



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

“ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΥΠΟΔΟΜΩΝ”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ
ΕΔΡΑΖΟΜΕΝΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ
ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΟΥΤΑΚΙΔΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων καθηγητής

Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ

ΒΟΛΟΣ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

© 2023 Δημήτριος Μπουτακίδης

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 Εφραιμίδης
(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 Μεταπτυχιακών Σπουδών

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή, καθώς στάθηκε αρωγός από τη πρώτη έως και την τελευταία στιγμή στην προσπάθεια περάτωσης της εργασίας. Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τους συνεπιβλέποντες καθηγητές, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Τσινίδη και την Λέκτορα κ. Πολυξένη Καλλιόγλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και την αντικειμενική αξιολόγησή της.

**Αριθμητική προσομοίωση υποθαλασσιών πρανών με εδραζόμενη
ανεμογεννήτρια και μελέτη του αντίστοιχου συντελεστή ασφάλειας σε στατικές
και δυναμικές φορτίσεις**

Δημήτριος Μπουτακίδης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει μεθοδικά την μελέτη των συντελεστών ασφαλείας για υποθαλάσσια πρανή με εδραζόμενη ανεμογεννήτρια όταν υπόκεινται σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Στόχος της είναι να παρουσιάσει το πλαίσιο της μεθοδολογίας για την εύρεση ασφαλών εδαφικών περιοχών για την έδραση υποθαλασσιών ανεμογεννητριών σε μεγάλα βάθη. Επιπλέον, ασχολείται με τους μηχανισμούς που διέπουν τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Αρχικά, στο κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται το φαινόμενο των υποθαλασσιών κατολισθήσεων και οι μηχανισμοί δημιουργίας τους. Εν συνέχεια, στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε παραδείγματα, από τις σημαντικότερες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που έχουν παρατηρηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Στο κεφάλαιο 3, γίνεται παρουσίαση του προγράμματος Flac Slope. Πιο εξειδικευμένα, αναφέρεται το επιστημονικό υπόβαθρο του προγράμματος και παρουσιάζεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας του. Συνεπακόλουθα, στο κεφάλαιο 4, γίνεται μοντελοποίηση θαλάσσιων πρανών και παραμετρική ανάλυση της ευστάθειά τους, με σκοπό να αξιολογηθούν οι συντελεστές ασφάλειας που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Τέλος στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και παρατίθενται οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Numerical simulation of subsea slopes with an anchored wind turbine and study of the corresponding factor of safety in static and dynamic loads

Dimitrios Boutakidis

Abstract

This thesis methodically examines the study of the safety factors for underwater slopes with a mounted wind turbine when subjected to static and dynamic loads. Its aim is to present the framework of the methodology for finding safe land areas for the siting of subsea wind turbines at great depths. First, chapter 1 mentions the landslide phenomenon. More specifically, the phenomenon of underwater landslides and their creation mechanisms are described. Then, chapter 2 mentions examples of the most important underwater landslides that have been observed on a global scale. In chapter 3, the Flac Slope program is presented. More specifically, the scientific background of the program is mentioned and its mode of operation is presented in detail. Consequently, in chapter 4, modeling of sea slopes and parametric analysis of their stability is carried out, with the aim of evaluating the safety factors resulting in each case. Finally, in chapter 5, the conclusions are presented and suggestions for future research are listed.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ.....	7
Εισαγωγή.....	7
1.1 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις.....	8
1.2 Μηχανισμοί υποθαλάσσιων κατολισθήσεων.....	16
1.3 Ο Θαλάσσιος πυθμένας	28
1.4 Περιγραφή του θαλάσσιου πυθμένα - Βαθυμετρικά χαρακτηριστικά.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ [2].....	34
2.1 Κατολίσθηση Storrega	34
2.2 Κατολίσθηση Finneidfjord	39
2.3 Κατολίσθηση στο Κόλπο του Μεξικού – Χαράδρα Sigsbee	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ FLAC SLOPE.....	49
3.1 FLAC Slope [11]	49
3.2 Τεχνική μείωσης αντοχής του FLAC Slope	50
3.3 Παρουσίαση λειτουργίας του FLAC Slope.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ FLAC SLOPE ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	72
4.1 Σύνοψη του μοντέλου.....	72
4.2 Χαρακτηριστικά του μοντέλου.....	72
4.3 Τυπικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας	74
4.3.1 Πλωτές ανεμογεννήτριες.....	74
4.3.2 Τρόπος εφαρμογής φορτίου ανεμογεννήτριας στο μοντέλο του Flac Slope.....	76
4.4 Παραμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου	78
4.4.1 Ύπαρξη 2 στρωμάτων	78
4.4.2 Ύπαρξη 3 στρωμάτων	90
4.5 Ψευδοστατική ανάλυση.....	102
4.5.1 Τρόπος εφαρμογής ψευδοστατικού φορτίου στο μοντέλο του Flac Slope.....	105
4.5.2 Εφαρμογή ψευδοστατικής ανάλυσης	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	121
Βιβλιογραφία.....	123
Ιστογραφία.....	124
Εικόνες	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Εισαγωγή

Η κατολίσθηση αποτελεί ένα γεωλογικό φαινόμενο με έντονα χαρακτηριστικά, μια γεωλογική καταστροφή, που συναντάται σε χερσαίες αλλά και σε υποθαλάσσιες βάσεις. Ειδικότερα πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο μια εδαφική (ή βραχώδης) μάζα, λόγω του φαινομένου της βαρύτητας αποκόπτεται από ένα ψηλότερο σημείο και ολισθαίνει προς ένα χαμηλότερο σημείο, παρασύροντας οτιδήποτε βρίσκεται στη πορεία της [Α].

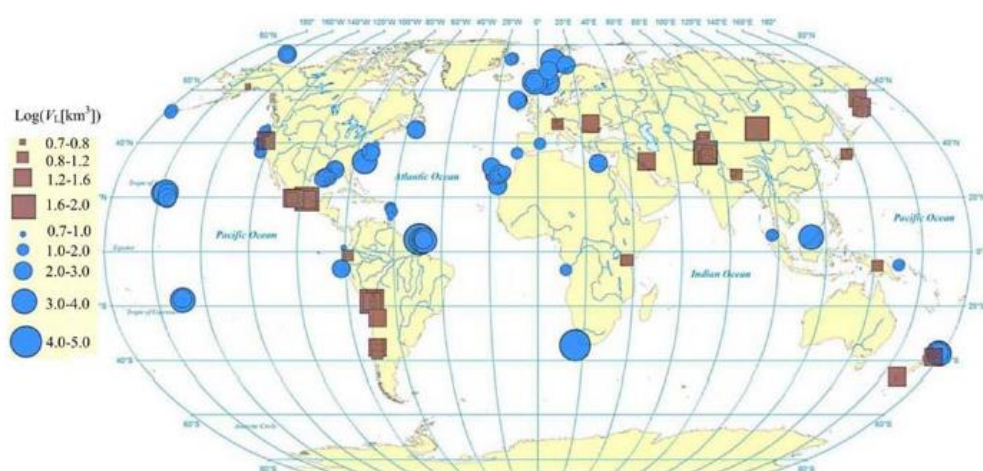
Λόγω του γεγονότος ότι η κατολίσθηση συγκαταλέγεται σε ένα διευρυμένο πλήθος βαρυτικών ροών μάζας, σε πρώτο στάδιο πρέπει να οριστεί η κατολίσθηση βάσει της ποσότητας που καταλαμβάνει κάθε φορά, ως εξής: στη κατολίσθηση, η πυκνότητα του βασικού όγκου του υλικού που μετακινείται, απαιτείται να ξεπερνάει κατ' ελάχιστο 10% τη πυκνότητα του νερού [1].

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις διαφέρουν ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά (κινηματικά & δυναμικά) εν συγκρίσει με αυτές που συμβαίνουν χερσαία, ενώ ακόμη δεν έχει αποσαφηνιστεί το σύνολο των μηχανισμών που συσχετίζονται με την έναρξη αυτού του φαινομένου [2].

Ο σημαντικότερος λόγος που μελετάται έντονα το φαινόμενο των κατολισθήσεων από ένα ευρύ φάσμα επιστημών είναι αρχικά η πλήρης κατανόηση του φαινομένου και η ανάλυση από γεωλογικής άποψης του υποβάθρου που το συνοδεύει και δευτερευόντως η πρόληψη, αλλά και ελάττωση των δυσχερών επιπτώσεων που προκαλούν.

1.1 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται συνδυασμός της επιστημονικής ύλης των μαθημάτων της τεκτονικής και υποθαλάσσιας γεωλογίας, των θεμελιώσεων γεωτεχνικών έργων και της αλληλοεξάρτησης ρευστών με θάλασσα και υποθαλάσσια έργα, αλλά και των βασικών αρχών της μηχανικής ρευστών, με σκοπό να γίνει παρουσίαση και μοντελοποίηση των μηχανισμών που επικρατούν σε ένα υποθαλάσσιο κατολισθητικό φαινόμενο. Ως φαινόμενο οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, αποτελούν μέρος της κατηγορίας των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων, που συμβαίνουν στο υποθαλάσσιο περιβάλλον και παίζουν δραστικό ρόλο στη διαμόρφωση του πυθμένα της θάλασσας και κατά συνέπεια στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των υπεράκτιων και υποθαλάσσιων κατασκευών ενεργειακών υποδομών. [2*]



Εικόνα 1: Κατολισθήσεις σε υποθαλάσσιο (γαλάζιοι κυκλικοί δίσκοι) και χερσαίο (καφέ παραλληλόγραμμα) περιβάλλον.[1']

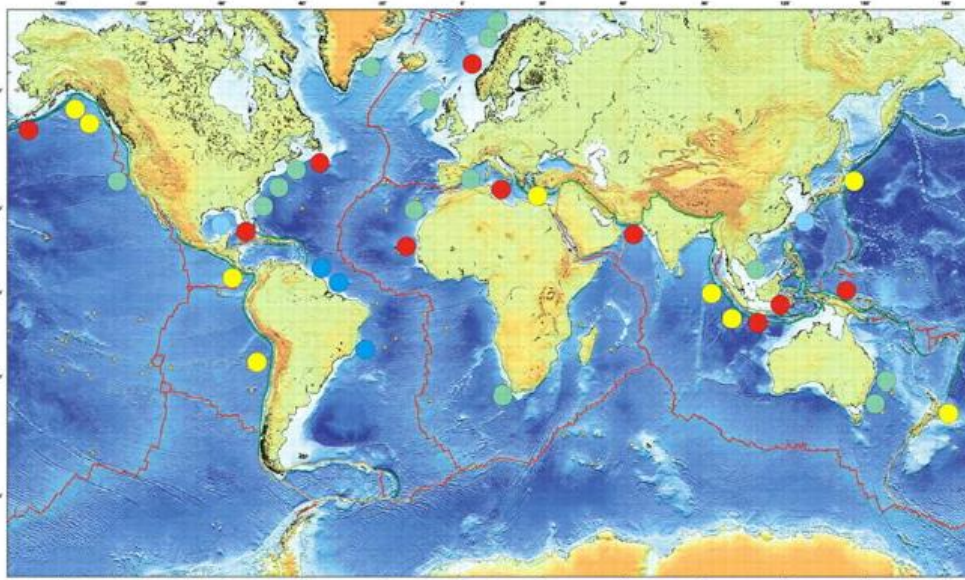
Πιο ειδικά, μία υποθαλάσσια κατολίσθηση προκαλείται την στιγμή που οι δυνάμεις που ενεργούν στην εδαφική (ή και βραχώδη) μάζα που τείνουν να οδηγήσουν σε αποκόλληση ένα επιπέδου μίας επιφάνειας ολίσθησης, όπως οι βαρυτικές δυνάμεις και τα σεισμικά φορτία, ξεπερνούν σε μέγεθος τις δυνάμεις που ανθίστανται στην ολίσθηση, όπως η ανάπτυξη διατμητικής αντοχής στο επίπεδο της

επιφάνειας ολίσθησης. Όταν ισχύει η προαναφερθείσα συνθήκη, το αποτέλεσμα είναι η αστοχία του υποθαλάσσιου πρανούς. Οπότε, μπορεί να οριστεί ως γεγονός υποθαλάσσιας κατολίσθησης, η μετακίνηση των ιζημάτων λόγω του φαινομένου της βαρύτητας σε περιοχές μεγαλύτερου βάθους του θαλάσσιου πυθμένα [3].

Οι αντιστεκόμενες δυνάμεις έναντι της ολίσθησης έχουν αλληλοεξάρτηση κατά κύριο λόγο με την πίεση του νερού των πόρων των ιζημάτων. Την στιγμή που η προαναφερθείσα πίεση ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή της υδροστατικής πίεσης, τότε στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων δημιουργείται μια αποσταθεροποιητική τάση, που έχει ως συνέπεια την μείωση της αντοχής του ιζήματος. Συνεπώς, όποια διεργασία σχετίζεται με την αύξηση της πίεσης των πόρων, όπως η ταχεία εναπόθεση ιζημάτων επί του πυθμένα, οδηγεί στο σχηματισμό ενός μη ευσταθούς πρανούς. Συνεπακόλουθα, εξωτερικά αίτια, όπως φορτία λόγω σεισμικών διεγέρσεων, είναι εφικτό να προκαλέσουν την αστάθεια του πρανούς και κατ' επέκταση υποθαλάσσια κατολίσθηση [3].

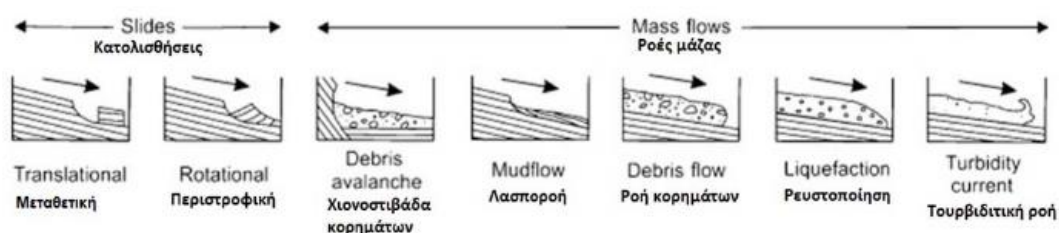
Κατολισθήσεις σε υποθαλάσσια κλίμακα εμφανίζονται τόσο σε ενεργητικής όσο και σε παθητικής φύσεως ηπειρωτικά περιθώρια, σε υποθαλάσσια τμήματα απολήξεων ποτάμιων συστημάτων, π.χ. δέλτα και εκβολές ποταμών, αλλά ακόμη και σε βραχονησίδες που έχουν δημιουργηθεί λόγω ηφαιστειακών γεγονότων. Ένα σύνολο επιστημονικών μελετών έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στη δημιουργία των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, ως αποτέλεσμα της δημιουργίας παγίδων υδρογονανθράκων [4].

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις είναι υπεύθυνες για την πρόκληση ιδιαίτερα σημαντικών βλαβών στις υποθαλάσσιες υποδομές, όπως σε δίκτυα αγωγών μεταφοράς ορυκτών καυσίμων, υποθαλάσσια δίκτυα τηλεπικοινωνιών αλλά και σε εδαφικές θεμελιώσεις των υπεράκτιων εξεδρών άντλησης ορυκτών καυσίμων ή θαλάσσιων ανεμογεννητριών.



Εικόνα 2: Η θέση των μεγαλύτερων υποθαλάσσιων κατολισθήσεων παγκοσμίως. Με πράσινο απεικονίζονται οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις εντός λιθοσφαιρικών πλακών, με κίτρινο αυτές κατά μήκος των περιθωρίων των λιθοσφαιρικών πλακών, με κόκκινο αυτές που οδήγησαν σε τσουνάμι, ενώ με γαλάζιο απεικονίζονται τα ενεργά ποτάμια συστήματα.[2']

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις διακρίνονται σε 2 είδη, τις μεταθετικές (που παρουσιάζουν επιφάνεια ολίσθησης σχετικά επίπεδη) και τις περιστροφικές (που παρουσιάζουν επιφάνεια ολίσθησης κυκλικού σχήματος). Με ανάλογο τρόπο οι υποθαλάσσιες εδαφικές ροές διαχωρίζονται εν συγκρίσει με την ταχύτητα της εδαφικής απόθεσης, τη συνεκτικότητα των εδαφικών κόκκων της ροής και την αναλογία ιζήματος/ρευστού σε διαφορετικά είδη που παρουσιάζονται στην εικόνα 3 παρακάτω[4].



Εικόνα 3: Είδη υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και υποθαλάσσιων ροών μάζας.[3']

Χιονοστιβάδα κορημάτων (debris avalanche) είναι το φαινόμενο που σχετίζεται με την ταχεία ροή κομματιών βράχου και ογκόλιθων, που συμβαίνει εντός υποθαλάσσιων περιοχών με έντονο ανάγλυφο, παραδείγματος χάριν οι υποθαλάσσιες χαράδρες. Τα επακόλουθα γεγονότα του παραπάνω φαινομένου είναι καταστροφικά, λόγω των τεραστίων ταχυτήτων μεταφοράς και περιστροφής, που έχουν σχέση με την

εναλλαγή της ενέργειας από δυναμική σε κινητική. Τα φαινόμενα της λασπορροής (mud flow) και της ροής κορημάτων (debris flow) ανήκουν στη κατηγορία των στρωτών, με συνοχή ροών ιζημάτων με λεπτόκοκκη κοκκομετρία, κατά τις οποίες το υλικό με την πλέον χονδρόκοκκη κοκκομετρία παραμένει σε αιωρήσιμη μορφή εξαιτίας των δυνάμεων που προκαλούν την άνωση του υλικού που ρέει. Ρευστοποιημένη ροή (liquefied flow) είναι το φαινόμενο της ροής ιζημάτων χωρίς συνοχή, τα οποία βρίσκονται σε αιωρήσιμη μορφή ως αποτέλεσμα της ανοδικής εκτόπισης του νερού. Τουρβιδιτική ροή (turbidity current) ορίζεται ως η ροή βαρύτητας, κατά την διάρκεια της οποίας οι εδαφικοί κόκκοι παραμένουν σε αιώρηση, εξαιτίας της τυρβώδους ροής [3].

Έως και την σημερινή εποχή δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως το σύνολο των μηχανισμών που προκαλούν την έναρξη των υποθαλάσσιων φαινομένων κατολισθήσεως [5]. Παρόλο αυτά, έχει καταστεί γνωστό πως διαχωρίζονται σε 2 είδη, τους ξαφνικούς και τους προοδευτικούς μηχανισμούς, σύμφωνα με την αναπτυσσόμενη ταχύτητα που μεταδίδονται, και σε φυσικούς και ανθρωπογενείς, σύμφωνα με την διέλευση της πηγής τους. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις καθίσταται εφικτό να εκκινήσουν ως και σε επιφάνεια πυθμένα με γωνία κλίσης μικρότερης της 1° [6].

Οι λόγοι πρόκλησης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων έχουν σχέση με οποιαδήποτε διεργασία, φυσική ή ανθρωπογενής, που τείνει να αυξήσει τις εδαφικές τάσεις ή να μειώσει την εδαφική αντοχή, έχοντας ως αποτέλεσμα την αστοχία της εδαφικής μάζας. Οπότε με σκοπό την αποφυγή των συνεπειών που προκαλούν οι εδαφικές αστοχίες είναι επιτακτικής σημασίας η κατανόηση του φαινομένου της πίεσης των πόρων και των μηχανισμών που συντελούν στην αύξησή της [6].

Οι πιο σημαντικές φυσικές διεργασίες που είναι δυνατό να οδηγήσουν στην έναρξη υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι οι παρακάτω [7]:

- Η ταχεία απόθεση υλικών οδηγεί στην επαύξηση της υπερπίεσης πόρων του νερού, στην υποστερεοποίηση και στην υπέρβαση των ανεκτών διατμητικών τάσεων εντός της περιφέρειας του εδαφικού πρσανούς.
- Η διάβρωση που συντελείται στον πόδα του πρσανούς έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία εντονότερων κλίσεων του πρσανούς,

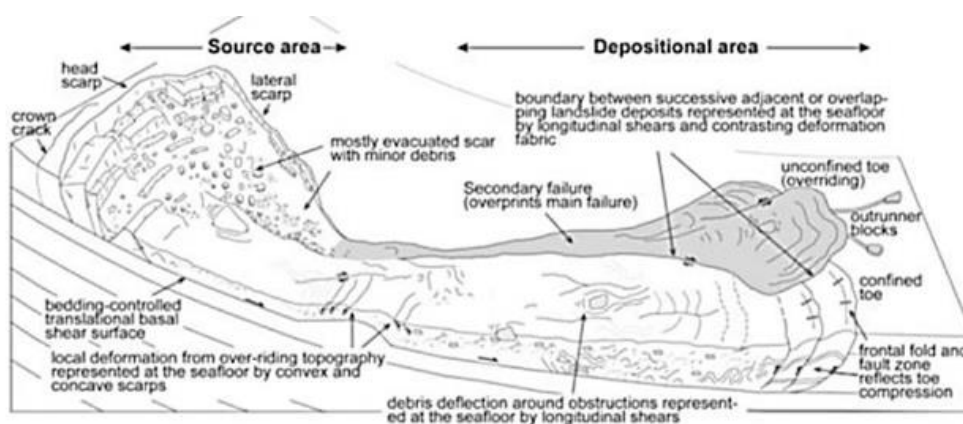
επακολούθως οδηγεί στην αύξηση των δυσμενών συνιστωσών των δυνάμεων βαρύτητας και των διατμητικών τάσεων στο επίπεδο των εν δυνάμει επιφανειών αστοχίας.

- Η τήξη που προκαλείται στους υδρίτες αερίων στην επιφάνεια του πυθμένα, λόγω υπέρβασης του ορίου της θερμοκρασίας ή ελάττωση της πίεσης, λόγω επαυξημένης πίεσης πόρων και ελαττούμενης αντοχής του εδάφους.
- Η εκτίναξη ηφαιστειών ιλύος και διάπυρων άλατος.
- Η ενεργοποίηση τεκτονικών ρηγμάτων, που οδηγεί στην εκδήλωση σεισμικών συμβάντων, μετατοπίσεων και αστοχιών του εδάφους.
- Οι σεισμικές διεγέρσεις, που οδηγούν στην πρόκληση ισχυρών εδαφικών αναταράξεων, δυνάμεων αδρανείας (σε βραχυπρόθεσμο χρόνο) και που ως τελικό αποτέλεσμα έχουν την επαύξηση της υπερπίεσης πόρων.
- Τα εσωτερικά κύματα ή σολιτόνια (κύματα που πορεύονται διατηρώντας σταθερή ταχύτητα, χωρίς τροποποίηση του σχήματος τους), λόγω της διαφοράς στο μέτρο της πυκνότητας, που γίνεται αισθητή στα ρηχά νερά.
- Τα εδάφη χαμηλής αντοχής, λόγω ότι παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα παρουσίασης ολίσθησης και εκτεταμένες ζώνες αστοχίας.
- Η μείωση της στάθμης της θάλασσας στη περίοδο των παγετώνων, η οποία το πρωταρχικό της αντίκτυπο είναι η μειωμένη υδροστατική πίεση και επακολούθως η εκτόνωση των ελεύθερων αερίων και η προδιάλυση (ex-solution) των υδριτών αερίων.
- Η αυξημένη θερμοκρασία του νερού στο επίπεδο του θαλάσσιου πυθμένα, λόγω του γεγονότος της μεταβολής των θαλασσίων ρευμάτων, η οποία έχει ως συνέπεια να αυξηθεί άμεσα η θερμοκρασία της εδαφικής μάζας του πυθμένα και να προδιαλυθούν οι υδριτές αερίου.

Οι πιο σημαντικές ανθρωπογενείς διεργασίες που συντελούν στην πρόκληση υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι οι παρακάτω [7]:

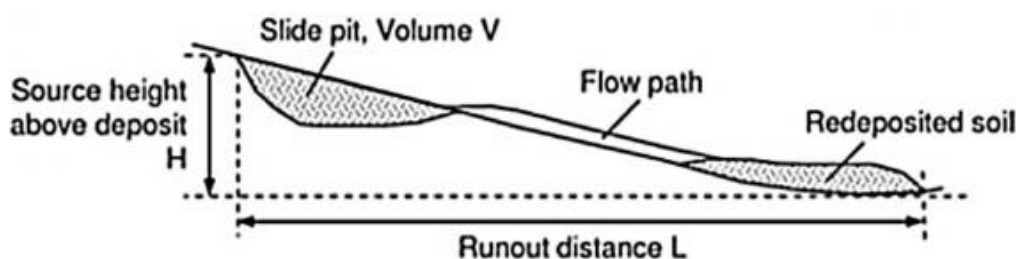
- Οι γεωτρήσεις, καθώς αποτελούν το βασικό αίτιο δημιουργίας εκρήξεων και κρατήρων στο θαλάσσιο πυθμένα.
- Οι υπόγειες εκρήξεις, που οδηγούν στη μεταβολή της πίεσης πόρων σε ρηχά υποστρώματα, με αποτέλεσμα να μετατρέπουν κεκλιμένες περιοχές του βυθού σε οιονεί ασταθείς.
- Οι αυξημένες θερμοκρασίες και ροές θερμότητας κατά μήκος των γεωτρήσεων άντλησης πετρελαίου, που έχουν ως αποτέλεσμα την διάσπαση των υδριτών αερίων, την επαύξηση της πίεσης πόρων και συνεπακόλουθα οδηγούν σε μειωμένες εδαφικές αντοχές.
- Η ελάττωση της πίεσης του ταμιευτήρα των υδρογονανθράκων, που οδηγεί στην καθίζηση του ταμιευτήρα και συνεπακόλουθα μεταβάλλονται οι τάσεις των υπερκείμενων στρωμάτων.
- Το σύνολο των δραστηριοτήτων που σχετίζεται με τις εγκαταστάσεις ενεργειακών υποδομών (όπως οι πλατφόρμες εξόρυξης), που έχουν ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι δυνάμεις βαρύτητας.
- Οι υπεράκτιες κατασκευές που σχετίζονται με τον ελλιμενισμό και τις αγκυρώσεις του πυθμένα, που έχουν ως συνέπεια την ανάπτυξη πλευρικών δυνάμεων, τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο διάστημα.

