			
24/39,6/33,4						1,229		
26/42,9/36,2							1,350	
φ/n,c	5600/0,35/19040000	6400/0,4/21760000	7200/0,45/24480000	8000/0,5/27200000	8800/0,55/29920000	9600/0,6/32640000	10400/0,65/35360000	ΑΛΛΑΓΕΣ c,n ΚΑΙ φ ΑΡΓΙΛΟΥ,ΑΜΜΟΥ,ΨΑ ΜΜΙΤΗ ΠΑ α=0.16 και ύπαρξη φορτίου στον πόδα (ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)
14/23,1/19,4	0,705							
16/26,4/22,2		0,787						
18/29,7/25			0,865					
20/33/27,8				1,006				
22/36,3/30,6					1,061			
24/39,6/33,4						1,213		
26/42,9/36,2							1,408	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Beniest, J.P. Brun, C.Gorini, V.Crombez, R.Deschamps, Y.Hamon, J.Smit, (2016) «Interaction between trench retreat and Anatolian escape as recorded by Neogene basins in the northern Aegean Sea», Marine and Petroleum Geology
- [2] Θεοδώρα Α. Μπαράκου (2000) «Σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά Βορείου Αιγαίου», Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- [3] Alexandros Varesis, George Anastasakis (2021) «Cenozoic Marine Basin Evolution in the Western North Aegean Trough Margin: Seismic Stratigraphic Evidence», Department of Historic Geology Paleontology, Faculty of Geology & Geoenvironment National and Kapodistrian University of Athens, Athens, Greece.
- [4] Cenk Yaltirak, Bedri Alpar, Huseyin Yuce (1998) «Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (northeastern Aegean Sea, Turkey) », Tectonophysics 300.
- [5] V. Lykousis, G. Rousakis, P. Pavlakis, M. Alexandri (2001) «Stratigraphy and dating of a large slumping event in the northern Aegean», Bulletin of the Geological Society of Greece.
- [6] Monty A. Hampton, Jacques Locat, Homa J. Lee (1996), «Submarine Landslides», U.S. Geological Survey, Menlo Park California, Department of Geology and Geological Engineering Laval University, Quebec City, Quebec, Canada.
- [7] D.G. Masson, C.B. Harbitz, R.B. Wynn, G. Pedersen, F. Lovholt (2006), «Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction», Philosophical transactions of the royal society.
- [8] Cruden D. (1991) «A simple definition of a landslide», Bulletin of Engineering Geology & the Environment.
- [9] Μητσέλος Νικόλαος (2016), «Παρακολούθηση κατολισθήσεων με δορυφορικές γεωδαιτικές μεθόδους», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [10] Κάβουρα Αικατερίνη-Παρασκευή (2013), «Κατολισθήσεις στο Νομό Αχαΐας: Ανάπτυξη μοντέλου Επικινδυνότητας», Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [11] Μπουτακίδης Δημήτριος (2023), «Αριθμητική προσομοίωση υποθαλάσσιων πρηνών με εδραζόμενη ανεμογεννήτρια και μελέτη του αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [12] James P.M. Syvitski, David C. Burrell, Jens M. Skei. (1986) «Fjords: Processes and Products»
- [13] John M. Klinck, James J. O'Brien, Harald Svendsen (1981) «A simple model of Fjord and Coastal Circulation Interaction», Journal of physical oceanography.
- [14] Alexandre Janin, Mathieu Rodriguez, Dimitris Sakellariou, Vasilis Lykousis, Christian Gorini (2019), «Tsunamigenic potential of a Holocene submarine landslide along the North Anatolian Fault (northern Aegean Sea, off Thasos Island): insights from numerical modelling», Natural Hazards and Earth System Sciences.
- [15] Aristofanis Stefatos, Marinos Charalambakis, George Papatheodorou, George Ferentinos, (2006), «Tsunamigenic sources in an active European half-graben (Gulf of Corinth, Central Greece) », Marine Geology 232.
- [16] Aurelia Hubert-Ferrari, Arnaud Beckers, Christian Beck, George Papatheodorou, Marc de Batist, Dimitris Sakellariou, Efthymios Tripsanas, Alain Demoulin, «Characteristics and

frequency of large submarine landslides at the western tip of the Gulf of Corinth based on a grid of 600km high-resolution seismic profiles».

[17] Katherine Lynn Croff Bell, Steven N. Carey, Paraskevi Nomikou, Haraldur Sigurdsson, Dimitris Sakellariou, (2013), «Submarine evidence of a debris avalanche deposit on the eastern slope of Santorini volcano, Greece», Tectonophysics.

[18] B.G. McAdoo, L.F. Pratson, D.L. Orange, (2000), «Submarine landslide geomorphology, US continental slope», Marine Geology.

[19] G. Papatheodorou, G. Ferentinos, (1996), «Submarine and coastal sediment failure triggered by the 1995, Ms=6,1R Aegion earthquake, Gulf of Corinth, Greece», Laboratory of Marine Geology and Physical Oceanography, University of Patraw, Patras, Greece.

[20] Klaus Reicherter, Ioannis Papanikolaou, Jean Roger, Margret Mathes-Schmidt, Dimitrios Papanikolaou, Stefan Rossler, Christoph Grutzner, Georgios Stamatis, (2010), «Holocene tsunamigenic sediments and tsunami modelling in the Thermaikos Gulf area (northern Greece) », Zeitschrift fur Geomorphologie Vol.54.

[21] Flac/Slope Manual

[22] Παπαμάλαμα Ειρήνη-Χρυσοβαλάντου,(2019), «Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και υπεράκτιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

[23] Παναγιώτης Π. Βεργούλης, (2020), «Γεωκίνδυνοι και περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξόρυξης υποθαλάσσιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Η περίπτωση της νοτιοανατολικής Μεσογείου», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

[24] Bin Zhu, Huafu Pei, Qing Yang, (2018), «Probability analysis of submarine landslides based on the Response Surface Method: A case study from the South China Sea», Applied Ocean Research.

[25] Ye He, Guangfa Zhong, Liaoliang Wang, Zenggui Kuang, (2014), «Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea», Marine and Petroleum Geology.

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

[A]<https://eclass.aegean.gr/modules/document/file.php/GEO340/07%20B%20%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%9F%CE%9B%CE%99%CE%A3%CE%98%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%2023-11-2020.pdf> Νικόλαος Ζούρος (13/02/2024) .

[B] <https://besafenet.net/el/hazards/landslides/> (08/03/2024).

[Γ] <https://www.learnz.org.nz/geohazards152/bg-standard-f/landslides-in-new-zealand> (02/03/2024).

[Δ] https://www.researchgate.net/figure/The-Mohr-Coulomb-failure-criteria-and-Mohrs-circle-The-failure-criterion-represents-the_fig8_334009965 (10/2/2024).