Είναι άξιο αναφοράς ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, ροές κορημάτων και λασποροές είναι εφικτό να προκύψουν, εκτός των άλλων παραγόντων, και από περιοδικές τάσεις κυματισμών [8]. Στην εικόνα 4 παρακάτω γίνεται μία σχηματική απεικόνιση υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η περιοχή στην οποία προκαλείται η κατολίσθηση (source area), στην οποία συναντώνται τοπικές παραμορφώσεις. Οι τοπικές παραμορφώσεις γίνονται ευδιάκριτες λόγω των κοίλων και κυρτών αποτυπωμάτων στην τοπογραφία του πυθμένα. Επιπλέον παρουσιάζεται η περιοχή απόθεσης της κατολίσθησης (depositional area) , στην οποία είναι ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ των διαδοχικών παρακείμενων ή επικαλυπτόμενων αποθέσεων κατολίσθησης που αντιπροσωπεύονται στο βυθό της θάλασσας από διαμήκη ψαλίδα και αντίθετη παραμόρφωση.



Εικόνα 4: Ενδεικτική απεικόνιση ενός υποθαλάσσιου κατολισθητικού φαινομένου.[4']

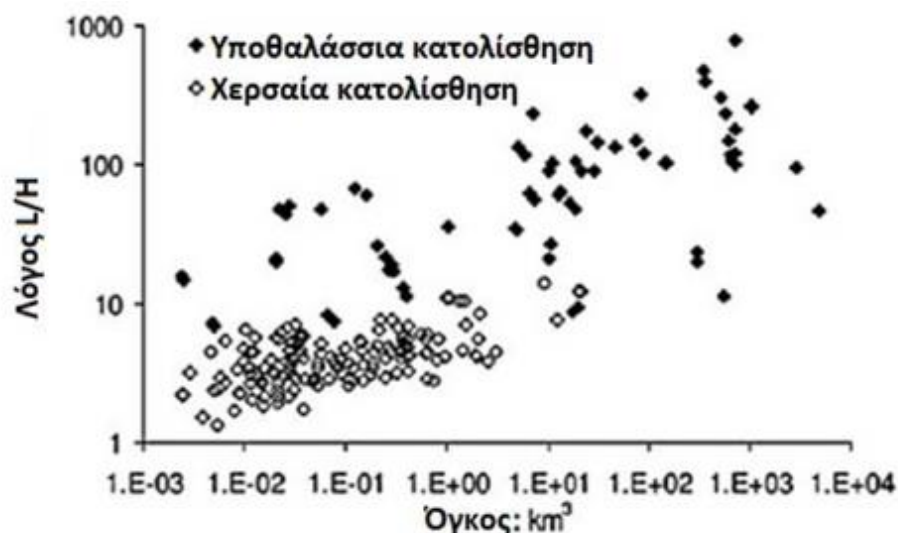
Η κινητικότητα που παρουσιάζουν οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορεί να απεικονιστεί γεωμετρικά δια μέσω της χρησιμοποίησης του λόγου εκτροπής L/H , όπου “L” ορίζεται η απόσταση στην οριζόντια διεύθυνση από το αρχικό σημείο της κατολίσθησης έως το τελικό σημείο της μετακίνησης και ως “H” ορίζεται η κατακόρυφη απόσταση (Εικόνα 5) [9].



Εικόνα 5: Η κινητικότητα που παρουσιάζει μία υποθαλάσσια κατολίσθηση.[5']

Στην εικόνα 6 γίνεται παρουσίαση του διαγράμματος που δείχνει πως μεταβάλλεται ο λόγος εκτροπής (L/H) σε συνάρτηση με τον όγκο συγκεκριμένων κατολισθαίνουσών μαζών που αφορούν υποθαλάσσιες και χερσαίες κατολισθήσεις. Έχει παρατηρηθεί ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στη πλειονότητα των περιπτώσεων συσχετίζονται με πιο αυξημένο όγκο όσο αφορά την μάζα που κατολισθαίνει και πιο αυξημένη απόσταση εκτροπής (λόγω μεγαλύτερου λόγου L/H) εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες χερσαίες κατολισθήσεις. Προφανώς, το νερό ωθεί σε

αύξηση την κινητικότητα της κατολισθαίνουσας μάζας, δίνοντας ώθηση στην ροή των κατολισθήσεων [6].



Εικόνα 6: Διάγραμμα που παριστάνει τον όγκου κατολίσθησης εν συγκρίσει με το λόγο L/H. [5']

Γίνεται κατανοητό πως με όποιον τρόπο επιλεγθεί να γίνει ανάλυση της αστοχίας του πρανούς, που φανερώνει την έναρξη κάθε κατολίσθησης, σε πρώτη φάση απαιτείται η αξιολόγηση των παρακάτω βασικών συνθηκών [6]:

- Αστράγγιστες συνθήκες, εφόσον ο μηχανισμός ενεργοποίησης είναι τόσο ταχύς με συνέπεια να μην προλαβαίνει να συμβεί στράγγιση. Έχουν άμεση σχέση με την υπερπίεση πόρων, που είναι εφικτό να οφείλεται στα φορτία μίας σεισμικής διέγερσης.
- Πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες, με την προϋπόθεση μη ύπαρξης υπερπίεσης πόρων. Έχει σχέση με την ύπαρξη όχι ολίσθησης πρανούς με την ελάχιστη δυνατή ταχύτητα, με αποτέλεσμα οι πιέσεις πόρων να είναι σε κάθε σημείο εφάμιλλες των υδροστατικών και χωρίς να παρουσιάζουν διαρροές.
- Μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, σε περίπτωση που ενώ έχουν εκτονωθεί σε σημαντικό βαθμό οι υπερπιέσεις πόρων, υπάρχουν παραμένουσες υπερπιέσεις. Οι συνθήκες προκύπτουν υπό

προϋποθέσεις σε γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωτεχνικές διεργασίες που συνεπάγονται πλεονάζουσα πίεση πόρων σε σχέση με την υδροστατική.

1.2 Μηχανισμοί υποθαλάσσιων κατολισθήσεων

Η ευστάθεια ενός πρανούς ορίζεται δια μέσω ενός συντελεστή ασφαλείας, έχοντας ως σύμβολο το γράμμα F , και ο υπολογισμός του γίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{\tau_{ult}}{\tau_{mob}}, \quad 1.1$$

όπου,

τ_{ult} , η διαθέσιμη διατμητική αντοχή των ιζημάτων του πυθμένα

τ_{mob} , η απαιτούμενη διατμητική αντοχή για την αποτροπή της κατολίσθησης

Για αστράγγιστες συνθήκες η διατμητική αντοχή με την μέγιστη τιμή αποδίδεται δια μέσω ενός κριτηρίου αστοχίας συναρτήσει των ολικών τάσεων:

$$\tau_{ult} = s_u + \sigma_n \tan \varphi, \quad 1.2$$

όπου,

s_u , η αστράγγιστη διατμητική αντοχή

σ_n , η ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας

φ , η γωνία τριβής του εδάφους

Για στραγγιζόμενες συνθήκες η μέγιστη διατμητική αντοχή προκύπτει από ένα κριτήριο αστοχίας ενεργών τάσεων:

$$\tau_{ult} = \tau'_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi', \quad 1.3$$

όπου,

c' , η εδαφική συνοχή

σ'_n , η ενεργή ορθή τάση που ασκείται στο επίπεδο αστοχίας

ϕ' , η ενεργή γωνία τριβής επί του εδάφους

Επιπλέον, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma' = \sigma - u, \quad 1.4$$

όπου,

σ' , η ενεργός τάση

σ , η ολική τάση

u , η πίεση του νερού των πόρων

$$u = u_o + \Delta u, \quad 1.5$$

όπου,

u_o , η αρχική πίεση του νερού των πόρων

Δu , η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων λόγω σεισμικών φορτίσεων, κυματικών φορτίσεων, διάβρωσης και άλλων αιτιών.

Όταν το πρανές αστοχεί πρωταρχικά, η ευστάθεια υπολογίζεται δια μέσω της οριακής αντοχής του εδάφους, ενώ σε περίπτωση που έχει ολισθήσει ξανά στο παρελθόν, η ευστάθεια του πρανούς υπολογίζεται δια μέσω της παραμένουσας αντοχής. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους συσχετίζεται με τους παράγοντες της ορυκτολογικής σύστασης, του σχήματος, του μεγέθους αλλά και της διάταξης των κόκκων των γεωυλικών που αποτελείται το πρανές. Επιπλέον άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς είναι ο δείκτης πόρων, η υγρασία, το καθεστώς επικράτησης των τάσεων πεδίου και το ιστορικό φόρτισης [6].

Σε περίπτωση που το πρανές δεν έχει βάθος (αβαθές), όπως φαίνεται στην εικόνα 7, η προκύπτουσα επιφάνεια αστοχίας είναι εντός κοντινής εμβέλειας στη κάτω πλευρά της επιφάνειας του πρανούς και συνεπώς η αστοχία διαδραματίζεται παραλλήλως με την επιφάνεια του μετώπου του πρανούς. Η πραγματοποίηση ανάλυσης για το πρανές είναι καίριας σημασίας σε περιπτώσεις ιδιαίτερα αβαθών μεταθετικών ολισθήσεων και προσφέρεται για χαμηλής κλίσης και εκτενή υποθαλάσσια πρανή, που η αστοχία κλίνει στο να γίνει επίπεδη και να αγγίξει την παραλληλότητα με την ολίσθηση [6].



Εικόνα 7: Ενδεικτική αναπαράσταση ολίσθησης σε ένα αβαθές πρανές.[5']

Σε περίπτωση εδαφικού τμήματος με μήκος L , που απαρτίζει ένα πρανές απείρου μήκους, που συμβαίνει αστοχία, οι ασκούμενες δυνάμεις επί αυτού διαχωρίζονται σε κάθετες N , που εφαρμόζονται σε επίπεδο κάθετο της ολίσθησης, και διατμητικές S , που εφαρμόζονται σε επίπεδο παράλληλο της ολίσθησης. Οι παραπάνω δυνάμεις συσχετίζονται με το βάρος W της εδαφικής μάζας (εικόνα 8). Οι δυνάμεις F_1 , F_2 αλληλοεξουδετερώνονται όντας ίσου μέτρου και αντίρροπες, ενώ ο παράγοντας της πίεσης του νερού των πόρων αποδίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$u = \gamma_w z L \sin \alpha \cos \alpha, \quad 1.6$$

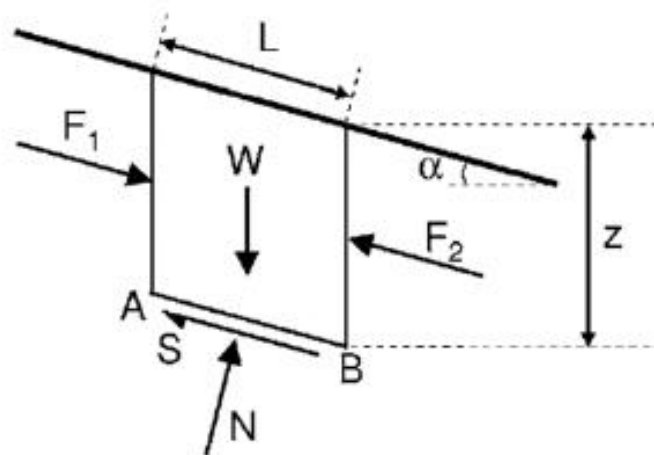
όπου,

γ_w , το ειδικό βάρος νερού

z , το ύψος (το κατακόρυφο πάχος του του ολισθαίνοντος τμήματος)

L , το μήκος του ολισθαίνοντος τμήματος

α , η γωνία κλίσης του πρανούς



Εικόνα 8: Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εδαφικό τμήμα πρανούς απείρου μήκους.[5']

Ειδικότερα, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$W = \gamma z L \cos \alpha , \quad 1.7$$

όπου,

W , το βάρος του εδαφικού τμήματος,

γ , το ειδικό βάρος του εδάφους,

z , το ύψος (το κατακόρυφο πάχος του του ολισθαίνοντος τμήματος),

L , το μήκος του ολισθαίνοντος τμήματος,

α , η γωνία κλίσης του πρανούς.

$$N' = W \cos \alpha - \gamma_w z L \cos^2 \alpha = \gamma' z L \cos^2 \alpha , \quad 1.8$$

$$S = W \sin \alpha - \gamma_w z L \sin \alpha \cos \alpha = \gamma' z L \sin \alpha \cos \alpha , \quad 1.9$$

όπου,

N' , η ενεργός κάθετη τάση,

S , η ενεργός διατμητική τάση,

γ' , το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους, που υπολογίζεται από την σχέση $\gamma' = \gamma - \gamma_w$.

$$\sigma'_s = \frac{N'}{A} = \gamma' z \cos^2 \alpha, \quad 1.10$$

$$\tau_s = \frac{S}{A} = \gamma' z \sin \alpha \cos \alpha, \quad 1.11$$

όπου,

σ'_s , η ονομαστική ορθή τάση που δρα πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης A μοναδιαίου πλάτους (L=1),

τ_s , η ονομαστική διατμητική τάση που δρα πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης A μοναδιαίου πλάτους (L=1).

Για αστράγγιστες συνθήκες, ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας F γίνεται δια μέσω ενός κριτηρίου ολικής αστοχίας ($\tau_{ult} = S_u$) ως εξής:

$$F = \frac{2S_u}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{2S_u}{\gamma' z \sin 2\alpha}. \quad 1.12$$

Θεωρώντας την ύπαρξη οριακής ισορροπίας πρανών αλλά και συντελεστή ασφαλείας ίσο με την μονάδα (F=1), ο υπολογισμός της κρίσιμης γωνίας πρανούς α_{ult} (γωνία ευστάθειας) γίνεται ως παρακάτω:

$$\alpha_{ult} = 0,5 \arcsin \frac{2S_u}{\gamma' z}. \quad 1.13$$

Οι εξισώσεις 1.12 και 1.13 είναι εφικτό να αποδοθούν δια των σχέσεων 1.14 και 1.15 αντίστοιχα:

$$F = \frac{2k}{\sin 2\alpha}, \quad 1.14$$

$$\alpha_{ult} = 0,5 \arcsin(2k), \quad 1.15$$

όπου

k , ο λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ($k = \frac{s_u}{\sigma'_{v0}}$),

σ'_{v0} , η ενεργή ορθή γεωστατική τάση πεδίου.

Σε περίπτωση μαλακής κανονικά στερεοποιημένης υποθαλάσσιας απόθεσης, ο λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής k ισούται σχεδόν με 0,2 και επακολούθως η κρίσιμη γωνία του πρανούς προκύπτει ίση με $\alpha_{ult}=12^\circ$. Συνεπώς, ένα πρανές που είχε ξανααστοχήσει στο παρελθόν, έχει χαμηλότερη αντοχή σε διάτμηση και άρα μικρότερη κρίσιμη γωνία πρανούς α_{ult} [6].

Είναι άξιο αναφοράς ότι η κρίσιμη γωνία ενός πρανούς υπό αστράγγιστες συνθήκες έχει άμεση εξάρτηση με το μέτρο του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης. Από την στιγμή που το μέτρο του βάθους είναι συγκριτικά μεγάλο, συνεπάγεται ότι η προσέγγιση της αστοχίας με ολίσθηση παράλληλη με το επίπεδο της επιφάνειας ολίσθησης καθίσταται ανέφικτη και η αντιμετώπιση ενδείκνυται τότε να γίνει θεωρώντας ότι η αστοχία συμβαίνει σε επιφάνεια ολίσθησης μεγάλου βάθους.

Για στραγγιζόμενες συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας F υπολογίζεται δια μέσω ενός κριτηρίου αστοχίας για ενεργές τάσεις ($\tau_{ult} = \sigma' \tan \varphi_{crit}$) ως έχει παρακάτω:

$$F = \frac{\gamma' z \cos^2 \alpha \tan \varphi_{crit}}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{\tan \varphi_{crit}}{\tan \alpha}. \quad 1.16$$

Εν κατακλείδι, θεωρώντας την εξίσωση 1.16, η ακραία τιμή που είναι εφικτό να πάρει η γωνία α ενός υποθαλάσσιου πρανούς, άνευ αύξησης του ορίου της πίεσης του νερού των πόρων είναι: $\alpha_{ult} = \varphi_{crit}$. Παρόλο αυτά, ο μηχανισμός αστοχίας υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, με μοναδικές δρώσες δυνάμεις επί του πρανούς αυτές της βαρύτητας, δεν απαντάται συχνά, αφού κατά κύριο λόγο $\varphi_{crit} > 20^\circ$ [6].

Η ενεργός ορθή τάση που εφαρμόζεται επί του επιπέδου αστοχίας σε ένα συγκεκριμένο βάθος z υπό τον θαλάσσιο πυθμένα, ελαττώνεται λόγω της υπερπίεσης του νερού των πόρων u_e και αποδίδεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma'_n = \gamma' z \cos^2 \alpha - u_e. \quad 1.17$$

Η υπερστερεοποίηση λόγω των ταχέων ρυθμών ιζηματογένεσης ενισχύει την υπερπίεση των πόρων του εδάφους και συνεπώς η διατμητική τάση που προκύπτει εν τέλει αποδίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{ult} = k \sigma'_n = k (\gamma' z \cos^2 \alpha - u_e). \quad 1.18$$

Συνεπακόλουθα, ο συντελεστής ασφαλείας F έναντι αστοχίας υπό αστράγγιστες συνθήκες ισούται με:

$$F = \frac{k(\gamma' z \cos^2 \alpha - u_e)}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha}. \quad 1.19$$

Με βάση την εξίσωση 1.19 και χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο αστοχίας για ενεργές τάσεις ($\tau_{ult} = \sigma' \tan \varphi_{crit}$) αποδίδεται άλλη μια σχέση για τον συντελεστή ασφαλείας F :

$$F = \frac{(\gamma' z \cos^2 \alpha - u_e) \tan \varphi_{crit}}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha}. \quad 1.20$$

Εφόσον γίνει υπόθεση για σταθερό λόγο υπερπίεσης πόρων ($r_u = \frac{u_e}{\gamma' z}$), τότε η κάθετη (ορθή) στο επίπεδο διάτμησης τάση είναι η παρακάτω:

$$\sigma' = \gamma' z (\cos^2 \alpha - r_u). \quad 1.21$$

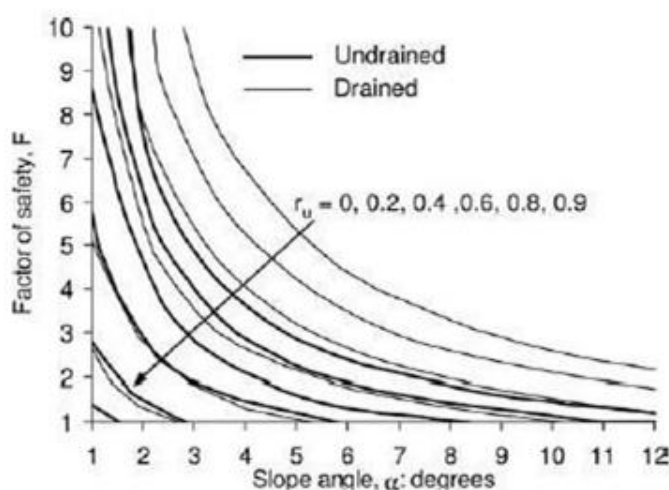
Κατά αυτό τον τρόπο, συνδυάζοντας τις σχέσεις 1.20 και 1.21 (και αξιοποιώντας παράλληλα την εξίσωση 1.19) εξάγονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας βάσει κριτηρίων ολικής αστοχίας (εξίσωση 1.22) και οι συντελεστές ασφαλείας βάσει κριτηρίων ενεργής τάσης (εξίσωση 1.23) αντιστοίχως.

$$F = \frac{k(\gamma' z \cos^2 \alpha - u_e)}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} = k \frac{\cos^2 \alpha - r_u}{\sin \alpha \cos \alpha}, \quad 1.22$$

$$F = \frac{(\gamma' z \cos^2 \alpha - u_e) \tan \varphi_{crit}}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{\cos^2 \alpha - r_u \tan \varphi_{crit}}{\sin \alpha \cos \alpha}. \quad 1.23$$

Στην εικόνα 9 γίνεται παρουσίαση του διαγράμματος που φανερώνει, για πρανή με άπειρο μήκος, τον συσχετισμό του συντελεστών ασφαλείας F με τις γωνίες κλίσης του πρανούς α και την υπερπίεση πόρων r_u τόσο για αστράγγιστες, αλλά τόσο και για στραγγιζόμενες συνθήκες. Ο αστράγγιστος δείκτης διατμητικής αντοχής

ισούται με $k = \frac{s_u}{\sigma_v'} = 0,25$, ενώ η γωνία τριβής $\varphi_{\text{crit}} = 25^\circ$. Όπου s_u , η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και σ_v' , η ενεργή ορθή τάση. Είναι άξιο αναφοράς ότι ο συντελεστής ασφαλείας για στραγγιζόμενες συνθήκες αγγίζει το διπλάσιο μέγεθος εν συγκρίσει με τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας για αστράγγιστες συνθήκες.



Εικόνα 9: Συσχέτιση συντελεστών ασφαλείας με γωνίες πρανών απείρου μήκους. [6']

Αν θεωρηθεί καθεστώς ισορροπίας δυνάμεων, που επικρατούν σε μία απειροστού μεγέθους μερικώς στραγγιζόμενη εδαφική μάζα, η γωνία κλίσης του πρανούς παρουσιάζει περίπου γραμμική μεταβολή εν συγκρίσει με τον λόγο της υπερπίεσης πόρων και προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha_{\text{ult}} = \varphi_{\text{crit}}(1 - r_u), \quad 1.24$$

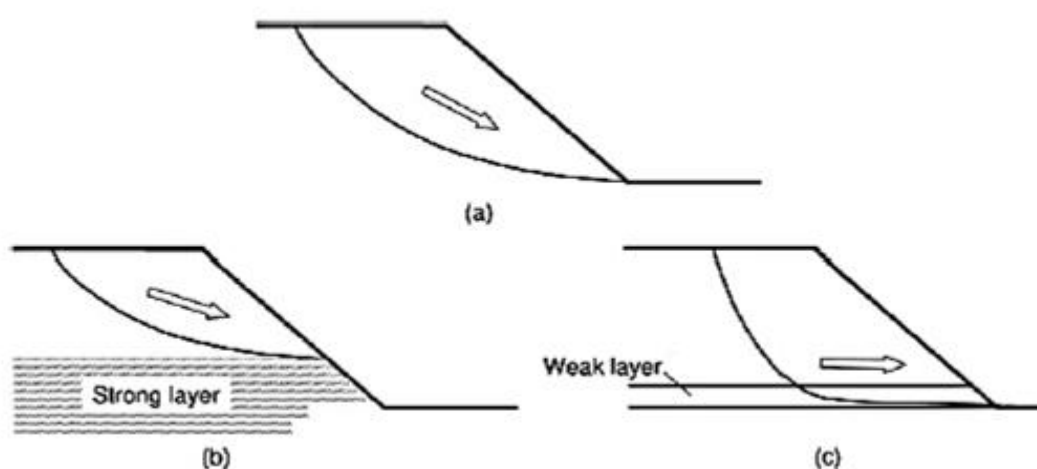
όπου,

r_u , ο λόγος της υπερπίεσης πόρων.

Η ανάλυση πρανούς απείρου μήκους ενδείκνυται για μεγάλου μήκους, ομοιόμορφα πρανή. Παρόλο αυτά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα πρανή δεν είναι εφικτό να θεωρούνται ιδανικά έχοντας μεγάλο μήκος και όντας ομοιόμορφα. Επιπλέον, είναι ύψιστης σημασίας η ανάλυση τοπικών αποσταθεροποιητικών παραγόντων, στην κορυφή ή ακόμη και στον πόδα του πρανούς. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες αφορούν παραδείγματος χάριν τις υποδομές για εξέδρες εξόρυξης ή

επιχώσεις για έναν υποθαλάσσιο αγωγό. Στις άνωθεν περιπτώσεις η προσέγγιση μέσω ανάλυση πρανούς απείρου μήκους δεν είναι ικανοποιητική και κρίνεται επιτακτική η χρήση της μεθόδου ανάλυσης αστοχίας βαθιού καθίσματος [6].

Όταν αστοχούν πρανή με επιφάνεια ολίσθησης με μεγάλο βάθος (εικόνα 10), το σύνηθες είναι να παρατηρείται ολίσθηση του πρανούς μέσω περιστροφικής κίνησης (περίπτωση a). Η εμφάνιση των συγκεκριμένων κυκλικών επιφανειών ολίσθησης γίνεται μέσω της ύπαρξης ομοιογενών ιζημάτων, ενώ όταν συνυπάρχουν μη ομογενή ιζήματα οι επιφάνειες ολίσθησης δεν είναι κυκλικές. Παρόλο αυτά, μια επιφάνεια αστοχίας είναι δυνατό να αποτελεί συνδυασμό επίπεδων αλλά και καμπύλων τμημάτων (σύνθετη ολίσθηση), εφόσον συνυπάρχουν στρώματα σκληρής αλλά και μαλακής φύσεως (περιπτώσεις b και c). Σημειώνεται ότι, στις περιπτώσεις βραχωδών υλικών οι επιφάνειες ολίσθησης είναι συνήθως επίπεδες (μεταθετικές ολισθήσεις).



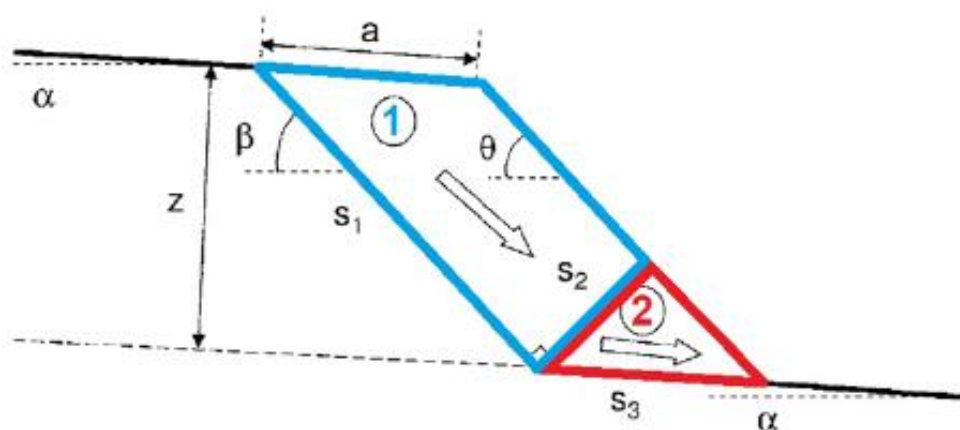
Εικόνα 10: Παρουσίαση των μηχανισμών αστοχίας πρανών με επιφάνεια ολίσθησης σημαντικού βάθους.[5']

Είναι σύνηθες για να αναλυθούν οι αστοχίες με μεγάλο βάθος να χρησιμοποιούνται μέθοδοι οριακής ισορροπίας, στις οποίες γίνεται η θεώρηση ότι η αστοχία πραγματοποιείται στο επίπεδο αστοχίας στην επιφάνεια και γίνεται σύγκριση της απαιτούμενης αντοχής διάτμησης για τη διατήρηση της ισορροπίας σε σχέση με τη απομένουσα διατμητική αντοχή των ιζημάτων επί του θαλάσσιου πυθμένα. Κατά

αυτό τον τρόπο δίνεται ένας συντηρητικός μέσος όρος του συντελεστή ασφαλείας στο επίπεδο της επιφάνειας αστοχίας [6].

Σε περίπτωση που το εδαφικό στρώμα επί της βάσης του πρανούς δεν είναι ισχυρό, συνηθίζεται η ανάλυση του μηχανισμού του εδαφικού μπλοκ (block mechanism analysis). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ένα πρανές αποτελεί συνδυασμό περισσοτέρων του ενός μπλοκ (σφήνες) εδάφους ή βράχου βρίσκει εφαρμογή η απλή μέθοδος των δύο σφήνων, του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI). Η εφαρμογή αυτή της μεθόδου ενδείκνυται κυρίως σε παλινδρομικές (retrogressive) κατολισθήσεις και κύριο προτέρημα της αποτελεί το γεγονός ότι είναι εύχρηστη και άμεση.

Η σφήνα 1 ονομάζεται πίσω ή ενεργή σφήνα (back wedge), ενώ η σφήνα 2 ονομάζεται σφήνα πόδα ή παθητική (toe wedge). Η κλίση του θαλάσσιου πυθμένα (α) προσδιορίζει την κλίση της βάσης του επιπέδου ολίσθησης της σφήνας 2 και είναι ισόποσα εκατέρωθεν του πρανούς. Η κλίση που ακολουθεί το πρανές (θ) μπορεί να είναι διαφορετική από την κλίση που ακολουθεί η γωνία β της σφήνας 1. Το επίπεδο που ολισθαίνει η σφήνα s_1 και το αντίστοιχο του s_2 τέμνονται σε κάθετο επίπεδο μεταξύ τους. Το κάθετο ύψος του πρανούς z ισούται με την απόσταση του πυθμένα από το παράλληλο επίπεδο στο επίπεδο που εδράζεται ο πόδας (εικόνα 11).



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού δύο σφήνων. [5']

Στην μέθοδο ισορροπίας δυνάμεων των δύο σφήνων οι κάθετες ενεργές δυνάμεις (N_1' , N_2' , N_3') εφαρμόζονται στη κάθετη διεύθυνση προς τα επίπεδα ολίσθησης, σε αντίθεση με τις διατμητικές δυνάμεις (S_1 , S_2 , S_3) που εφαρμόζονται παράλληλα των επιπέδων ολίσθησης (εικόνα 11). Επιπροσθέτως στο σχήμα γίνεται

απεικόνιση των ενεργών βαρών των δύο σφηνών W_1' , W_2' , W_3' και η παθητική πλευρική αντίσταση P που ασκείται στο πόδα του πρανούς.

Οι διατμητικές δυνάμεις S ισούνται βάσει της παρακάτω σχέσης με:

$$S = S_u S_i, \quad 1.25$$

όπου,

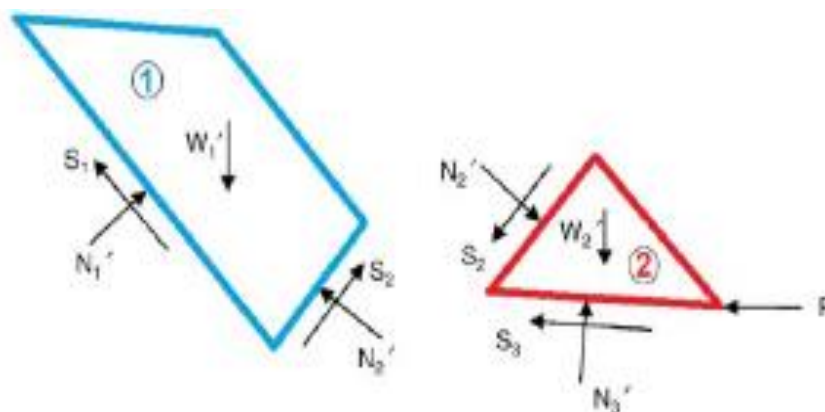
S_u , η διατμητική αντοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες,

S_i , το μήκος του επιπέδου ολίσθησης.

Εφόσον θεωρηθεί πως οι δύο σφήνες μοιράζονται τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας F , στη συνέχεια ο υπολογισμός αυτού γίνεται μέσω της επίλυσης της παρακάτω εξίσωσης:

$$F = \frac{S_1^{max} + S_2^{max} \sin(\beta - \alpha) + S_3^{max} \cos(\beta - \alpha) + P \cos \alpha}{W_1' \sin \alpha + W_2' \sin \beta \cos(\beta - \alpha)}. \quad 1.26$$

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι κάθετες ενεργές δυνάμεις δεν ενυπάρχουν στην εξίσωση 1.26, καθώς αλληλοαναιρούνται (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των δύο σφηνών. [5']

Όταν η κλίση του πρανούς θ ισούται με την γωνία β της σφήνας 1, τότε τίθενται σε ισχύ οι παρακάτω σχέσεις:

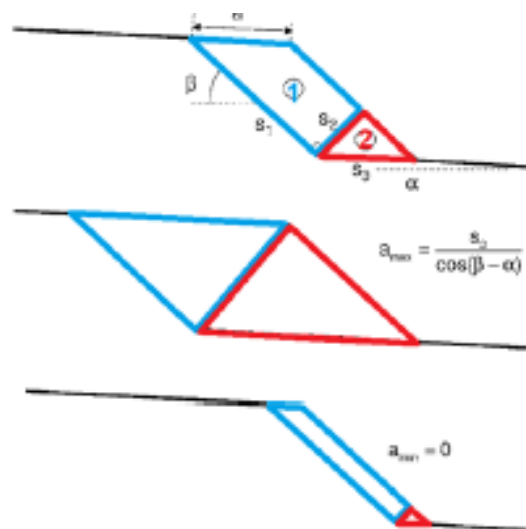
$$S_1 = \alpha , \quad 1.27$$

$$S_2 = \alpha \sin (\beta - \alpha) , \quad 1.28$$

$$S_3 = \frac{z}{\sin (\beta - \alpha)} , \quad 1.29$$

$$A_1 = \frac{S_2^2}{2 \tan (\beta - \alpha)} . \quad 1.30$$

Τέλος, ο μηχανισμός των δύο σφηνών εμπεριέχεται εντός ορισμένων ορίων, που είναι αναγκαία λόγω των κινηματικών περιορισμών (εικόνα 13).



Εικόνα 13: Απεικόνιση των ορίων των μηχανισμών των δύο σφηνών. [5']

1.3 Ο θαλάσσιος πυθμένας

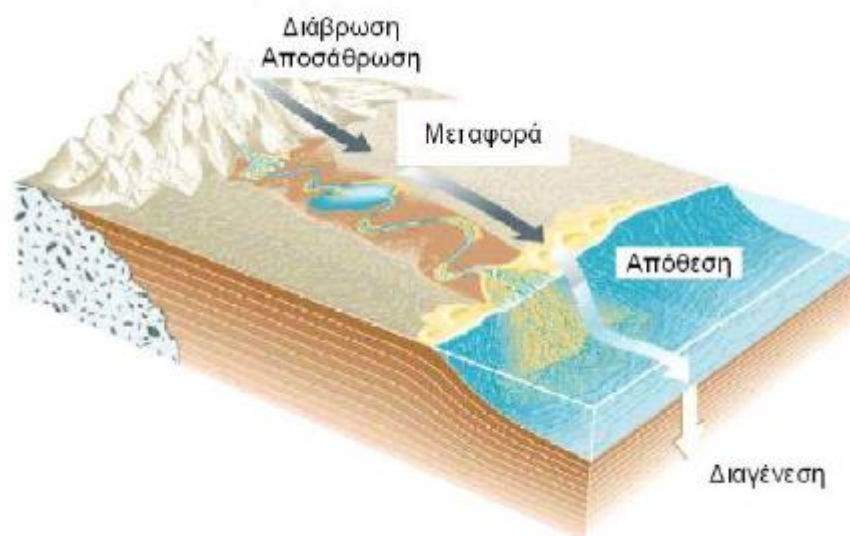
Στην περίπτωση που ο υδάτινος όγκος που καλύπτει την Γη αποσπάται εξολοκλήρου της υδρόγειου σφαίρας, τότε θα γινόταν η αποκάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα, ο οποίος θα είχε εντελώς διαφορετική μορφή από το γνώριμο τοπίο που είναι συνηθισμένο εντός της ηπειρωτικής επιφάνειας του πλανήτη. Η πρώτη παρατήρηση που θα έκανε ο καθένας είναι ένα τοπίο με ήπιες κλίσεις, με εκτεταμένες επίπεδες επιφάνειες, ενώ σε τοπική κλίμακα θα γινόταν εμφάνιση κλίσεων μεγαλύτερων των 5 μοιρών. Μοναδική διαφοροποίηση θα επικρατούσε εντός των ορίων των λιθοσφαιρικών πλακών στις οποίες θα γινόταν παρατήρηση εντονότατων διακυμάνσεων της μορφολογίας του πυθμένα με έντονες κλίσεις και υψηλά βάθη. Ο θαλάσσιος πυθμένας θα εμφάνιζε μία πληθώρα κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων, λόγω της διαδικασίας της απόθεσης φερτών υλικών από χερσαία εδάφη και της συνεπακόλουθης γένεσης ιζημάτων [1].

Ιζηματογενή πετρώματα είναι αυτά που δημιουργούνται από την απόθεση (ή καταβύθιση) υλικών που βρίσκονται σε φάση αιώρησης ή διάλυσης εντός ενός ρευστού μέσου (νερό ή αέρα) και η επακόλουθη πυκνότερη συγκέντρωση των αποτιθέμενων υλικών. Κοινό γνώρισμα τους είναι η διάστρωση των επί μέρους γεωυλικών σε διαδοχικά επίπεδα που βρίσκονται εντός των ιζημάτων,. Για να δημιουργηθούν τα ιζηματογενή πετρώματα συμβαίνουν οι παρακάτω διεργασίες [B]:

- Διάβρωση και αποσάθρωση, όντας οι διεργασίες φυσικοχημικής και βιολογικής φύσεως που λαμβάνουν χώρα στα ήδη υπάρχοντα πετρώματα με συνέπεια τη σταδιακή αποδόμησή τους.
- Τα υλικά που προκύπτουν μεταφέρονται μέσω της αποσάθρωσης, , μέσω του ανέμου και του νερού των ποτάμιων και θαλάσσιων συστημάτων.
- Ακολουθεί η απόθεση των υλικών τα οποία είναι σε φάση αιώρησης ή διάλυσης. Η διαδικασία της απόθεσης συμβαίνει εντός διαδοχικών στρωμάτων.

- Ακολουθεί η διαγένεση, που αποτελεί την διαδικασία κατά την οποία συμβαίνει μετατροπή ενός χαλαρού ιζηματος σε συμπαγές πέτρωμα, μέσω της πίεσης που εφαρμόζουν τα υπερκείμενα υπερκείμενων στρωμάτων και της έλξης που ασκεί η φυσικής συνδετική ύλη.

Στην εικόνα 14 φαίνεται ο τρόπος σχηματισμού των ιζηματογενών πετρωμάτων ενώ στην εικόνα 15 γίνεται απεικόνιση των ωκεάνιων πυθμένων με τη υπόθεση ότι έχει γίνει αφαίρεση του υδάτινου όγκου των θαλάσσιων συστημάτων.



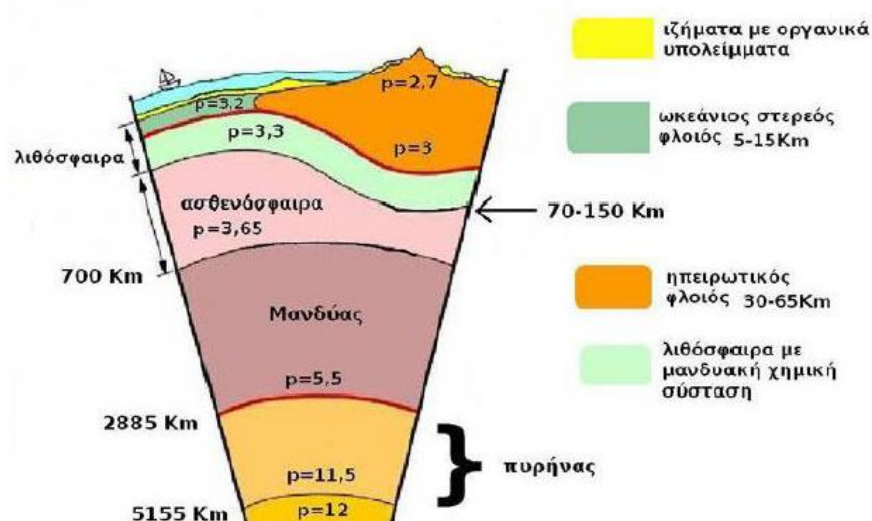
Εικόνα 14: Ο τρόπος σχηματισμού των ιζηματογενών πετρωμάτων.[7']



Εικόνα 15: Οι ωκεάνιοι πυθμένες με την υπόθεση αφαίρεσης του υδάτινου όγκου.[8']

1.4 Περιγραφή του θαλάσσιου πυθμένα - Βαθυμετρικά χαρακτηριστικά

Ο γήινος φλοιός, ως μέρος της λιθόσφαιρας, διαχωρίζεται σε 2 είδη, τον ωκεάνιο φλοιό με πάχος διακύμανσης από 5 έως 15 km και τον ηπειρωτικό φλοιό με ιδιαίτερα ανομοιόμορφο πάχος διακύμανσης από 30 έως 65 km. Στην εικόνα 16 γίνεται απεικόνιση της δομής αλλά και της σύστασης του γήινου φλοιού.



Εικόνα 16: Απεικόνιση της δομής και της σύστασης του γήινου φλοιού. [9']

Ο θαλάσσιος πυθμένας διαχωρίζεται στα παρακάτω βασικά τμήματα:

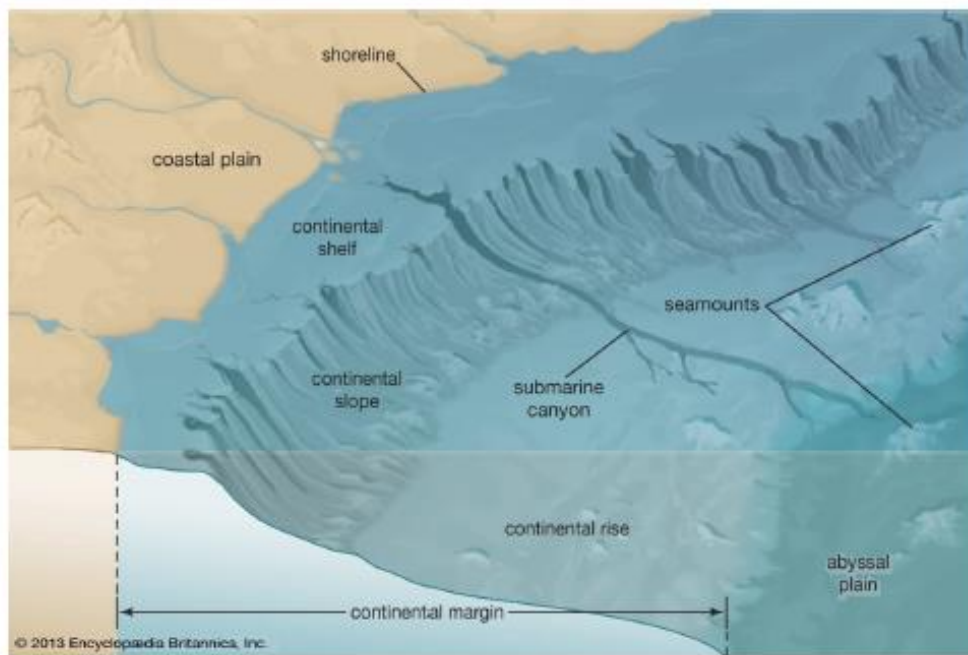
- Ηπειρωτική κρηπίδα ή υφαλοκρηπίδα, αποτελεί η ζώνη σε κοντινό σημείο μιας ηπειρωτικής γης με έκταση από την κατώτατη στάθμη παλίρροιας μέχρι το βάθος στο οποίο διακρίνεται σημαντική επαύξηση της κλίσης του θαλάσσιου πυθμένα, το ευρέως γνωστό ως ηπειρωτικό κενό, προς σημαντικότερα βάθη.
- Ηπειρωτική κατωφέρεια ή υφαλοπρανές, αποτελεί το κατηφορικό τμήμα από το ακρότατο της υφαλοκρηπίδας έως σε πιο μεγάλα βάθη. Το γνώρισμα που την διακρίνει είναι η απότομη κλίση.
- Ηπειρωτική ανύψωση, αποτελεί η περιοχή που ακολουθεί την ηπειρωτική κατωφέρεια, όντας μία περιοχή μετάβασης με πιο ήπιες κλίσεις από το υφαλοπρανές, που οφείλεται στην απόθεση υλικών δια των κώνων (χαραδρών).
- Ωκεάνιες λεκάνες, όντας βυθίσματα που συναντώνται στον θαλάσσιο πυθμένα.

Στις ωκεάνιες λεκάνες παρατηρούνται οι εξής γεωμορφολογικές δομές:

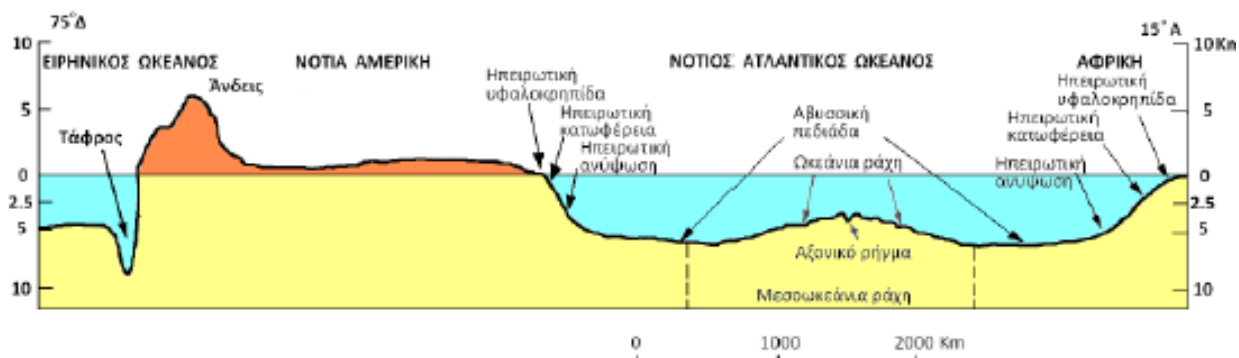
- Αβυσσικά πεδία, που αποτελούν ομαλές έως και επίπεδες περιοχές με ανεπαίσθητη ή και με απουσία κλίσης.
- Θαλάσσια όρη και αβυσσικοί λόφοι, που αποτελούν μεμονωμένους όγκους που προεξέχουν από τον θαλάσσιο πυθμένα.
- Τάφροι, που αποτελούν στενόμακρα, με απότομη κλίση, βυθίσματα τα οποία έχουν ως γενεσιουργό αιτία την ολίσθηση μιας ωκεάνιας πλάκας κάτω από μια ηπειρωτική κατωφέρεια ή και αντιστρόφως.
- Μέσο-ωκεάνιες ράχες, που αποτελούν τμήματα υποθαλάσσιων οροσειρών τεκτονικού τύπου. Εξαιτίας της εκτεταμένης ηφαιστειογενούς δράσης που ασκούν διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο τόσο στην επέκταση των ωκεάνιων πλακών όσο και στην δημιουργία περιθωρίων Ατλαντικού τύπου.
- Εγκάρσιες ράχες (sills), που αποτελούν το πλέον χαμηλό τμήμα μιας ράχης που διαχωρίζει δύο θαλάσσιες λεκάνες μεταξύ τους ή μία θαλάσσια λεκάνη

από τον γειτονικό ωκεάνιο πυθμένα. Αυτές οι δομές λειτουργούν ως φυσικής προέλευσης θαλάσσια φράγματα που μειώνουν σημαντικά την κινητικότητα του νερού ανάμεσα από τις θαλάσσιες λεκάνες.

- Τραπεζοειδή Όρη (Guyots), που αποτελούν υποθαλάσσια όρη και νησιά, κυρίως ηφαιστειακής προέλευσης και προκύπτουν από το μάγμα των ρηξιγενών ζωνών (μεσοωκεάνειες ράχες). Με το πέρασμα του χρόνου παρατηρείται απομάκρυνση από τις μεσοωκεάνειες ράχες και κατά την διάρκεια της μετακίνησης στην ωκεάνια λιθοσφαιρική πλάκα, βυθίζονται στο επίπεδο της ασθενόσφαιρας. Η μορφολογία τους συσχετίζεται κυρίως με την δράση των θαλάσσιων κυματισμών.
- Ατόλεις, οι οποίες χαράσσουν την ίδια διαδρομή με τα υποθαλάσσια όρη και νησιά, με την διαφορά ότι συναντώνται εντός περιοχών με δυνατότητα ανάπτυξης κοραλλιών.



Εικόνα 17: Εκτενής παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών (αβυσσικό πεδίο, θαλάσσια όρη, υποθαλάσσιο κάνυον, ηπειρωτική κατωφέρεια, παράκτια πεδιάδα, ακτογραμμή, ηπειρωτική κατωφέρεια) ενός τυπικού θαλάσσιου πυθμένα.[10']



Εικόνα 18: Χαρακτηριστικά της βαθυμετρίας και της υψομετρίας του γήινου φλοιού.[11']



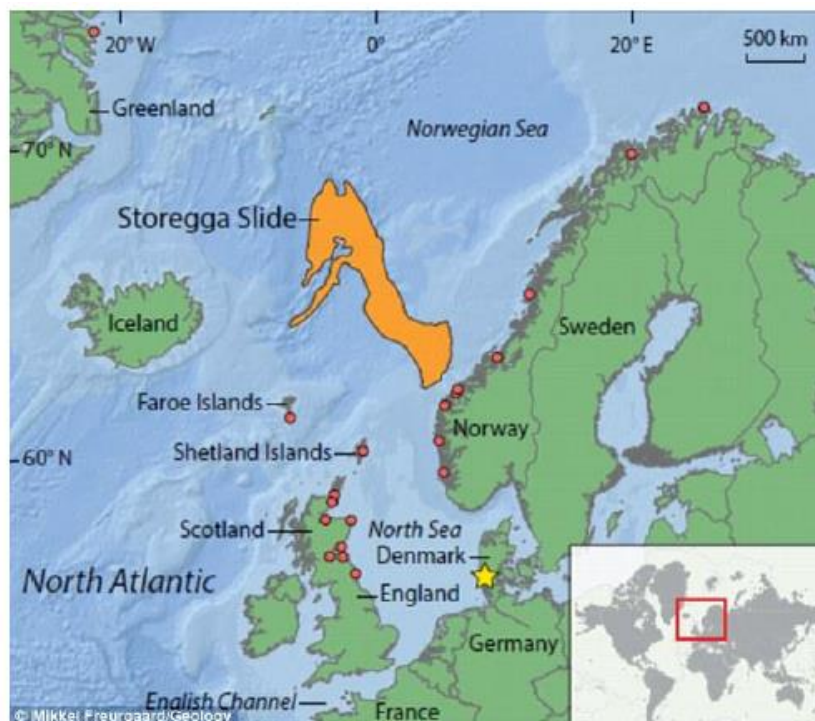
Εικόνα 19: Τοπογραφική τομή με απεικόνιση λεπτομερειών για τα ενεργητικά και παθητικά περιθώρια.[12']

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα γίνει ανάλυση των σημαντικότερων καταγεγραμμένων υποθαλάσσιων κατολισθήσεων σε παγκόσμια κλίμακα. Επιπροσθέτως θα γίνει εκτενής παρουσίαση μελετών και αναφορών σχετιζόμενων με τα κύρια γνωρίσματα τους, αλλά και των λόγων ενεργοποίησης τους [2].

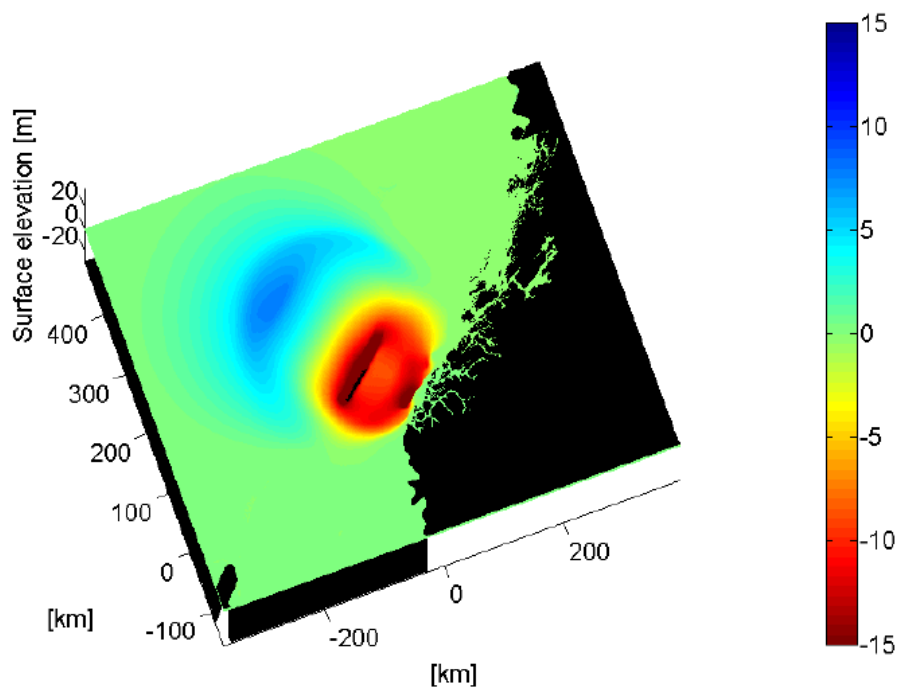
2.1 Κατολίσθηση Storrega

Η κατολίσθηση που προκλήθηκε στην περιοχή Storegga, αποτελεί την πλέον αναλυμένη υποθαλάσσια κατολίσθηση σε παγκόσμια κλίμακα (εικόνα 20). Προκλήθηκε περίπου πριν 8 χιλιετίες στις ακτές της Νορβηγίας, στο σημείο το οποίο γίνεται το συναπάντημα του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού με τον Αρκτικό Ωκεανό. Τα ιδιαίτερα γνωρίσματα που την διέπουν, έχουν ως αποτέλεσμα να θεωρείται αξιοπρόσεκτη στον τομέα της.

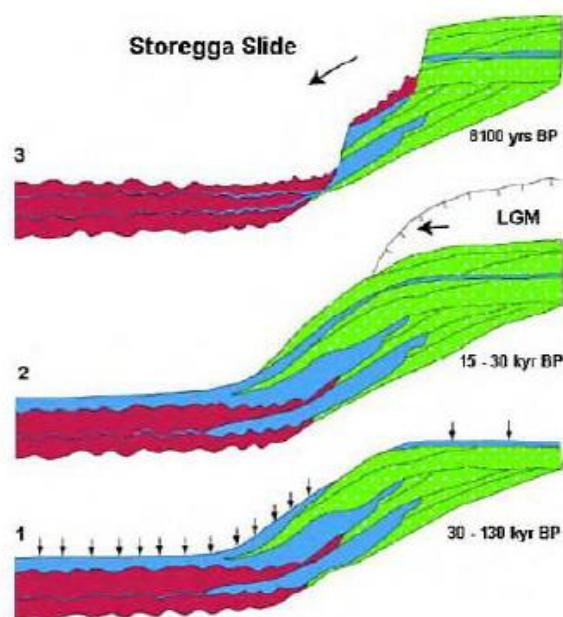


Εικόνα 20: Η γεωγραφική θέση της κατολίσθησης στην περιοχή Storrega.[13']

Πιο συγκεκριμένα, η κατολίσθηση πραγματοποιήθηκε σε πυθμένα με κλίση μόλις 1° , ενώ η έκταση που καλύφθηκε αγγίζει τα 9500 km^2 , και συνεπακόλουθα ο όγκος του υλικού που μεταφέρθηκε πλησίασε στα 3300 km^3 . Εκτιμάται ότι το βάθος που προκλήθηκε κυμαίνεται μεταξύ 850-1100 m, ενώ η απόσταση τελειώματος L, ισούταν με 810 km και η κατακόρυφη απόσταση H, ισούταν με 310 km. Ο λόγος L/H είναι ίσος με $810/310=2.61$. Εντός της περιοχής υπάρχουν σημαντικά κοιτάσματα φυσικού αερίου, ενώ βάσει μελετών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κατολίσθηση είχε ως συνέπεια ένα τσουνάμι τεραστίων διαστάσεων.

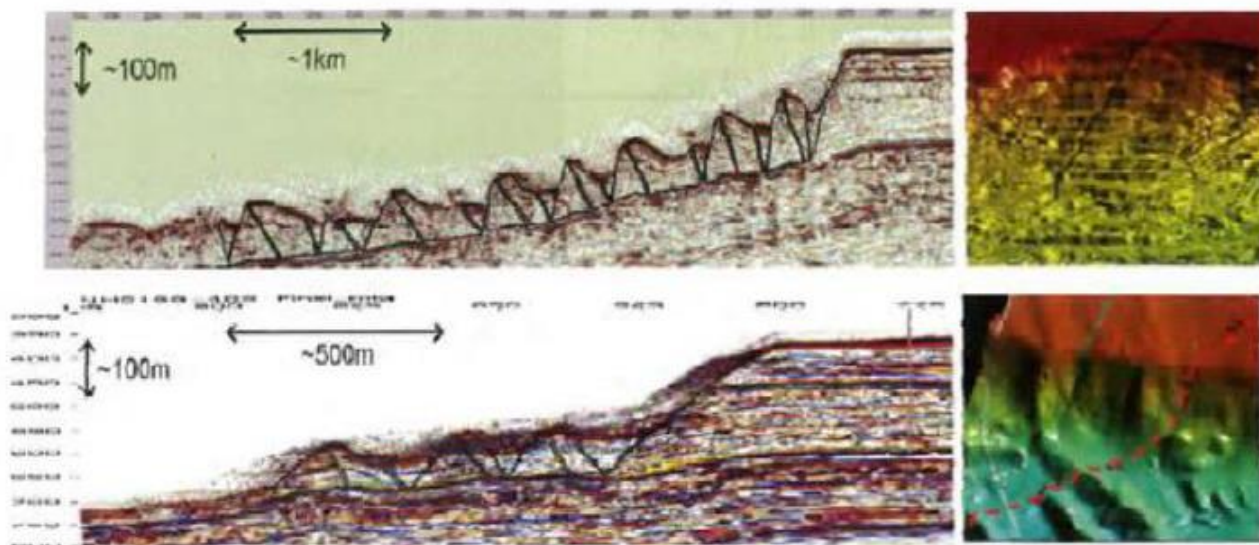


Εικόνα 21: Παρουσίαση της ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης εξαιτίας της κατολίσθησης Storrega.[14']



Εικόνα 22: Με λαχανί απόχρωση, αποτυπώνονται οι παγετώδεις αποθέσεις, ενώ με την κόκκινη απόχρωση η κατολισθαίνουσα μάζα και με τα γαλανά οι θαλάσσιες αποθέσεις.[15’]

Οι κύριοι λόγοι εκδήλωσης της συγκεκριμένης κατολίσθησης, κατατάσσονται ως παρακάτω: σεισμογενής δραστηριότητα μεγάλης έντασης, οδήγησε σε αστοχία των απότομων πρανών του θαλάσσιου πυθμένα. Η διάδοση της αστοχίας έγινε οπισθοδρομικώς (εικόνα 23), προς το ψηλότερο τμήμα του πρανούς, παρά το γεγονός ότι η κλίση ήταν ανεπαίσθητη (μέση κλίση 0.7°). Το γεγονός αυτό προκλήθηκε λόγω της ταχείας εναπόθεσης ιζημάτων, προελεύσεως της περιόδου των παγετώνων, που είχαν συντελέσει στην αύξηση σε μέγιστο βαθμό της πίεσης του νερού των πόρων. Συνεπακόλουθα, η προαναφερόμενη κατάσταση σε συνδυασμό με το γεγονός ότι αποδεσμεύτηκαν ένυδρα αέρια από το υπέδαφος αλλά και την πιθανή σταδιακή χαλάρωση του εδάφους, είχαν ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση της ολικής αστοχίας.



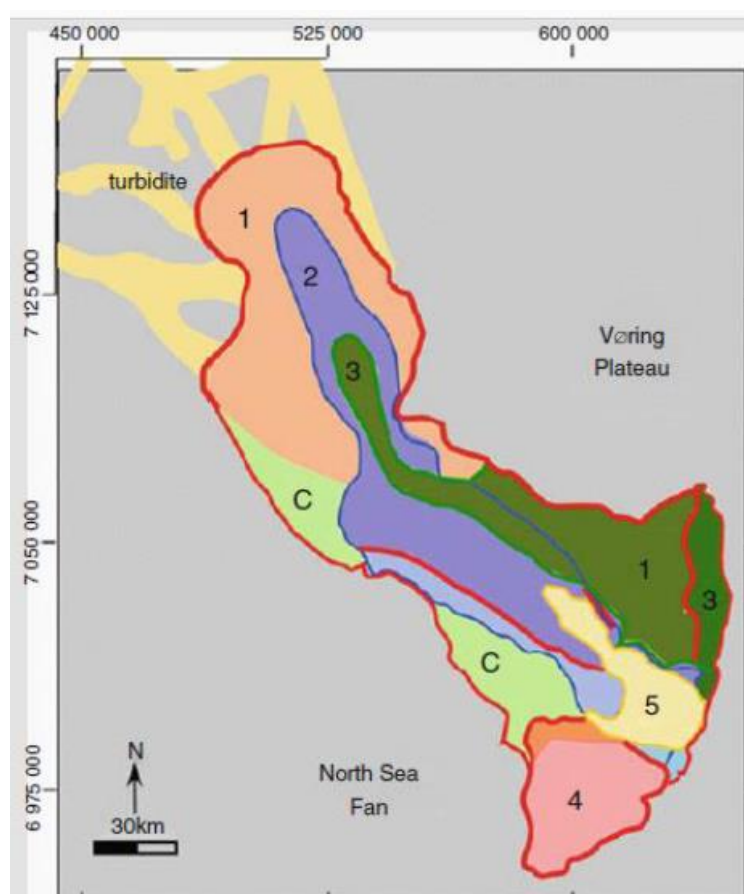
Εικόνα 23: Απεικόνιση της οπισθοδρομικής εξέλιξης της κατολίσθησης Storrega στο υψηλότερο τμήμα της ολισθαίνουσας επιφάνειας.[16’]

Τα θαλάσσια ιζήματα παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση αργίλου, διαθέτουν 50-60% περιεκτικότητα αργίλου, εν συγκρίσει των παγετώδων ιζημάτων που παρουσιάζουν 25-35% περιεκτικότητα σε άργιλο. Τα ίχνη συγκέντρωσης θαλάσσιας αργίλου οδήγησαν στην αύξηση της πίεσης των πόρων στη διάρκεια ταχείας ιζηματογένεσης κατά τις παγετώδεις περιόδους. Προς κατανόηση του μεγέθους της υπερπίεσης που δημιουργήθηκε στο συγκεκριμένο γεγονός κατολίσθησης, ενδεικτικές είναι οι μετρήσεις πλησίον της περιοχής, όπου παρατηρήθηκαν πιέσεις του νερού των πόρων 20% μεγαλύτερες της πίεσης λόγω υδροστατικών συνθηκών. Λαμβάνοντας κατά νου και την υπερευαισθησία της θαλάσσιας αργίλου αλλά και την αστάθεια που προκαλεί, άπτεται της λογικής ότι η κατολίσθηση Storegga είχε την εξέλιξη ενός από των μεγαλύτερων κατολισθητικών γεγονότων παγκοσμίως.

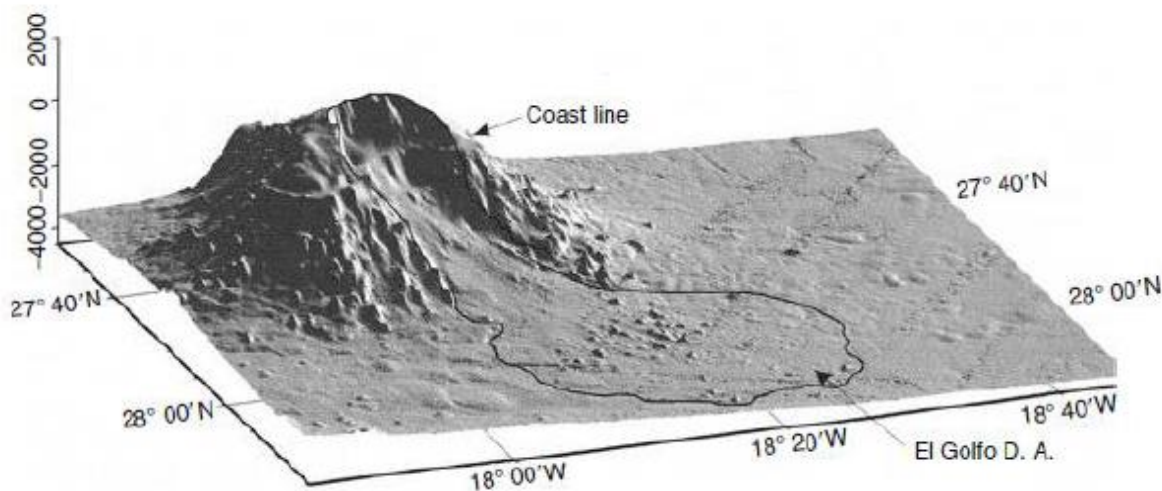
Το άκρως επικρατέστερο σενάριο ενεργοποίησης της κατολίσθησης είναι η υψηλής έντασης σεισμογενής δραστηριότητα στη διάρκεια της απόψυξης. Η αστοχία προκλήθηκε κατά μήκος ενός εκ των ασθενέστερων στρωμάτων της θαλάσσιας αργίλου. Η κατολίσθηση πραγματοποιήθηκε σταδιακά σε πλήθος φάσεων, και επίσης είναι αξιοσημείωτο ότι κινήθηκε και οπισθοδομικά. Η πρώτη και σημαντικότερη φάση της κατολίσθησης άγγιξε τη μέγιστη απόσταση των 400-450 km. Ακολούθησαν

οι επόμενες φάσεις που θα μπορούσαν να προσομοιωθούν με ένα σμήνος από μικρότερους λωβούς, όμοιων εκείνων εντός της περιοχής Omen Lange, . Η ροή των κορημάτων των λοβών, έχει, συγκριτικά με την πρώτη φάση, πιο μικρό μήκος τελειώματος, που ισούται με 10-15 km.

Προφανώς οι ακολουθούμενες κατολισθήσεις παρουσίασαν υψηλή διακύμανση στην ένταση τους. Τα μεγάλα βάθους ιζήματα παγετώδους αργίλου παρουσιάζουν πιο υψηλή διατμητική αντοχή λόγω συμπίεσης, (περιοχή C / εικόνα 24). Καθίσταται προφανές, ότι σε εκείνη την περιοχή εξαιτίας της έντονης συμπίεσότητας των εδαφικών στρωμάτων και της ισχνής κλίσης που παρουσιάζει ο θαλάσσιος πυθμένας, ότι η κινητικότητα της κατολίσθησης μειώνεται σε σημαντικό βαθμό. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται μία τυπική όδευση κατολίσθησης στα Κανάρια Νησιά , ώστε να τεθεί ως μέτρο σύγκρισης με το μέγεθος της κατολίσθησης Storrega.



Εικόνα 24: Κατολίσθηση Storegga. Οι αριθμοί από 1 έως 5 παρουσιάζουν διαφορετικά στάδια της κατολίσθησης. Ο συμβολισμός C, αφορά την συμπιεσμένη ζώνη.[17’]



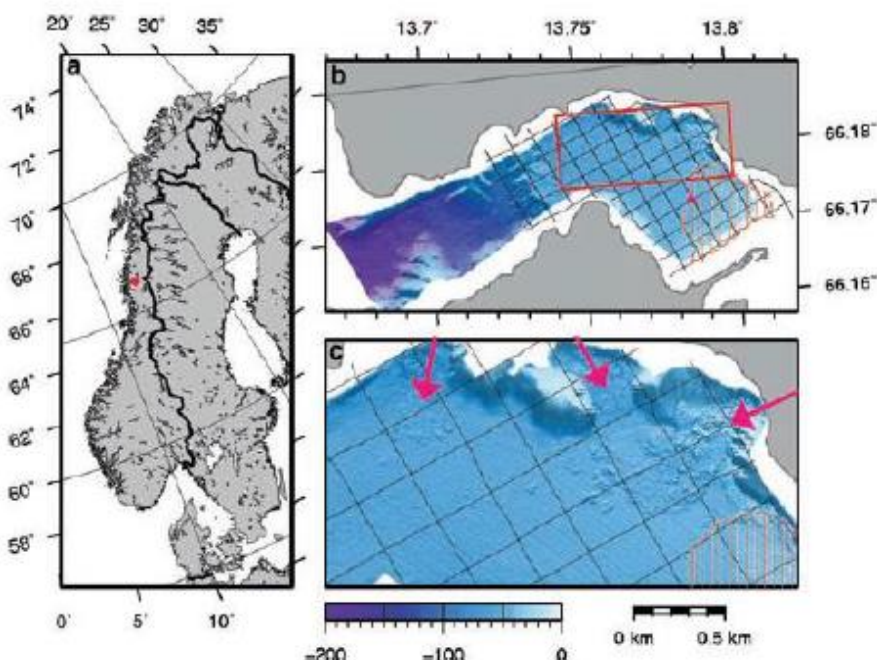
Εικόνα 25: Τυπική όδευση της κατολίσθησης στη περιοχή των Κανάριων Νησιών.[18']

2.2 Κατολίσθηση Finneidfjord

Ήταν Ιούνιος του 1966, όταν συνέβη μια κατολίσθηση με πλήθος φάσεων που η έναρξη έγινε κάτω από την θάλασσα και συνεχίστηκε οπισθοδρομικά πάνω στην στεριά, προκαλώντας δυσμενείς συνέπειες στη περιοχή Finneidfjord της Νορβηγίας (εικόνα 26). Η προαναφερθείσα περιοχή είναι γνώριμη για τα κατολισθητικά φαινόμενα που παρουσιάζει, που έχουν ως κύριο παράγοντα ενεργοποίησης τις τεταρτογενείς ευαίσθητες αποθέσεις της. Η συγκεκριμένη κατολίσθηση, είχε ως αποτέλεσμα την κινητοποίηση ενός εκατομμυρίου κυβικών μέτρων ιζήματος, και είναι υπεύθυνη για την πρόκληση τεσσάρων ανθρώπινων απωλειών και πληθώρας υλικοτεχνικών ζημιών. Η κατολίσθηση διαδραματίστηκε κλιμακωτά σε πέντε φάσεις, που παρουσιάζονται στην εικόνα 26, με το αρχικό στάδιο να προκαλείται στο πιο απόκρημνο πρανές, όπως απεικονίζει ο βαθυμετρικός χάρτης αλλά και σχετικές μαρτυρίες της εποχής.

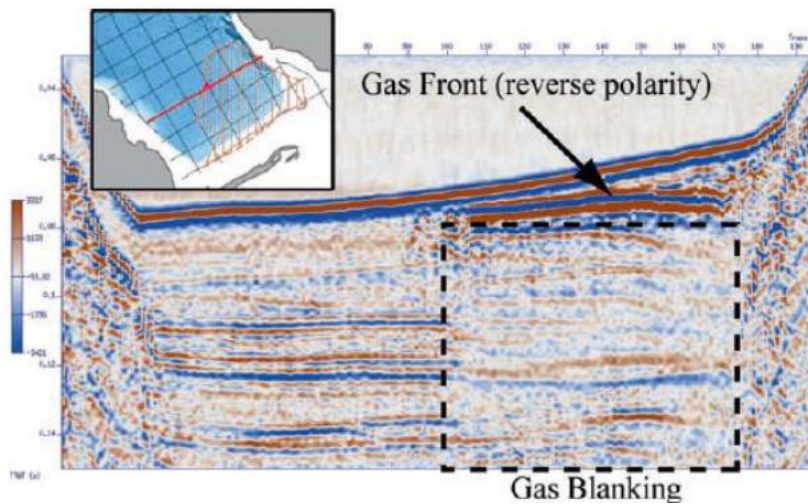
Η αρχική αστοχία προκλήθηκε σε ιλυώδη άργιλο τεταρτογενούς αποθέσεως, αλλά οι επόμενες φάσεις περιείχαν ως ίζημα μαλακή ευαίσθητη άργιλο παγετώδους

περιόδου. Άλλες συνθήκες που έπαιξαν ρόλο στη πρόκληση της αστοχίας, είναι η συνεχιζόμενη αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων εξαιτίας της υπερσυγκέντρωσης ελεύθερων αερίων, η διαρροή υπόγειου ύδατους, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες κατασκευής υποδομών και μια απροσδόκητη αύξηση της πίεσης των πόρων του παράκτιου εδάφους, εξαιτίας επιχώσεων στα παραλία πλησίον της περιοχής. Σεισμικές αναλύσεις έδειξαν ότι υπάρχει ιστορικό αστοχίας πρανών στην περιοχή που φτάνει πίσω στην μεσοπαγετώδη περίοδο, και συνεπακόλουθα υπάρχει ισχυρή πιθανότητα να διαδραματιστούν παρεμφερή φαινόμενα αστοχίας και μελλοντικά, έχοντας υπόψιν το γεγονός σημείωσης παρόμοιων φαινομένων τις περασμένες δεκαετίες [2].

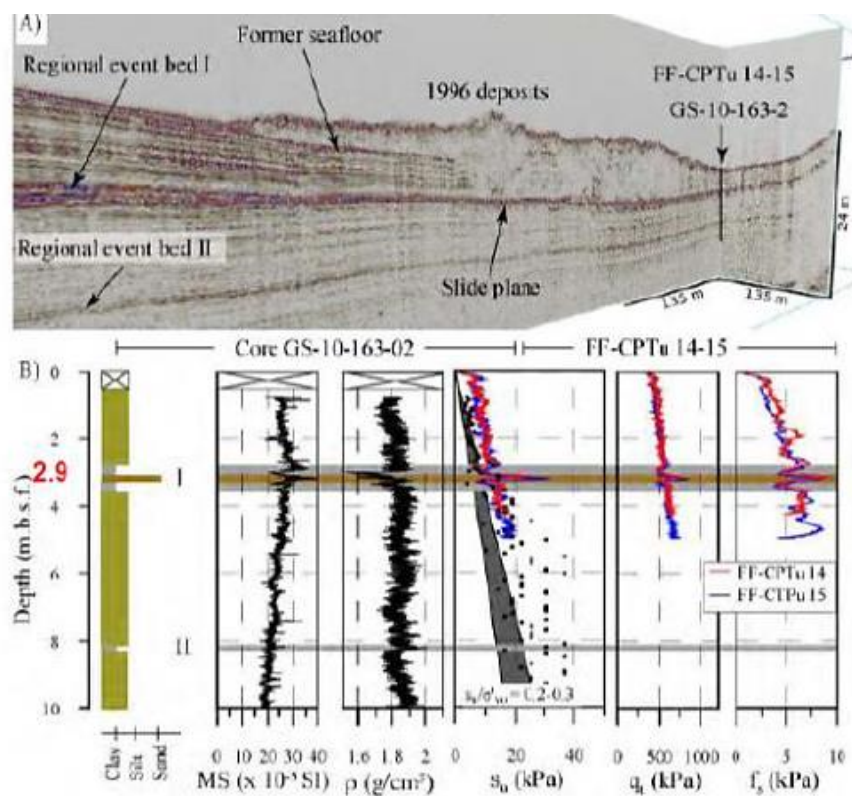


Εικόνα 26: Απεικόνιση των βαθυμετρικών γνωρισμάτων ενδείξεων παλαιότερων ολισθήσεων της περιοχής Finneidfjord. [16']

Οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στο να ενεργοποιηθεί αυτή η κατολίσθηση, αναγράφονται παρακάτω ως εξής: Η προοδευτική συγκέντρωση ελεύθερου αερίου στο ρηχό τμήμα του θαλάσσιου πυθμένα, όπως δείχνουν τα ευρήματα της σεισμική ανάλυσης, υπήρξε ο καθοριστικότερος παράγοντας στο να ενεργοποιηθεί και να εξελιχθεί η κατολίσθηση.(εικόνες 27,28).

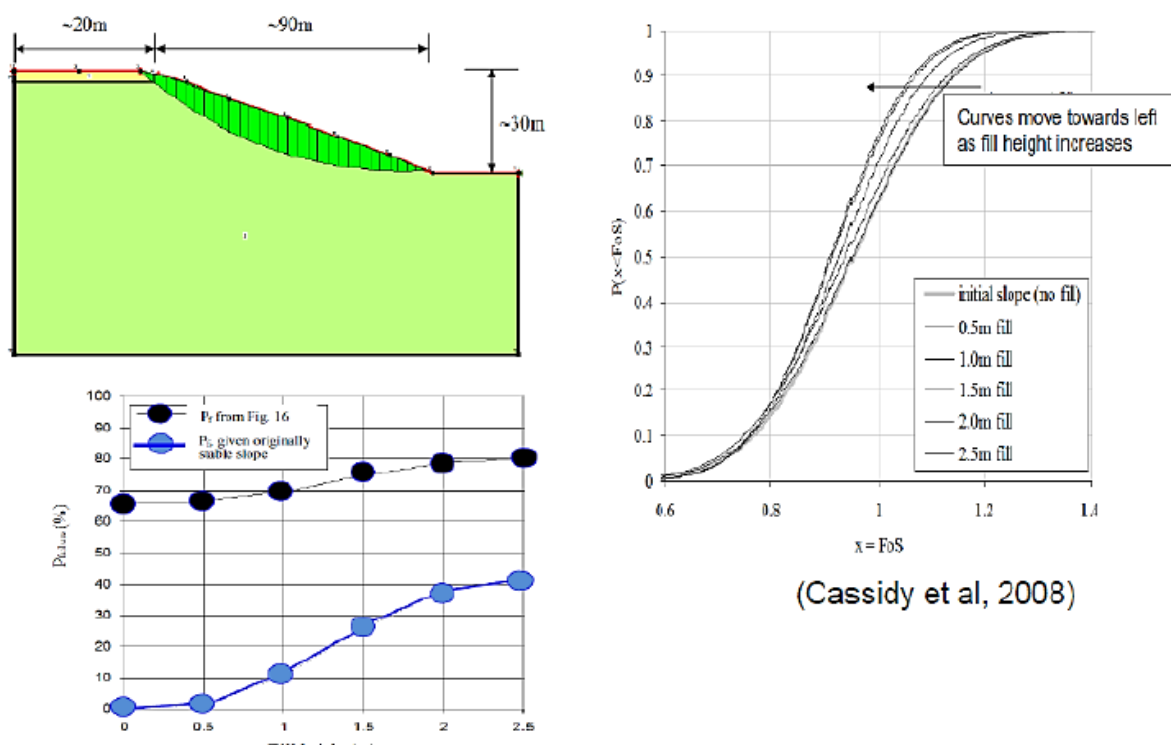


Εικόνα 27: Απεικόνιση του σεισμικού προφίλ της ζώνης ελεύθερου αερίου. Το αέριο εμφανίζεται ως αντανάκλαση, ανεστραμμένης πολικότητας. [16']

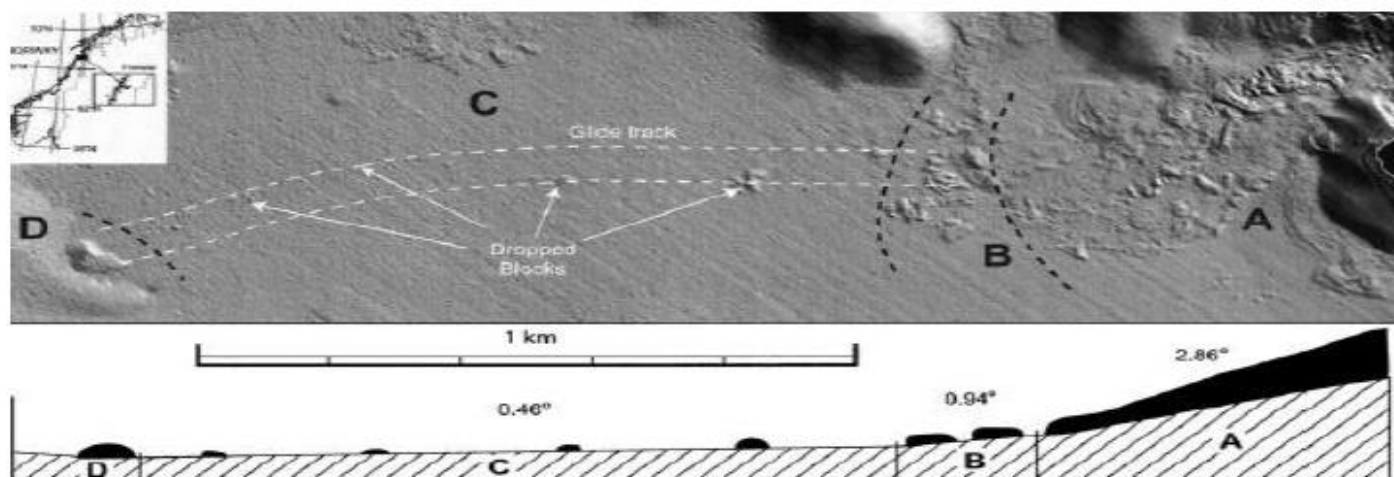


Εικόνα 28: Ανάλυση του σεισμικού προφίλ της κατολίσθησης Finneidfjord. [14']

Ειδικότερα, η ελάχιστη υπερπίεση του νερού των πόρων που εν δυνάμει οδηγεί σε ενεργοποίηση της αστοχίας, ισούται περίπου με 5 kPa. Ευρήματα μελετών έδειξαν ότι στα πλέον ρηχά τμήματα των υποθαλάσσιων πρανών, υπήρξε ανάπτυξη πιέσεων που ξεπερνούσαν την παραπάνω τιμή, ενώ στα βαθύτερα τμήματα των πρανών οι πιέσεις έφταναν, το πολύ, την τιμή των 3.3 kPa. Εντωμεταξύ, οι στρώσεις αργίλου με χαμηλή διατμητική αντοχή, έπαιξαν σημαίνοντα ρόλο στο να εξελιχθεί οπισθοδρομικά η κατολίσθηση, και παράλληλα ο συνδυασμός επιχώσεων και λοιπών ανθρωπογενών παρεμβάσεων (π.χ. εκρήξεις) οδήγησαν στην ενεργοποίηση της κατολίσθησης (εικόνα 29). Αποτελεί άξιο αναφοράς το γεγονός ότι οι κύριες φάσεις της κατολίσθησης συμπεριέλαβαν αρχικά μία κίνηση εδάφους που προκάλεσε μεταφορά ιζημάτων και στη συνέχεια μια εδαφική ροή, αφού η στέψη της κινήθηκε προς την ακτή και μακρύτερα αυτής.



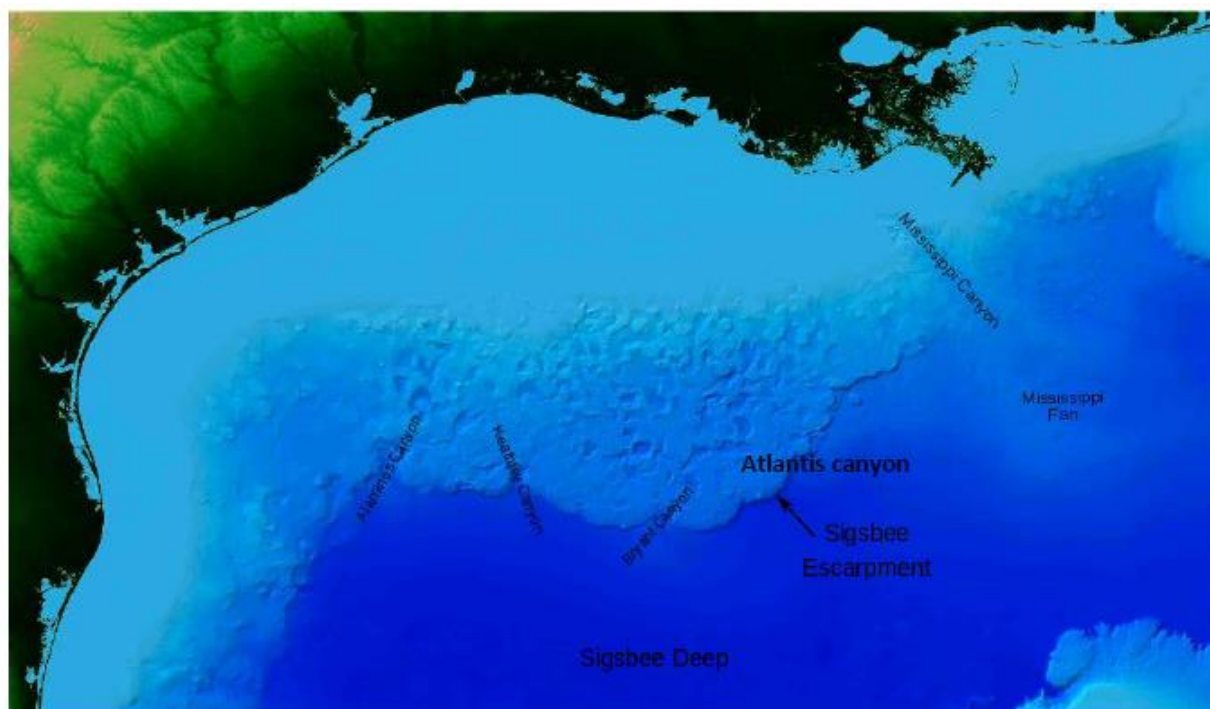
Εικόνα 29: Ανάλυση της εδαφικής αστοχίας, το πρανές ήταν οριακά ευσταθές με $FOS=0.95$, πριν την τοποθέτηση του επιχώματος. Ενώ το ύψος της επίχωσης βαίνει αυξανόμενο, παρατηρείται μετατόπιση των καμπυλών προς τα αριστερά, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του FOS . [14']



Εικόνα 30: Εξελικτική φάση της κατολίσθησης Finneidfjord από το σημείο A προς το σημείο D. [15']

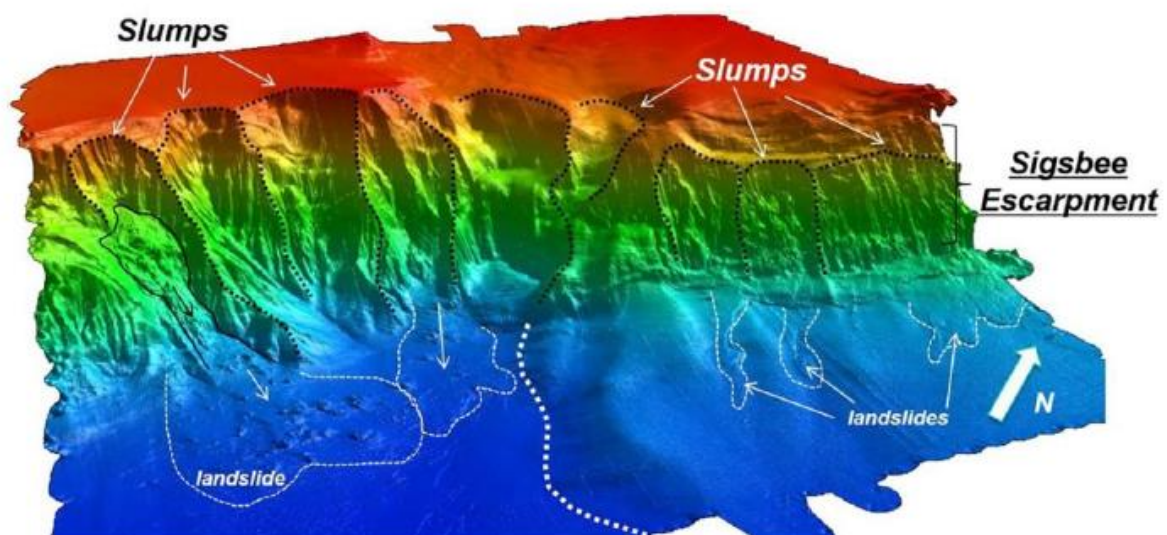
2.3 Κατολίσθηση στο Κόλπο του Μεξικού – Χαράδρα Sigsbee

Η χαράδρα του Sigsbee, στη περιοχή του Κόλπου του Μεξικού και πιο συγκεκριμένα οι περιοχές Atlantis και Mad Dog, αποτελούν σημεία στα οποία έχουν σημειωθεί πλήθος από αστοχίες σε θαλάσσια πρηνή, οι οποίες μετεξελίχθηκαν σε ροές κορημάτων. Στην εικόνα 31 απεικονίζεται η περιοχή της χαράδρας Sigsbee, με το κάνυον Atlantis, όπου συναντάται ροή τουρβιδιτικών ρευμάτων υψηλής έντασης.



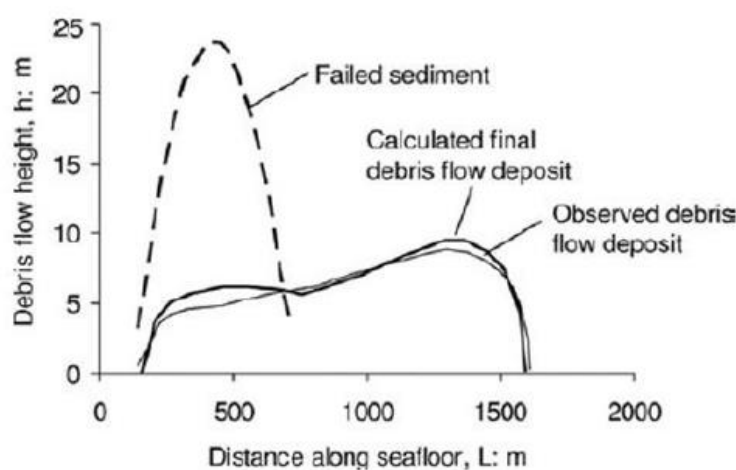
Εικόνα 31: Απεικόνιση της περιοχής πλησίον της χαράδρας Sigsbee. [18']

Μέσω της χρήσης τεχνικών σχετιζομένων με την επιστήμη της γεωφυσικής αλλά και μέσω ηχοεικονικών καταγραφών από τηλεχειριζόμενα υποθαλάσσια οχήματα (ROVs), έγινε χαρτογράφηση διάφορων ιζηματογενών αποθέσεων που ήταν αποτέλεσμα πρόκλησης βαρυτικών ροών. Ο υπολογισμός του όγκου από τις προηγούμενες αστοχίες έγινε προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας την θεωρία ευστάθειας σε καμπύλα επίπεδα. Συνεπακόλουθα, έγινε σύγκριση του όγκου του πρανούς που είχε αστοχήσει με τον αντίστοιχο όγκο του υλικού στο πόδα της χαράδρας αλλά και με το υλικό των κορημάτων στις χαρτογραφημένες περιοχές. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανέδειξε ότι ο όγκος επί του πόδα ανέρχεται το 1/4 του συνολικού όγκου του υλικού που είχε αστοχήσει. Εντωμεταξύ, η απουσία κορημάτων στην πλειονότητα των περιοχών που χαρτογραφήθηκαν υποδεικνύει την παρουσία τουρβιδιτικών ρευμάτων, που προκαλούν την διάβρωση και μεταφορά σε μεγάλη απόσταση μακριά των ιζημάτων από το αρχικό σημείο της ροής λόγω βαρύτητας. Επιπροσθέτως, η δράση των τουρβιδιτικών ρευμάτων γίνεται γνωστή λόγω της διάβρωσης των καναλιών και των κώνων στο πυθμένα με το μεγαλύτερο βάθος. Στην εικόνα 32, παρουσιάζεται η χαράδρα Sigsbee αλλά και τα σημεία αρχικής ενεργοποίησης της κατολισθαίνουσας μάζας, οι προκαλούμενες εδαφικές καταπτώσεις (slumps) και οι συνεπακόλουθες εδαφικές κατολισθήσεις (landslides).



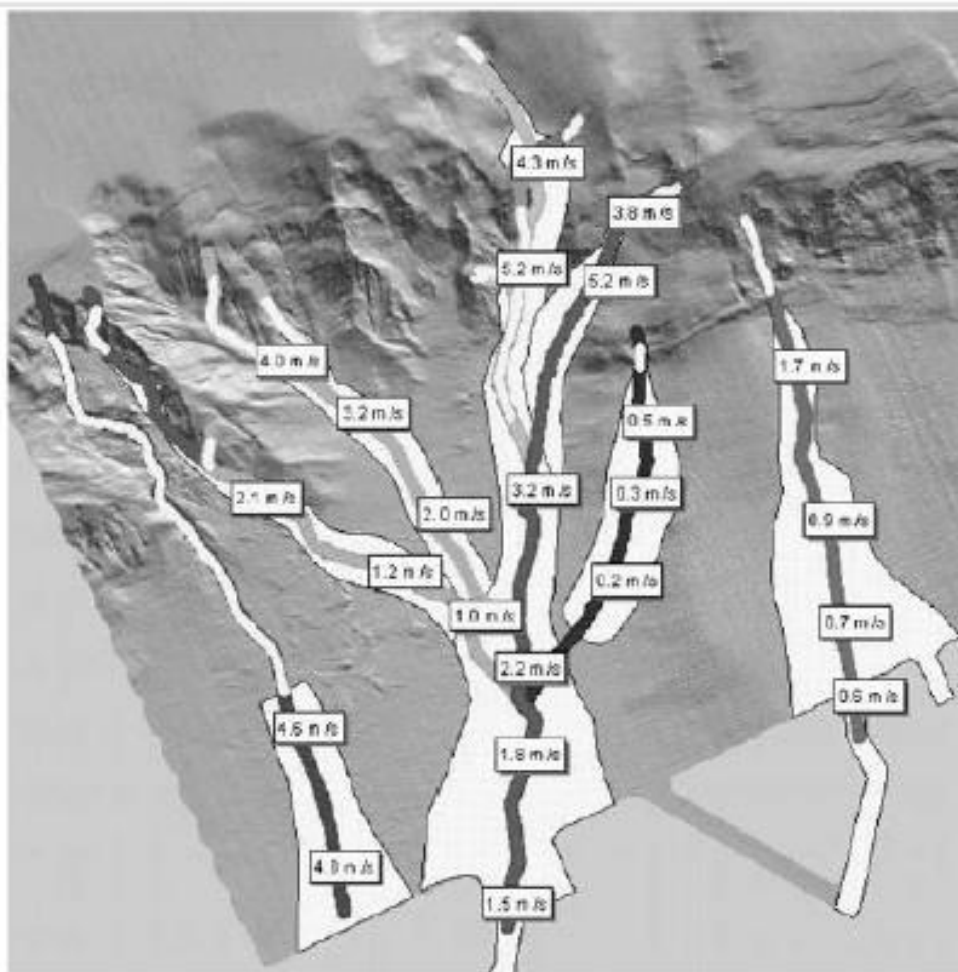
Εικόνα 32: Τρισδιάστατη απεικόνιση της χαράδρας. [19']

Το μοντέλο BING (Jiang and LeBlond, 1993), εφαρμόστηκε με σκοπό να προσομοιωθούν κάποιες ενδεικτικές ροές κορημάτων. Η παραπάνω εφαρμογή έγινε στα πλαίσια μίας προσπάθειας να ταυτοποιηθούν οι μηχανισμοί πρόκλησης της αστοχίας πρανών και της συνεπακόλουθης διαδικασίας κίνησης των βαρυτικών ροών. Στην εικόνα 33 απεικονίζεται ένας συσχετισμός μεταξύ των αναδρομικών προβλέψεων και των μετέπειτα παρατηρούμενων ροών κορημάτων σε συνδυασμό με τη γεωμετρία τελειώματος για ένα ενδεικτικό συμβάν κατολίσθησης. Ο διακεκομμένος λοφίσκος δείχνει τη περιοχή που γίνεται η μετατροπή της αρχικής αστοχίας μάζας σε εδαφική ροή μη νευτωνικού ρευστού, όπως το ρευστό Bingham.



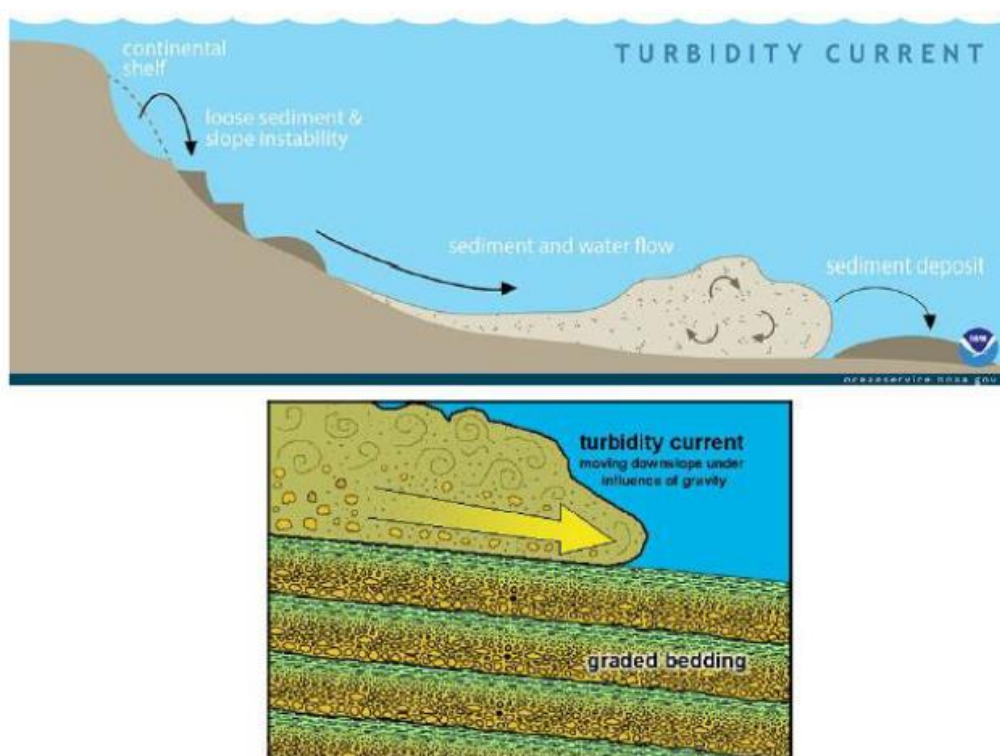
Εικόνα 33: Μοντελοποιημένες και παρατηρούμενες ροές κορημάτων. [5']

Μέσω του παραπάνω μοντέλου υπολογίστηκαν κάποιες παράμετροι, από τις οποίες εξήχθησαν συμπεράσματα ώστε να προβλεφθεί η ταχύτητα, η επιφάνεια και το πάχος μελλοντικών ιζημάτων των βαρυτικών ροών. Είναι ανέφικτο να γίνει πρόβλεψη των τουρβιδιστικών ρευμάτων κατά όμοιο τρόπο με τις ροές κορημάτων από την στιγμή που δεν υπάρχουν ακόμη τα κατάλληλα μοντέλα πρόβλεψης. Παρόλο αυτά, γίνεται χρήση άλλων τεχνικών κάνοντας αξιοποίηση του βάθους του διαβρωμένου υλικού, εν μέσω των διαδρομών των κάνυον. Στη εικόνα 34 απεικονίζονται οι προβλεπόμενες οδεύσεις και οι ταχύτητες των τουρβιδιτικών ρευμάτων για τις περιοχές Mad Dog και Atlantis. Η μέγιστη ροή αγγίζει τα 5.2 m/sec ή 18.72 km/hr.



Εικόνα 34: Προβλεπόμενες οδεύσεις τουρβιδιτικών ρευμάτων και εκτιμώμενες ταχύτητες για τα πεδία Mad Dog και Atlantis. [5']

Είναι άξιο αναφοράς να επισημανθεί ότι κάποιες βαρυτικές εδαφικές ροές που συνέβησαν στα παρελθόντα έτη στις παραπάνω περιοχές ήταν μη προσδιορίσιμες με χαρτογραφημένες αποστάσεις τελειώματος, οι οποίες υπερέβησαν τα 7 km και ταχύτητες άνω των 100 km/hr, και παράλληλα υπήρξαν διάσπαρτα κομμάτια βράχων που βρέθηκαν παγιδευμένα στις ροές που προσέγγιζαν το μέγεθος ανοιχτών σταδίων στίβου. Προφανώς, στη περίπτωση που γίνει επανάληψη παρόμοιων ροών στη περιοχή, οι όποιες υπεράκτιες ενεργειακές εγκαταστάσεις (π.χ. εξέδρες άντλησης πετρελαίου) θα διατρέξουν κίνδυνο και προφανώς υπάρχει απαίτηση για λεπτομερή καταγραφή των οδεύσεων των υποθαλάσσιων γεωμαζών της περιοχής.

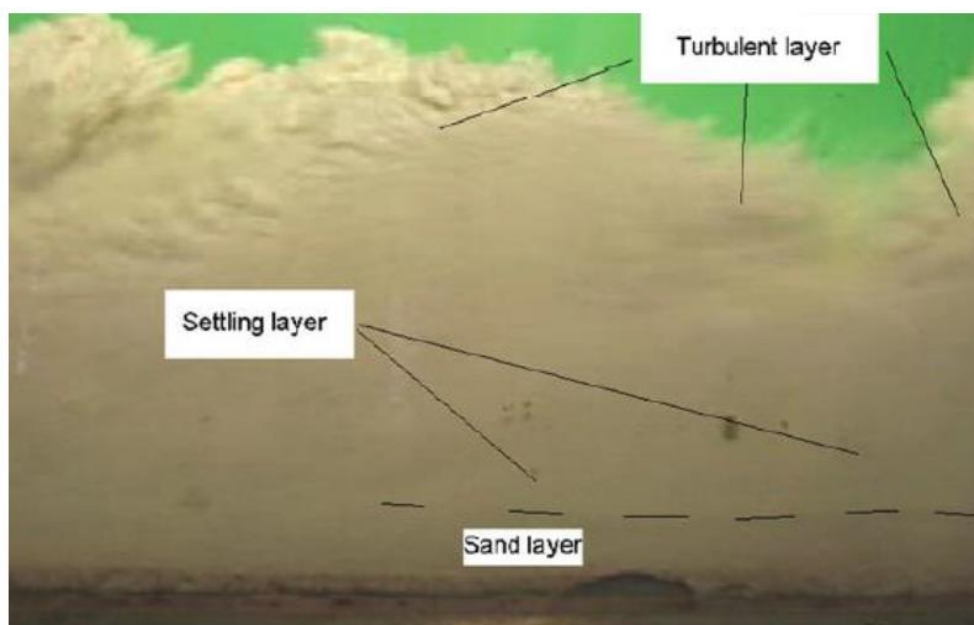


Εικόνα 35: Ενδεικτική παρουσίαση της εξέλιξης ενός κατολισθητικού φαινομένου σε τουρβιδιτικό ρεύμα, αλλά και της μετέπειτα κίνησης του τουρβιδιτικού ρεύματος στην επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα. [20’]

Μια ενδεικτική εξέλιξη υποθαλάσσιας βαρυτικής ροής, παρουσιάζεται στην εικόνα 35, όπου η αστάθεια ενός πρανούς στην υφαλοκρηπίδα (continental shelf), που ο λόγος πρόκλησης της ήταν το χαλαρό ίζημα (loose sediment), ενεργοποιεί την υποθαλάσσια κατολίσθηση. Η προαναφερθείσα κατολίσθηση μετατρέπεται από ροή κόκκων και ρευστοποιημένη ροή σε τουρβιδιτικά ρεύματα και εν τέλει γίνεται η

καθίζηση της στη ζώνη απόθεσης, σε μεγάλη απόσταση από την ζώνη πηγής, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός στρωματοποιημένου πυθμένα με διαβαθμισμένες στρώσεις. Είναι αξιοσημείωτο ότι γίνεται μεγαλύτερη μεταφορά φορτίου ιζήματος κατά την διάρκεια της ολίσθησης και της κατάπτωσης, παρά με την ροή τουρβιδιτικών ρευμάτων.

Στη εικόνα 36 γίνεται εικονογράφηση ενός πειράματος μικρής κλίμακας, όπου στο υψηλότερο επίπεδο της ροής γίνεται αντιληπτή η ανάπτυξη της τουρβώδους ροής και του τουρβώδους στρώματος (turbulent layer), ενώ εν συνέχεια παρατηρείται το στρώμα που δέχεται το σύνολο της καθίζησης (settling layer) και το στρώμα άμμου (sand layer).



Εικόνα 36: Πείραμα ροής μικρής κλίμακας. [14’]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ FLAC SLOPE

3.1 FLAC Slope [11]

Το FLAC Slope αποτελεί μια μικρή (μίνι) έκδοση του FLAC που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να αποδίδει συντελεστή ασφάλειας για υπολογισμούς που αφορούν ανάλυση ευστάθειας πρανών. Η συγκεκριμένη έκδοση λειτουργεί εξ ολοκλήρου από το περιβάλλον γραφικών της FLAC μέσω της διεπαφής με τον χρήστη, η οποία προβλέπει ταχεία δημιουργία μοντέλων για πρανή εδάφους ή/και βράχων και επίλυση της κατάστασης σταθερότητάς τους (ευστάθεια πρανούς). Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι οι δυνατότητες του FLAC Slope είναι αρκετά περιορισμένες σε σχέση με του FLAC και το πρόγραμμα δεν ενδείκνυται για κάποιον που θέλει να εμβαθύνει περαιτέρω. Παρόλα αυτά η ευκολία της χρήσης του, το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον του και η απλότητα επίλυσης των μοντέλων το κάνει ένα χρήσιμο εργαλείο για μια προκαταρκτική έρευνα της ευστάθειας ενός πρανούς.

Το FLAC Slope παρέχει μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά προγράμματα «οριακής ισορροπίας» για την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας. Οι κώδικες οριακής ισορροπίας χρησιμοποιούν ένα κατά προσέγγιση σχήμα (συνήθως βασισμένο στη μέθοδο τμημάτων) στην οποία γίνονται ορισμένες υποθέσεις (π.χ. η θέση και η κλίση των εφαρμοζόμενων δράσεων). Εν συνεχεία γίνεται έλεγχος του συνόλου των υποτιθέμενων επιφανειών αστοχίας, και γίνεται επιλογή αυτής με τον χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Οι συνθήκες ισορροπίας ικανοποιούνται μόνο σε ένα εξιδανικευμένο σύνολο επιφανειών. Εν αντιθέσει, το FLAC Slope προσφέρει μια πλήρη λύση της συζευγμένης τάσης/μετατόπισης, ισορροπίας και των συστατικών εξισώσεις. Δεδομένου ενός συνόλου ιδιοτήτων, το σύστημα προσδιορίζεται ότι είναι σταθερό ή ασταθές. Εκτελώντας αυτόματα μια σειρά προσομοιώσεων αλλάζοντας παράλληλα τις ιδιότητες που σχετίζονται με την αντοχή ("τεχνική μείωσης αντοχής"), ο συντελεστής ασφάλειας είναι εφικτό να προσδιοριστεί ότι αντιστοιχεί στο σημείο επίτευξης ευστάθειας και μπορεί να εντοπιστεί το κρίσιμο επίπεδο αστοχίας (ολίσθησης).

Το FLAC Slope χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να προσδιορίσει έναν συντελεστή ασφάλειας σε σχέση με ένα κοινό πρόγραμμα οριακής ισορροπίας.

Ωστόσο, με την βελτίωση της ταχύτητας των χρόνων επεξεργασίας ηλεκτρονικών υπολογιστών και των πολυπύρηνων CPU, η έκδοση του FLAC παρέχει λύσεις σε εύλογο χρονικό διάστημα. Αυτό κάνει το FLAC Slope μία πρακτική εναλλακτική ‘έναντι ενός προγράμματος οριακής ισορροπίας και παρέχει πλεονεκτήματα έναντι μιας λύσης μέσω της μεθόδου οριακής ισορροπίας . Παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα πλεονεκτήματα του προγράμματος:

1. Οποιοσδήποτε τρόπος αστοχίας αναπτύσσεται φυσικά και δεν χρειάζεται να προσδιοριστούν μια σειρά από δοκιμαστικές επιφάνειες εκ των προτέρων.
2. Δεν χρειάζεται να δοθούν τεχνητές παράμετροι (π.χ. συναρτήσεις για γωνίες δύναμης ενδιάμεσης τομής) ως δεδομένα εισόδου του προγράμματος.
3. Πολλαπλές επιφάνειες αστοχίας (ή πολύπλοκες εσωτερικές αποδόσεις) εξελίσσονται φυσικά, εφόσον το επιτρέπουν οι ισχύουσες συνθήκες.
4. Η δομική αλληλεπίδραση (π.χ. αγκύριο, ήλος εδάφους ή γεωπλέγμα) διαμορφώνεται με ρεαλιστικό τρόπο ως ολοκληρωμένα συζευγμένα παραμορφωτικά στοιχεία, και όχι απλώς ως ισόποσες δυνάμεις.

3.2 Τεχνική μείωσης αντοχής του FLAC Slope

Η «τεχνική μείωσης της αντοχής» συνήθως εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας προοδευτικά μειώνοντας τη διατμητική αντοχή του υλικού με στόχο να φέρει την κλίση σε μια κατάσταση οριακής ισορροπίας. Η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως με το κριτήριο αποτυχίας Mohr-Coulomb .Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής ασφαλείας F ορίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

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

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

Γίνεται μια σειρά προσομοιώσεων με χρήση δοκιμαστικών τιμών του παράγοντα F^{trial} για απομείωση της συνοχής, c , και γωνία τριβής, φ , έως ότου πραγματοποιηθεί αστοχία κλίσης. (Σημειωτέων: Εάν η κλίση είναι αρχικά ασταθής,

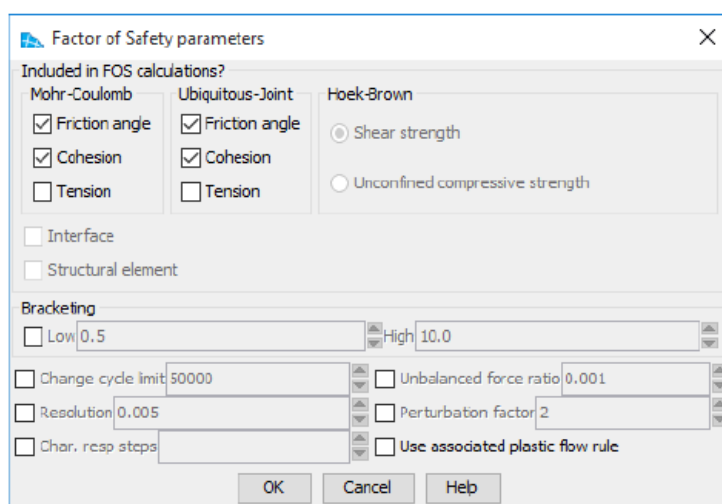
οι συντελεστές c και ϕ θα αυξηθούν έως ότου προκύψει η περιοριστική συνθήκη.) Μία τεχνική για εύρεση των τιμών αντοχής που αντιστοιχούν στην έναρξη της αστοχίας είναι η μονότονη μείωση (ή αύξηση) των δυνατοτήτων σταδιακά με σταθερό ρυθμό μέχρι να προκύψει κατάσταση αστοχίας. Εναλλακτικά, στο FLAC Slope μπορεί να γίνει μια οριακή προσέγγιση bracketing. Μέσω αυτής της τεχνικής, ευρίσκονται πρώτα οι συνθήκες για ισορροπία και για αστοχία και στη συνέχεια αρχίζει η σύγκλιση μεταξύ αυτών των 2 ορίων (ευστάθειας & αστοχίας). Συνεπώς η λύση προκύπτει όταν αυτή η σύγκλιση μειωθεί κάτω από μία προκαθορισμένη ανοχή (τιμή).

Η μέθοδος μείωσης της αντοχής που εφαρμόζεται στο FLAC Slope θα προσδίδει πάντα μία αποδεκτή λύση: σε συνθήκη ασταθούς φυσικού συστήματος, το FLAC Slope υποδεικνύει απλώς ότι συντελείται διαρροή στο μοντέλο. Λύση μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία χρησιμοποιείται συχνά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δεν έχει εφαρμογή στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Η λύση που προσφέρει το FLAC Slope είναι μια δυναμική προσομοίωση εξελισσόμενη στο χρόνο στην οποία η διαρροή είναι εξίσου έγκυρη με την κατάσταση ισορροπίας. Επιπλέον δεν υπάρχει επαναληπτική διαδικασία όσο αφορά την χρήση των ελαστοπλαστικών καταστατικών νόμων: η τοποθέτηση του τανυστή τάσης γίνεται με ακρίβεια στην επιφάνεια διαρροής (ικανοποιώντας τις καταστατικές εξισώσεις, όπως η εξίσωση συνέχειας και η ελαστικοπλαστική κράτυνση) εφόσον ανιχνευθεί πλαστική διαρροή. Η εντατική κατάσταση στο FLAC Slope σε συντελεστή ασφαλείας $F=1$ είναι η πραγματική κατάσταση τάσης που αντιστοιχεί στον μηχανισμό αστοχίας, όχι μια αυθαίρετη κατάσταση τάσης προτού επέλθει διαρροή ή μια κατάσταση ελαστικής τάσης.

Η ανίχνευση του ορίου μεταξύ φυσικής σταθερότητας και αστάθειας βασίζεται σε έναν στόχο-κριτήριο του FLAC Slope που κρίνει εάν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία ή σε κατάσταση διαρροής. Με στόχο να καθοριστεί το όριο μεταξύ φυσικής σταθερότητας και αστάθειας, δημιουργείται ένα σύνολο εντελώς ξεχωριστών προσομοιώσεων με διαφορετικούς παράγοντες μείωσης της αντοχής. Ακολουθώντας, κάθε προσομοίωση ελέγχεται για το καθορισμό ύπαρξης ισορροπίας ή πλαστικής διαρροής. Το κρίσιμο σημείο που συμβαίνει αστοχία βρίσκεται για οποιαδήποτε απαιτούμενη ακρίβεια (συνήθως 1%) με διαδοχικές συγκρίσεις των παραγόντων μείωσης της αντοχής. Η διαδικασία λύσης είναι πανομοιότυπη για κάθε

προσομοίωση επί του συνόλου των προσομοιώσεων (είτε καταλήγει σε ισορροπία είτε σε διαρροή).

Η διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής μείωσης της αντοχής στο FLAC Slope έχει ως εξής: Πρώτον, ο κώδικας εντοπίζει έναν «χαρακτηριστικό χρόνο απόκρισης», που αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό αριθμό βημάτων (συμβολίζεται με N_r) που χαρακτηρίζει τον χρόνο απόκρισης του συστήματος. Το N_r βρίσκεται, ορίζοντας την αντοχή υλικού (για υλικό με ιδιότητες του κριτηρίου Mohr-Coulomb, η αντοχή συνοχής και εφελκυσμού) σε σχετικά μεγάλη τιμή, κάνοντας εναλλαγές στις εσωτερικές εντάσεις, με σκοπό να βρεθεί πόσα βήματα είναι απαραίτητα για να επιστρέψει το σύστημα σε ισορροπία. Ένα μέγιστο όριο 50.000 ορίζεται για το N_r ως προεπιλογή. Αν το μοντέλο δεν φτάσει σε ισορροπία μέσα σε 50.000 βήματα, η προσομοίωση θα σταματήσει και η επίλυση του συντελεστή ασφαλείας δεν ολοκληρώνεται. Σε περίπτωση που συμβεί αυτό, ο χρήστης οφείλει να ελέγξει τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί για το μοντέλο. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης έχει επιλέξει δομικό στήριγμα με υψηλή τιμή για το μέτρο του Young, αυτό μπορεί να επηρεάσει το χρόνο σύγκλισης της λύσης. Εάν το N_r δεν βρεθεί σε 50.000 βήματα, το χαρακτηριστικό όριο βημάτων απόκρισης μπορεί να αυξηθεί επιλέγοντας την κατάλληλη επιλογή στο παράθυρο διαλόγου του προγράμματος.



Εικόνα 37: Απεικόνιση των παραμέτρων για την εύρεση συντελεστή ασφαλείας στο Flac Slope. [21']

Αφού προσδιοριστεί το N_r , για έναν δεδομένο συντελεστή μείωσης αντοχής F , εκτελούνται τα βήματα N_r . Αν ο λόγος μη ισορροπημένης δύναμης* είναι μικρότερος από 10^{-3} μετά τα βήματα N_r , τότε το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Εάν ο λόγος

μη ισορροπημένης δύναμης υπερτερεί της τιμής 10^{-3} , τότε εκτελούνται άλλα τόσα N_r βήματα, βγαίνοντας από τον βρόχο όταν ο λόγος δύναμης γίνεται μικρότερος από 10^{-3} . Η μέση τιμή του λόγου δύναμης, που υπολογίζεται κατά μέσο όρο στο τρέχον εύρος των βημάτων N_r , συγκρίνεται με τη μέση αναλογία δύναμης σε σχέση με τα προηγούμενα βήματα N_r . Αν η διαφορά δεν ξεπερνάει την τιμή 10%, το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε αστάθεια και ο βρόχος επαναδιαμορφώνεται βάσει του νέου F (του εκτός ισορροπίας). Εάν η προαναφερθείσα διαφορά είναι μεγαλύτερη από 10%, το σύνολο των βημάτων N_r συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθεί μία από τις 3 παρακάτω συνθήκες: (1) η διαφορά γίνει μικρότερη από 10%, (2) έχουν εκτελεστεί 6 τέτοια μπλοκ, ή (3) ο λόγος δύναμης γίνει μικρότερος από 10^{-3} . Η αιτιολόγηση για την περίπτωση (1) είναι ότι ο μέσος λόγος δύναμης συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή που είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στην ισορροπία. οπότε το σύστημα πρέπει να βρίσκεται σε διαρροή.

*Η μη ισορροπημένη δύναμη αποτελεί την συνολική ασκούμενη δύναμη σε ένα σημείο πλέγματος του FLAC Slope. Ο λόγος αυτής της δύναμης προς τη μέση απόλυτη τιμή της δύναμης που ασκείται από κάθε περιβάλλουσα ζώνη είναι ο λόγος της μη ισορροπημένης δύναμης.

Οι παρακάτω πληροφορίες αναφέρονται κατά τη διαδικασία επίλυσης.

1. Το σύνολο των βημάτων υπολογισμού που απαιτήθηκαν στον υπολογισμό μιας δεδομένης τιμής του F , ως μέρος του N_r .
2. Το σύνολο των ολοκληρωμένων κύκλων λύσης (δηλαδή, δοκιμές για επίτευξη ισορροπίας ή αστάθειας).
3. Η λειτουργία που εκτελείται εκείνη τη στιγμή.
4. Οι τρέχουσες τιμές σύγκλισης του F .

Η προσέγγιση λύσης μέσω σύγκλισης μπορεί να εκτελέσει μεγάλο αριθμό (σταθερών και ασταθών) λύσεων πριν από τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας. Εάν είναι γνωστό ένα κατά προσέγγιση εύρος για τον συντελεστή ασφαλείας, τότε ο αριθμός των λύσεων (και ο συνολικός χρόνος λύσης) μπορεί να μειωθεί καθορίζοντας την αρχικές τιμές σύγκλισης. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές Bracketing που προσφέρει το παράθυρο διαλόγου του

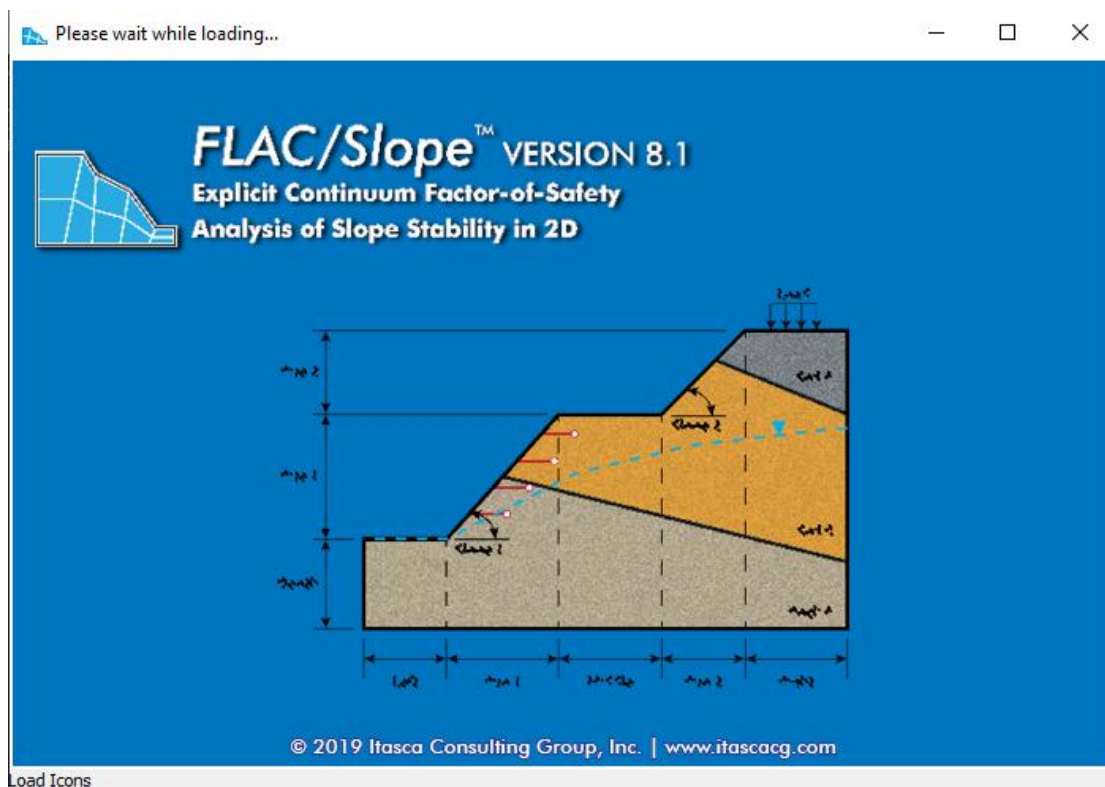
προγράμματος όπως φαίνεται και στην εικόνα 37 παραπάνω. Εάν ο υπολογισμένος συντελεστής πέσει έξω από το καθορισμένο εύρος τιμών, τότε θα εμφανιστεί ένα προειδοποιητικό μήνυμα. Είναι επίσης δυνατό να ελεγχθεί εάν ένας καθορισμένος συντελεστής ασφαλείας είναι πάνω ή κάτω από τον πραγματικό συντελεστή ασφαλείας θέτοντας ως αρχική τιμή του κατώτερου ορίου, την αρχική τιμή του άνω ορίου.

Οι ακόλουθες συνθήκες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επίλυση ενός συντελεστή ασφαλείας μέσω του FLAC Slope.

1. Η αρχική συνθήκη τάσης είναι μια κατάσταση μηδενικής τάσης για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του FLAC Slope. Εφαρμόζεται μόνο η φόρτιση της βαρύτητας για τον προσδιορισμό του N_r .
2. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται μέσω της θεωρίας μικρών παραμορφώσεων.
3. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας προϋποθέτει τη μη συσχετισμένη πλαστική διαρροή μέσω προεπιλογής του προγράμματος. Για να ληφθεί υπόψη από την αρχή η πλαστική διαρροή, πρέπει να επιλεγεί μέσω του παραθύρου διαλόγου των παραμέτρων συντελεστή ασφάλειας που προσφέρει το πρόγραμμα (Εικόνα 37).

3.3 Παρουσίαση λειτουργίας του FLAC Slope

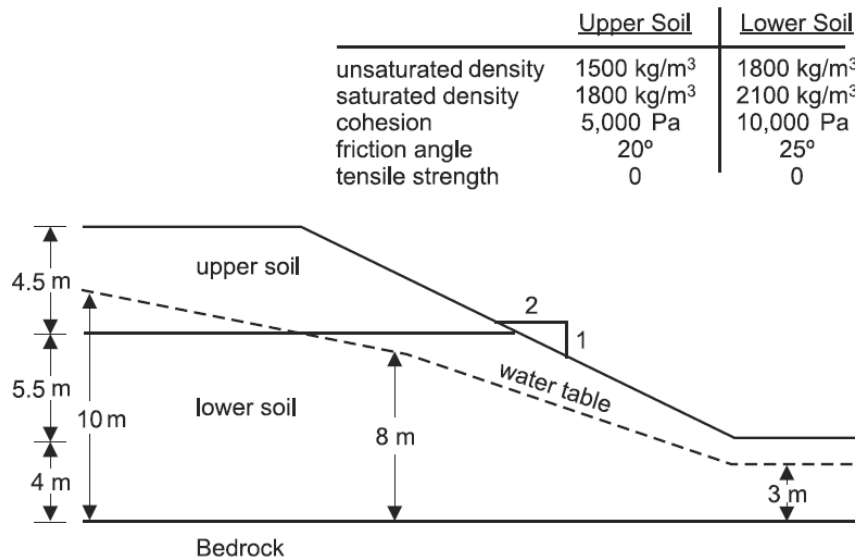
Παρακάτω γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση του προγράμματος. Αρχικά, με την έναρξη του προγράμματος.



Εικόνα 38: Έναρξη του προγράμματος Flac Slope. [21']

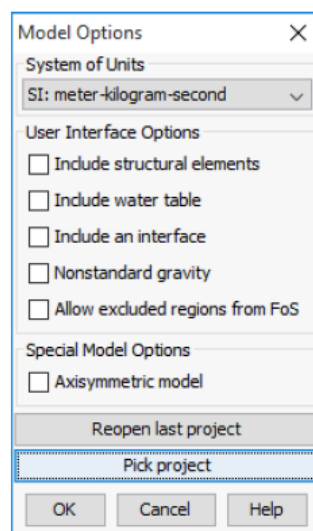
Στο συγκεκριμένο στάδιο θα γίνει η παρουσίαση και η επίλυση ενός απλού παραδείγματος μέσω του προγράμματος Flac Slope. Σκοπός είναι να κατανοηθεί η συνολική διαδικασία που απαιτείται για να λειτουργήσει και να παράξει αποτελέσματα το πρόγραμμα.

Το παράδειγμα είναι μια απλή κλίση σε 2 στρώματα εδάφους. Η εικόνα 48 απεικονίζει τις συνθήκες της κλίσης. Σκοπός του έργου είναι η αξιολόγηση της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα στη σταθερότητα της πλαγιάς. Το έργο αποτελείται από δύο μοντέλα: ένα μοντέλο με υδροφόρο ορίζοντα και ένα χωρίς. Στη συνέχεια παρατίθενται τα τέσσερα στάδια της διαδικασίας επίλυσης αυτού του προβλήματος.



Εικόνα 39: Χαρακτηριστικά του Μοντέλου. [21']

A) Καθορισμός του μοντέλου - Όταν ξεκινάει για πρώτη φορά μια ανάλυση FLAC Slope, παρουσιάζεται ένα πλαίσιο διαλόγου ονόματι **Model Options**, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Το παράθυρο διαλόγου Model Options θα εμφανίζεται κάθε φορά που ξεκινάει το FLAC Slope ή ξεκινάει ένα νέο έργο. Το παράθυρο διαλόγου επιτρέπει τη ρύθμιση διαφορετικών συνθηκών και προαιρετικών διευκολύνσεων για το έργο.

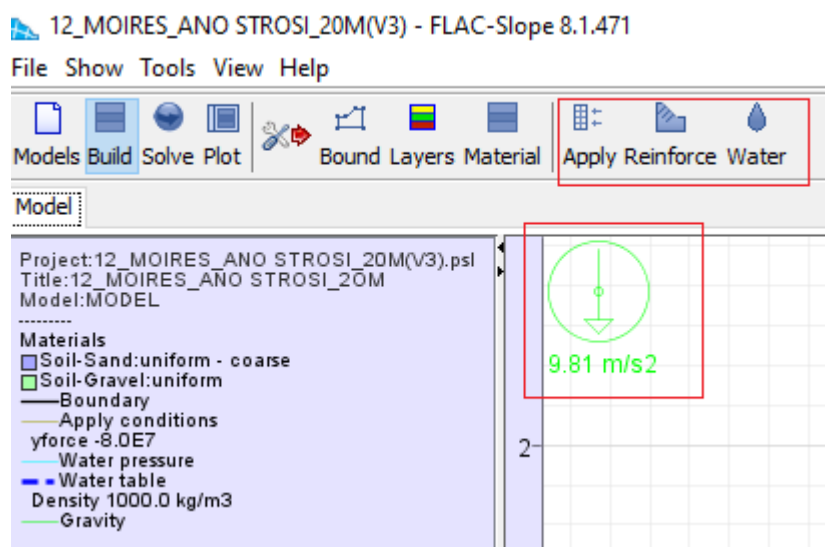


Εικόνα 40: Παράθυρο διαλόγου Model Options. [21']

Μέσω αυτού του παραθυρού γίνεται αρχικά η επιλογή του συστήματος των μονάδων. Στη συνέχεια η επισήμανση των παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται με τις αντίστοιχες μονάδες και προκαθορισμένες τιμές (όπως το μέγεθος της βαρύτητας και

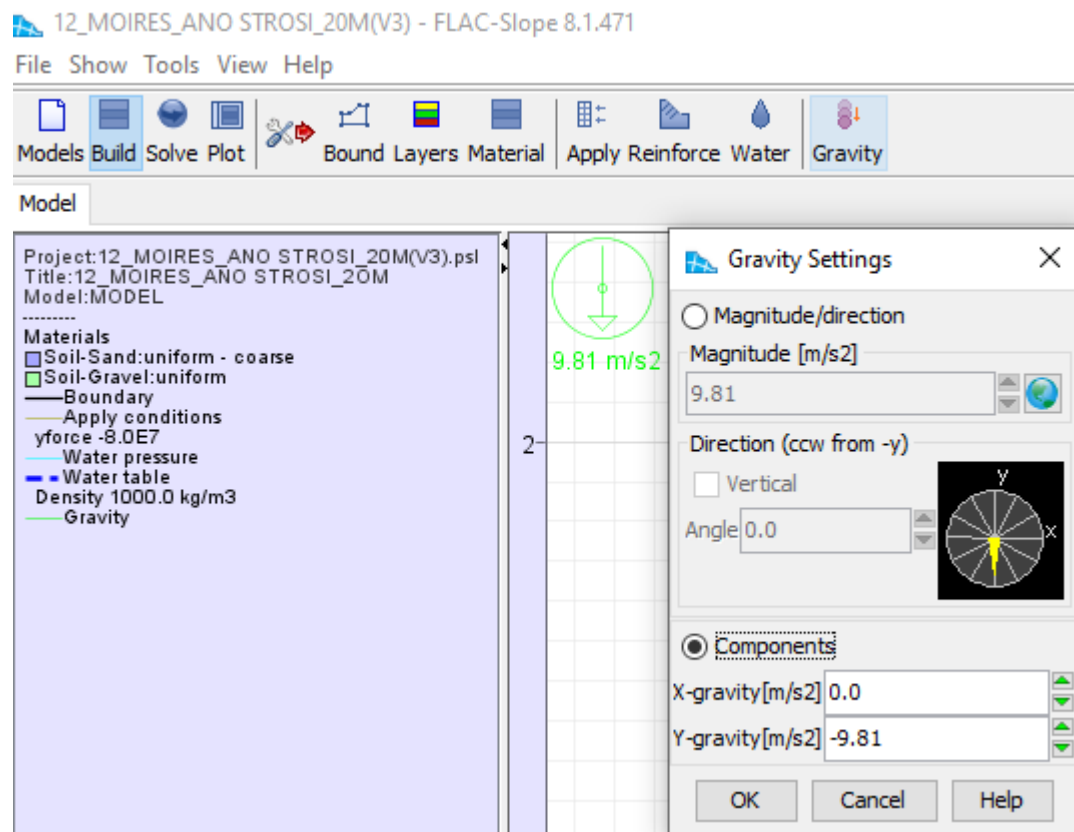
ιδιότητες υλικού) και μετατρέπονται στο επιλεγμένο σύστημα. Οπότε γίνεται ευνόητο ότι η επιλογή του συστήμα μονάδων απαιτείται να γίνει στη πρώτη φάση της ανάλυσης.

Όταν επιλέγεται κάποιο από τα πλαίσια Include Structural Elements , Include water table ή Include an interface, το αντίστοιχο εργαλείο προστίθεται στη γραμμή εργαλείων Δημιουργία όπως φαίνεται και στην εικόνα 41 παρακάτω.



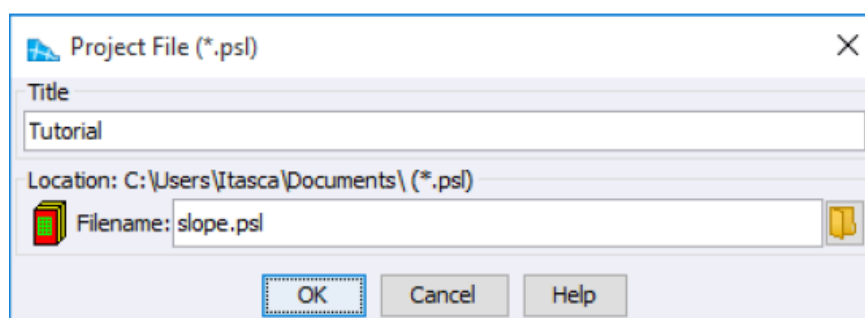
Εικόνα 41: Προσθήκη λειτουργιών στη γραμμή εργαλείων και βαρυτικό διάνυσμα. [21’]

Από προεπιλογή, η τυπική τιμή για τη βαρυτική επιτάχυνση χρησιμοποιείται στην ανάλυση από προεπιλογή. Ένα εικονίδιο βαρύτητας εμφανίζεται στην προβολή μοντέλου (όταν δημιουργείται το μοντέλο), με ένα βαρυτικό διάνυσμα με καθοδική κατεύθυνση και μέτρο αντίστοιχο του συστήματος μονάδων που είναι επιλεγμένο. Εάν επιλεχθεί το πλαίσιο Nonstandard gravity, είναι εφικτό να εκχωρηθεί ένα μέγεθος βαρυτικής επιτάχυνσης και κατεύθυνση από το εργαλείο Gravity στη γραμμή εργαλείων Build (Εικόνα 42). Σημειώνεται ότι οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις μπορούν να εφαρμόζονται με τη χρήση μη κατακόρυφης βαρύτητας.



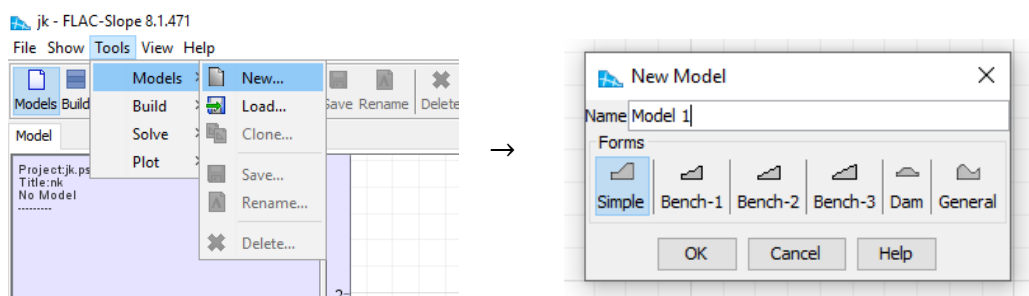
Εικόνα 42: Στοιχεία βαρυτικής επιτάχυνσης. [21']

Όταν κλείνει το παράθυρο διαλόγου Model Options, ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Project File**, όπως φαίνεται στην Εικόνα 43. Εδώ εισαγάγεται ο τίτλος του έργου και τα ονόματα των αρχείων αποθήκευσης έργου. Η θέση του φακέλου εργασίας για το το έργο επιλέγεται επίσης σε αυτό το παράθυρο διαλόγου επιλέγοντας το ανάλογο εικονίδιο. Επακολούθως καθορίζεται ένα όνομα αρχείου αποθήκευσης έργου "SLOPE" και σημειώνεται ότι η επέκταση ".PSL" εκχωρείται αυτόματα (δηλαδή, το αρχείο "SLOPE.PSL" δημιουργείται στον φάκελο εργασίας μας).



Εικόνα 43: Παράθυρο διαλόγου Project File. [21']

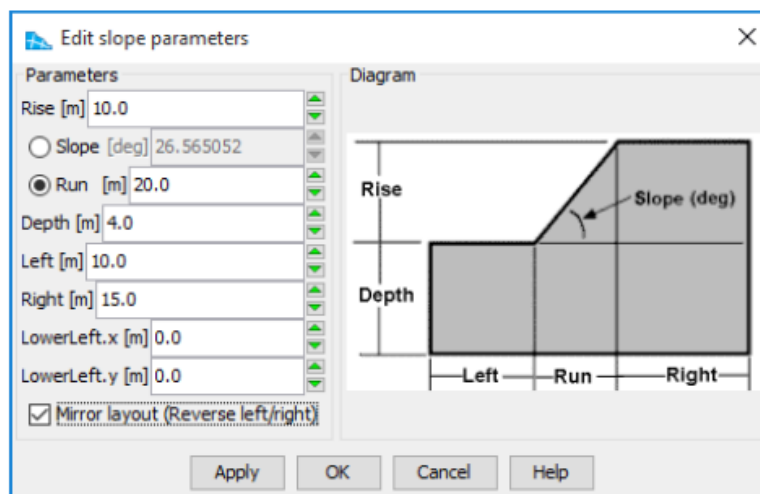
Στη συνέχεια επιλέγεται το εργαλείο Models και εισερχόμαστε στο στάδιο Models για να καθοριστεί ένα όνομα για το πρώτο μοντέλο του έργου. Επιλέγοντας New Model χρησιμοποιείται το προεπιλεγμένο όνομα μοντέλου Model 1 που εμφανίζεται στο Νέο μοντέλο διαλόγου ή ονοματοδοτούμε εμείς διαφορετικά το μοντέλο.



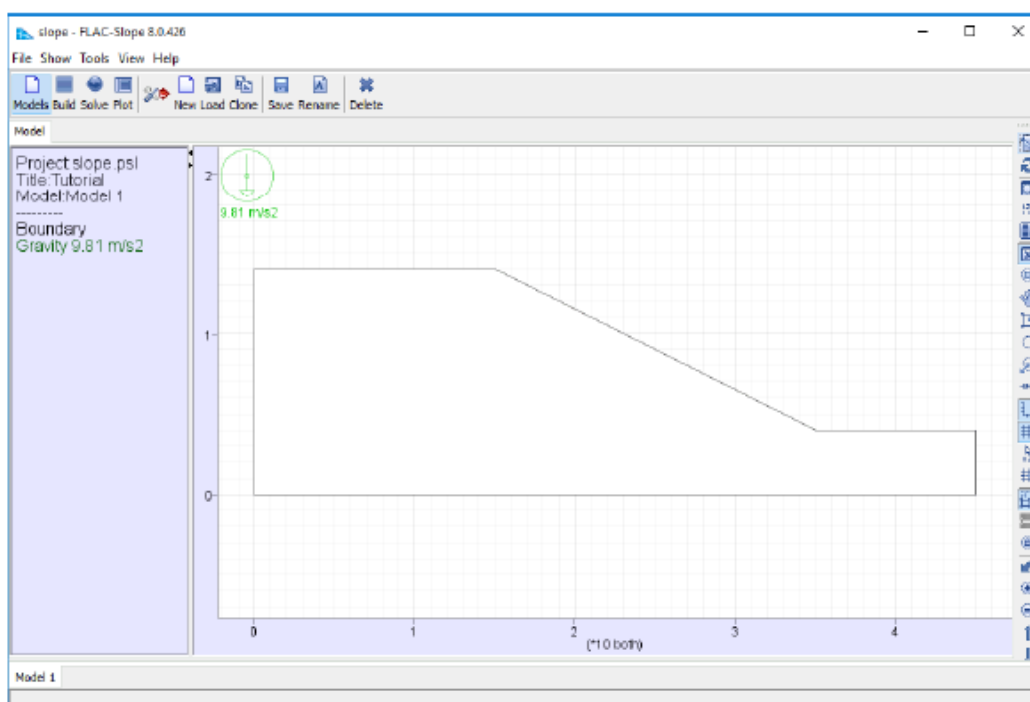
Εικόνα 44: Δημιουργία & ονομασία μοντέλου. [21']

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ορίων μοντέλων που είναι διαθέσιμοι για την δημιουργία των μοντέλων. Στη συγκεκριμένη παρουσίαση, επιλέγεται η φόρμα Simple boundary.

Εν συνεχεία ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Edit Slope Parametres** και γίνεται εισαγωγή των διαστάσεων για το όριο του μοντέλου μας, όπως φαίνεται στην εικόνα 45. Παρατηρείται ότι αν κάνουμε κλικ στο Mirror Layout αντιστρέφεται η διάταξη του μοντέλου ώστε να ταιριάζει με αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 46. Πατώντας OK προβάλεται το όριο της κλίσης που έχει δημιουργηθεί. Σημειώνεται ότι μπορεί είτε να επεξεργαστεί περαιτέρω το όριο είτε να γίνει αποδεκτό ως έχει. Η διάταξη για την κλίση του Μοντέλου 1 φαίνεται στη εικόνα 46. Μια καρτέλα επίσης δημιουργήθηκε με το όνομα του μοντέλου (Model 1) στο κάτω μέρος της προβολής. Το όνομα αρχείου αποθήκευσης έργου, ο τίτλος και το όνομα μοντέλου παρατίθενται στο υπόμνημα της προβολής μοντέλου. Πρόσθετες πληροφορίες θα προστεθούν καθώς κατασκευάζεται το μοντέλο.



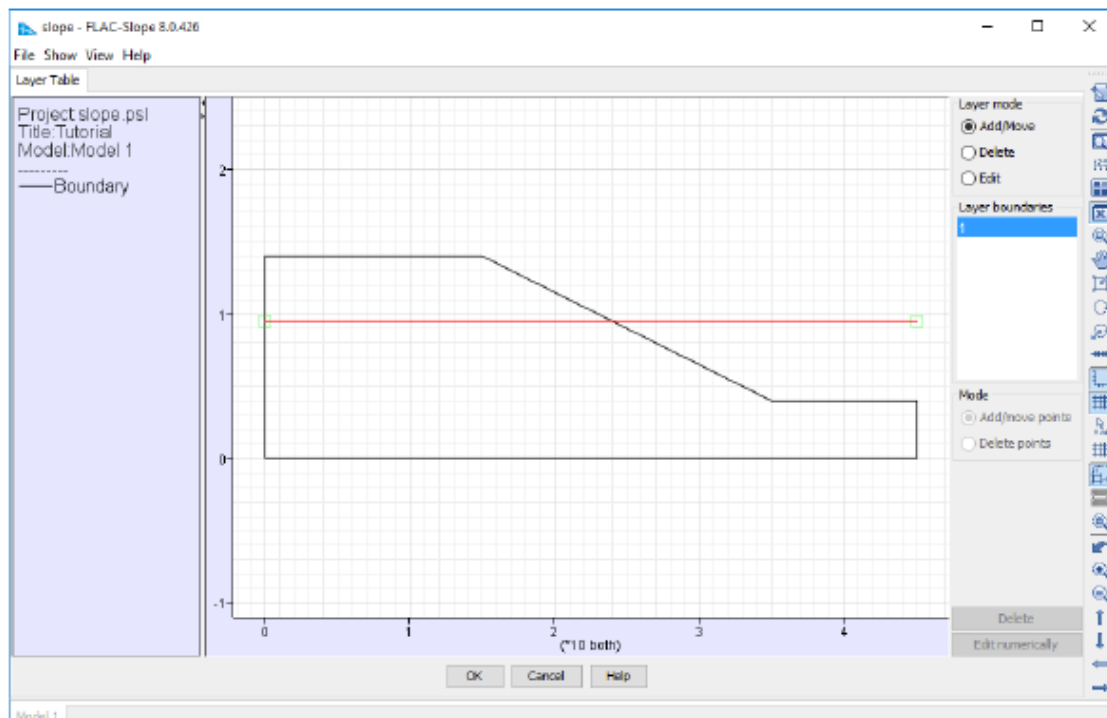
Εικόνα 45: Παράθυρο διαλόγου για παραμετροποίηση ορίων των κλίσεων του Μοντέλου (Edit slope parameters). [21']



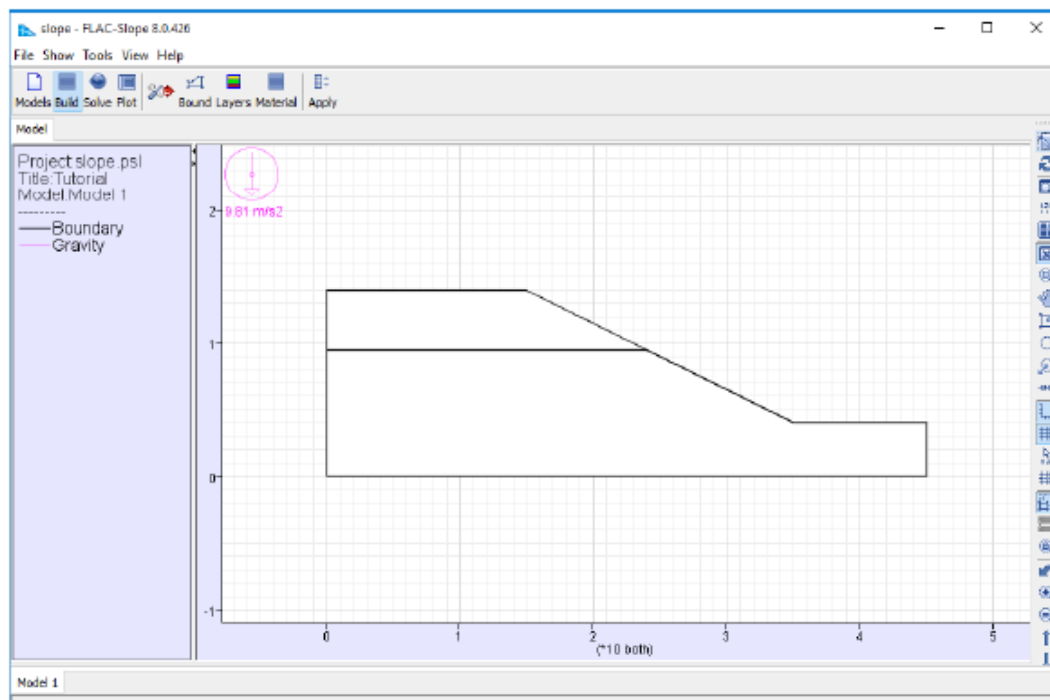
Εικόνα 46: Γεωμετρική προσομοίωση του μοντέλου. [21']

Β) Κατασκευή του μοντέλου – Επιλέγοντας την καρτέλα **Build tool** γίνεται εισαγωγή στο στάδιο Build ώστε να αρχίσει η προσθήκη των συνθηκών κλίσης και των υλικών του Model 1. Αρχικά γίνεται ορισμός των δύο στρωμάτων εδάφους του μοντέλου. Επιλέγοντας το κουμπί Layers, ανοίγει το εργαλείο Layers. Μια οριζόντια

γραμμή με τετράγωνα πλαίσια στο κάθε άκρο της εμφανίζεται όταν κάνουμε κλικ στο ποντίκι μέσα στο όριο της κλίσης. Αυτή η γραμμή ορίζει το όριο μεταξύ δύο στρωμάτων. Τοποθετούμε αυτή τη γραμμή στο επίπεδο $y = 9,5$ m κάνοντας δεξί κλικ σε ένα από τα τελικά άκρα και εισάγοντας την τιμή 9.5 στο παράθυρο διαλόγου Enter Vertical Level. Το όριο του επιπέδου έχει τοποθετηθεί. (Εικόνα 47). Αφού επιλεγεί η επιλογή OK στα παράθυρα των διαλόγων το αποτέλεσμα οριστικοποιείται και φαίνεται στην εικόνα 48.



Εικόνα 47: Οριοθέτηση των στρωμάτων. [21']



Εικόνα 48: Δημιουργία των ορίων. [21’]

Υπάρχουν δύο υλικά στην πλαγιά. Αυτά τα υλικά δημιουργούνται και αντιστοιχίζονται στα στρώματα χρησιμοποιώντας το εργαλείο Material. Αφού γίνει εισαγωγή στο παραπάνω εργαλείο, κάνουμε πρώτα κλικ στο κουμπί Create, το οποίο ανοίγει την καρτέλα Define Material Dialog. Δημιουργούμε τα δύο υλικά, άνω έδαφικό υλικό και κάτω εδαφικό υλικό, και εκχωρούμε τις πυκνότητες και ιδιότητες των τλικών χρησιμοποιώντας αυτό το παράθυρο διαλόγου. Εμφανίζονται οι ιδιότητες που έχουν εκχωρηθεί για το ανώτερο εδαφικό υλικό στην εικόνα 49. Είναι αξιοσημείωτο ότι αφού δημιουργηθεί το ανώτερο έδαφος, μπορεί να κλωνοποιηθεί χρησιμοποιώντας το κουμπί Clone και στη συνέχεια οι ιδιότητες μπορούν να τροποποιηθούν για να δημιουργηθεί το κατώτερο εδαφικό.

Πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι εισάγεται η πυκνότητα (μάζας) του υλικού και όχι το μοναδιαίο βάρος. Η σχέση μεταξύ πυκνότητας, ρ , μοναδιαίου βάρους, γ , και επιτάχυνση βαρύτητας, g , είναι η εξής:

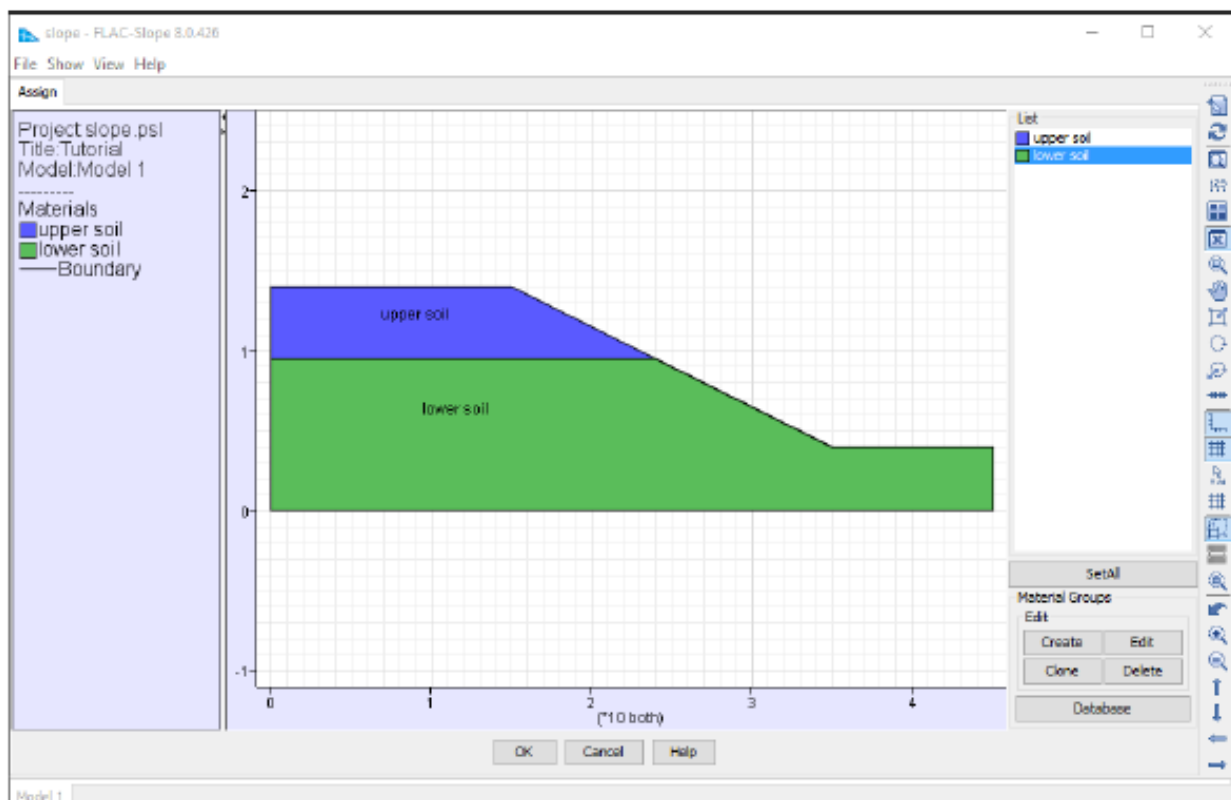
$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

Στο παράθυρο διαλόγου που φαίνεται στην εικόνα 49 φαίνεται η πυκνότητα του υλικού πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (ακόρεστη πυκνότητα) η οποία

εκχωρείται στο πεδίο Mass Density και η κορεσμένη πυκνότητα εισάγεται στο πεδίο Wet Density.

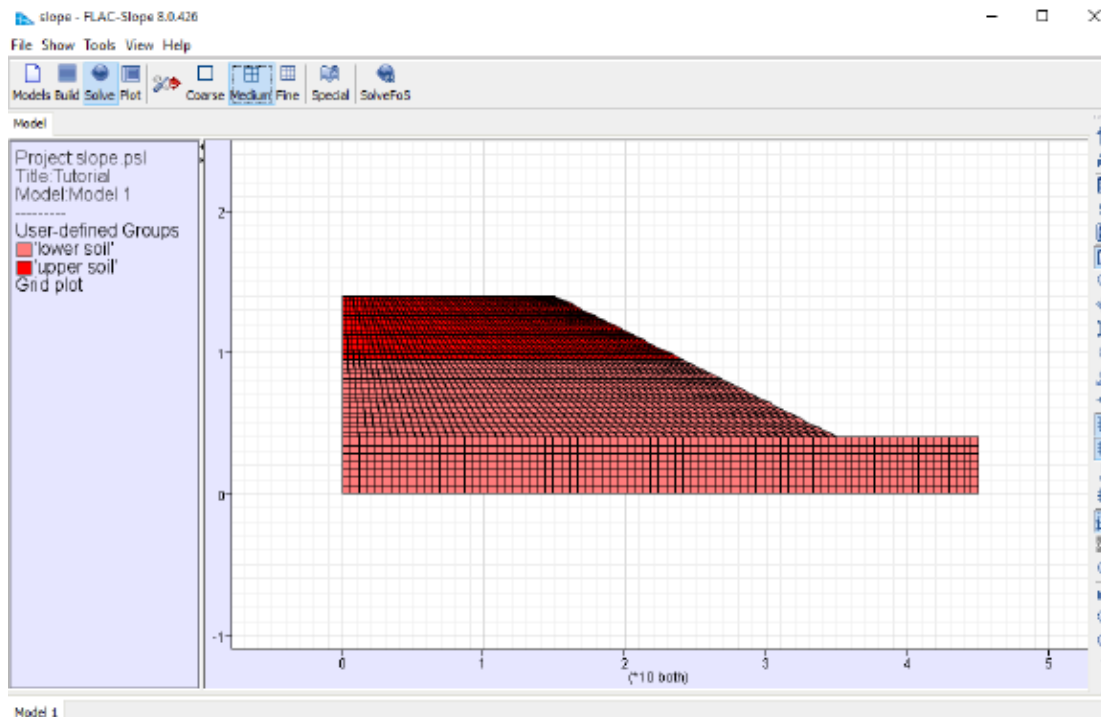
Εικόνα 49: Καρτέλα για καθορισμό ιδιοτήτων υλικού. [21’]

Αφού δημιουργηθούν τα υλικά, αντιστοιχίζονται στα δύο στρώματα. Επιλέγουμε το υλικό στο παράθυρο της λίστας που εμφανίζεται στο δεξί μέρος της οθόνης, και στη συνέχεια επιλέγοντας το επίπεδο του στρώματος που θέλουμε ,αντιστοιχίζεται το υλικό (Εικόνα 50).



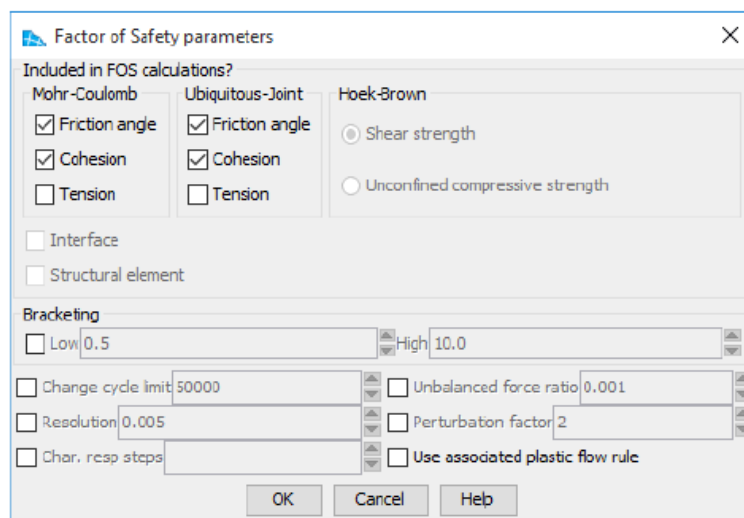
Εικόνα 50: Αντιστοίχιση υλικών. [21']

Γ) Υπολογισμός Συντελεστή Ασφάλειας – Πλέον έχουν δημιουργηθεί οι συνθήκες για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφάλειας. Επιλέγοντας στην γραμμή εργαλείων την επιλογή Solve, γίνεται εισαγωγή στο στάδιο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας. Σε αυτό το στάδιο, επιλέγεται η επιθυμητή διακριτοποίηση του πλέγματος μεταξύ των τριών επιλογών που προσφέρει το πρόγραμμα (Coarse, Medium & Fine). Είναι ευνόητο ότι όσο πυκνότερη η διακριτοποίηση, τόσο αυξάνεται και ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε Medium διακριτοποίηση και το πλέγμα που χρησιμοποιείται για τη λύση FLAC εμφανίζεται στην προβολή μοντέλου (Εικόνα 51).

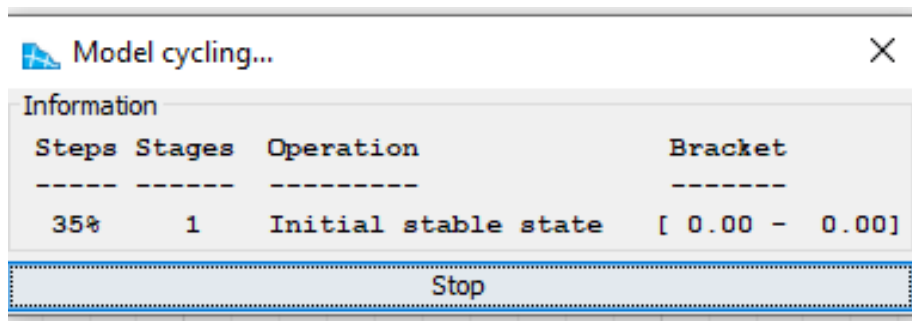


Εικόνα 51: Medium Διακριτοποίηση. [21']

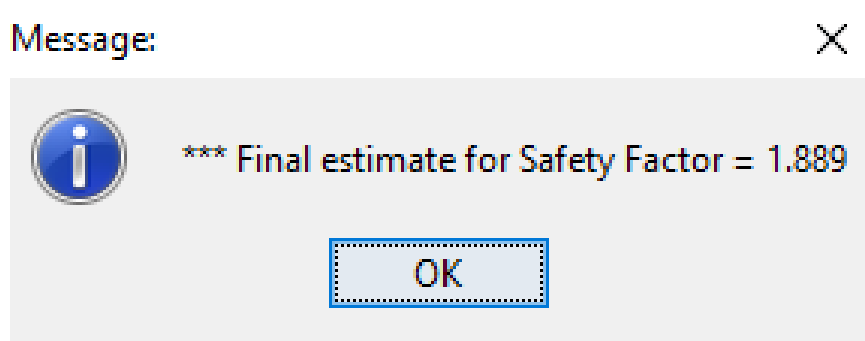
Στη συνέχεια επιλέγουμε το κουμπί Επίλυση FoS και αφού επιλέξουμε τις παραμέτρους υπολογισμού όπως φαίνεται στην εικόνα 52, αρχίζει η διαδικασία του υπολογισμού. Το FLAC Slope ξεκινά την λειτουργία υπολογισμού και ένα παράθυρο διαλόγου αναδύεται που παρέχει μια κατάσταση της διαδικασίας λύσης. Όταν ο υπολογισμός έχει ολοκληρωθεί, εκτυπώνεται ο υπολογισμένος συντελεστής ασφάλειας. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή είναι 1,889.



Εικόνα 52: Παράμετροι επίλυσης. [21']

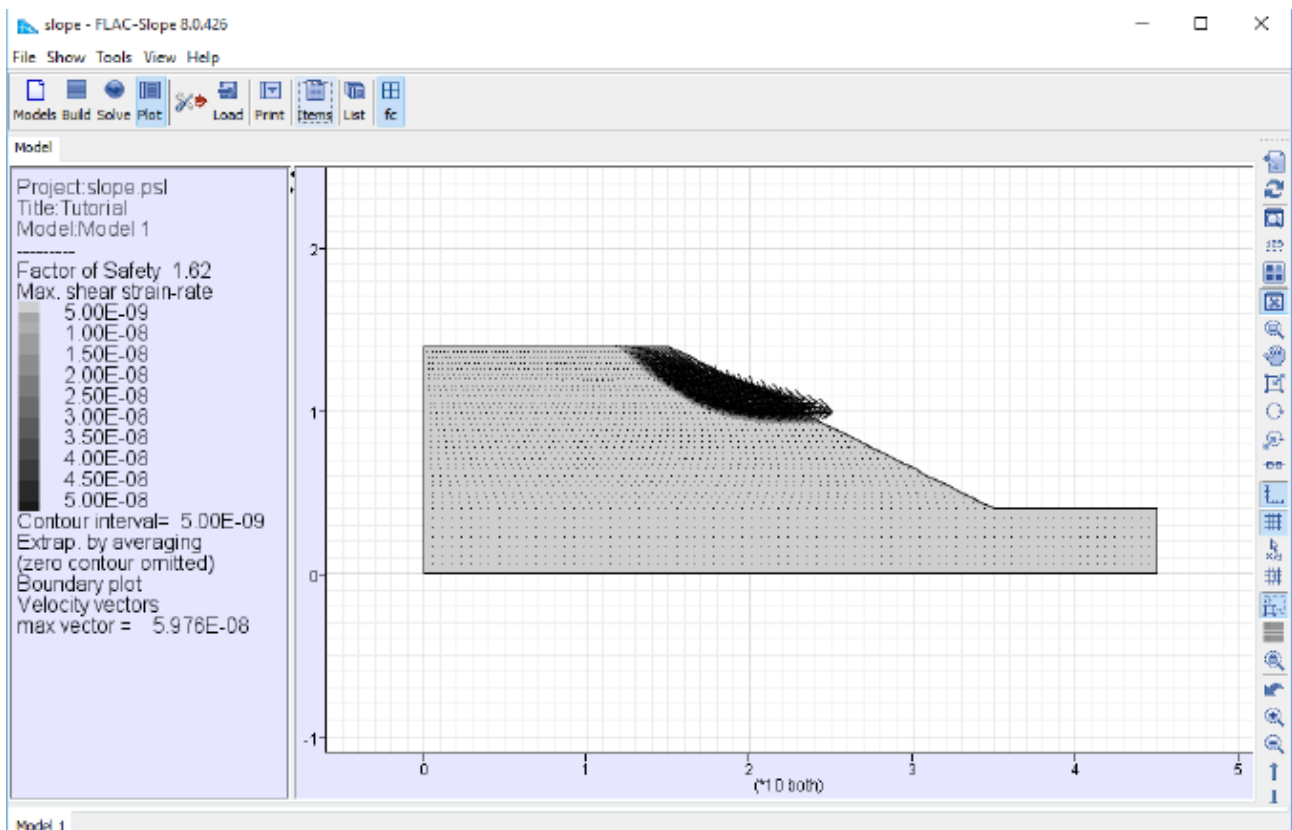


Εικόνα 53: Διαδικασία λύσης. [21']



Εικόνα 54: Εκτύπωση αποτελέσματος. [21']

Δ) Προβολή των αποτελεσμάτων – Τώρα επιλέγουμε την επιλογή Plot στη γραμμή εργαλείων ώστε να προβάσουμε τα αποτελέσματα. Εμφανίζεται ένα κουμπί f_c , που αντιστοιχεί στις συνθήκες της λύσης (περιλαμβάνεται στον υπολογισμό διακριτοποίηση μεσαίου μεγέθους, γωνία τριβής και συνοχή). Όταν επιλέγουμε αυτό το κουμπί, βλέπουμε το διάγραμμα του συντελεστή ασφαλείας για αυτό το μοντέλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 55.

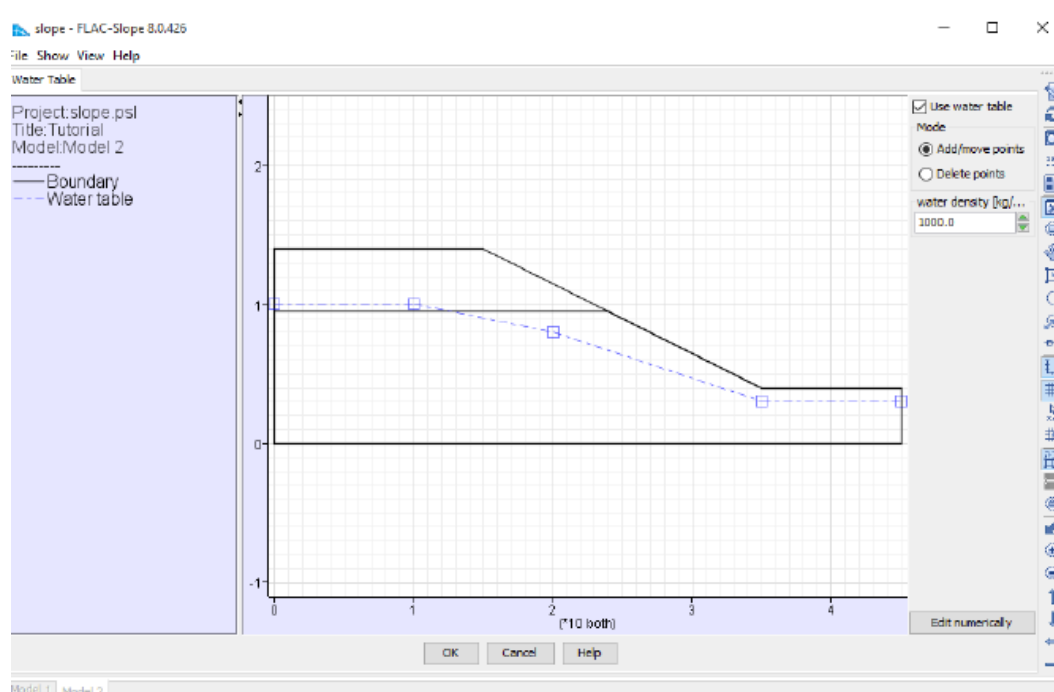


Εικόνα 55: Συντελεστής ασφαλείας του μοντέλου 1 για μεσαία διακριτοποίηση. [21']

Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει τον τύπο αστοχίας που θα αναπτυχθεί όταν η γωνία συνοχής και τριβής αναχθούν στην κατάσταση που συμπίπτει με την έναρξη της αστοχίας. Η αστοχία υποδεικνύεται από δύο επικαλυπτόμενα διαγράμματα: περιγράμματα του ρυθμού διάτμησης και των διανυσμάτων της ταχύτητας. Τα περιγράμματα του ρυθμού διάτμησης-παραμόρφωσης οριοθετούν τη θέση του επιπέδου αστοχίας και τα διανύσματα ταχύτητας προσδιορίζουν τον τρόπο αστοχίας (π.χ. περιστροφική αστοχία).

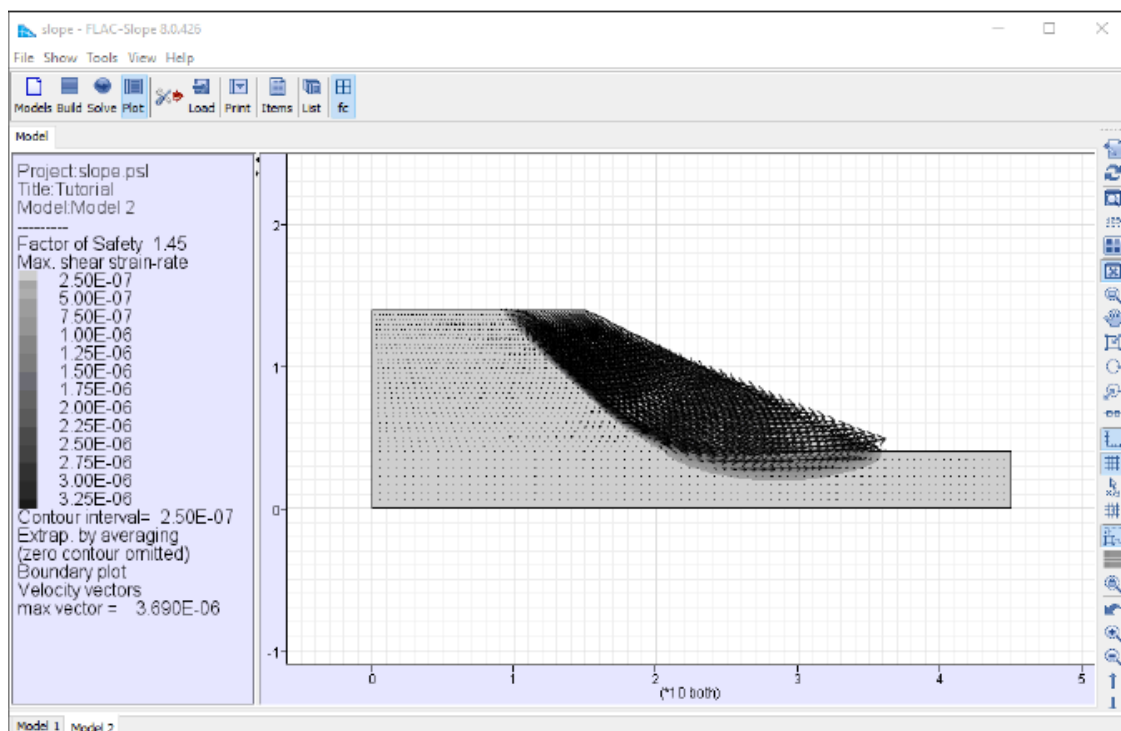
Εκτέλεση πολλαπλών αναλύσεων – Έστω ότι θέλουμε να συγκρίνουμε αυτό το αποτέλεσμα με την περίπτωση ύπαρξης ενός υδροφόρου ορίζοντα. Επιλέγουμε στη γραμμή εργαλείων την επιλογή Model >>New . Εμφανίζεται στο κάτω μέρος του προγράμματος μια νέα καρτέλα με το όνομα Model 2. Πατώντας δεξί κλικ στο Model 2 προσφέρεται η επιλογή Clone. Την επιλέγουμε ώστε να εξασφαλίσουμε τις ίδιες συνθήκες με το Model 1(αρχικό μοντέλο) και το μόνο που απομένει είναι η προσθήκη του υδροφόρου ορίζοντα. Πηγαίνουμε στη γραμμή εργαλείων , στην επιλογή Build και επιλέγουμε το κουμπί Water Table. Στο εργαλείο νερού εμφανίζεται μια οριζόντια

γραμμή με τετράγωνα άκρα. Εμείς τοποθετούμε αυτή τη γραμμή ώστε να ταιριάζει με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα όπως φαίνεται στην Εικόνα 56. Η γραμμή μπορεί είτε να επανατοποθετηθεί κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι στη γραμμή και σύροντας τη γραμμή στον υδροφόρο ορίζοντα ή κάνοντας δεξί κλικ με το ποντίκι στη γραμμή, το οποίο ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου για να καθορίσουμε τις συντεταγμένες του υδροφόρου ορίζοντα. Ορίζουμε τον υδροφόρο ορίζοντα κατά πέντε σημεία στις συντεταγμένες (0,10), (10,10), (20,8), (35,3) και (45,3). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 56.

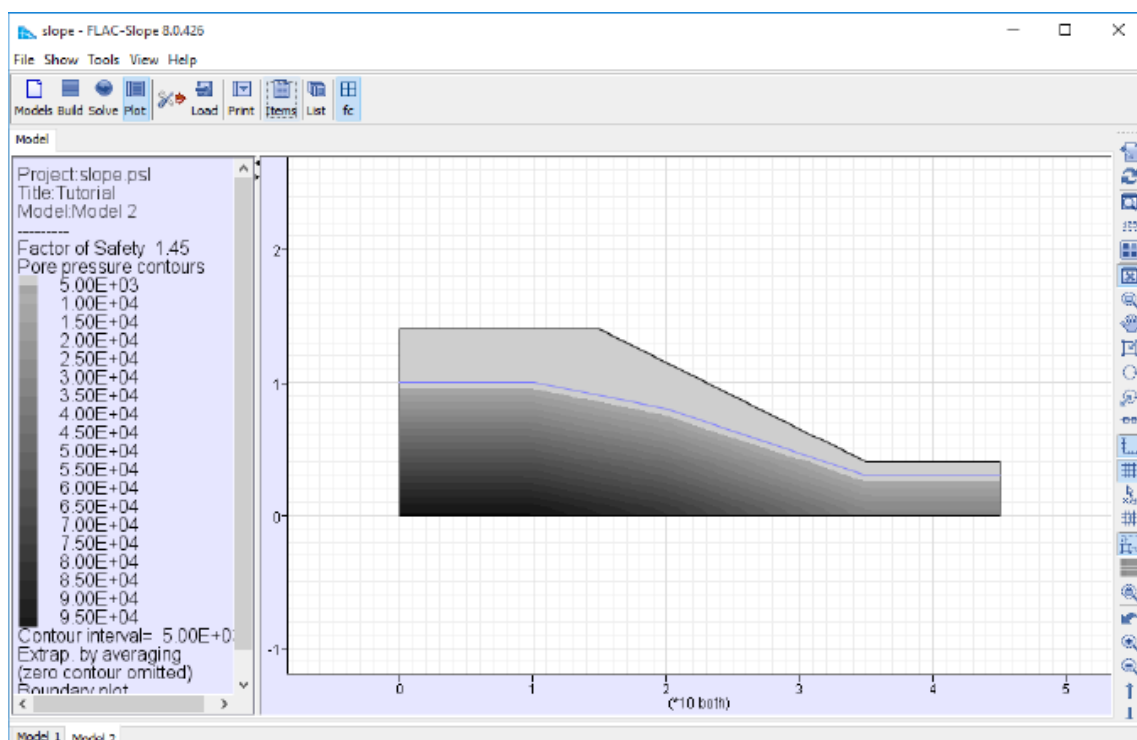


Εικόνα 56: Τοποθέτηση του υδροφόρου ορίζοντα. [21’]

Τώρα είμαστε έτοιμοι για την επίλυση του μοντέλου 2, η οποία δίνει συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1,45 . Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 57. Μέσω του κουμπιού Items, όπως φαίνεται στην Εικόνα 64 προσφέρεται η δυνατότητα να αποτυπωθούν και άλλα μεγέθη όπως η πίεση πόρων. Τα αποτελέσματα για το Μοντέλου 2 μπορούν εύκολα να συγκριθούν με αυτά για το Μοντέλο 1 κάνοντας κλικ στις καρτέλες ονόματος μοντέλου στο κάτω μέρος της προβολής μοντέλου.



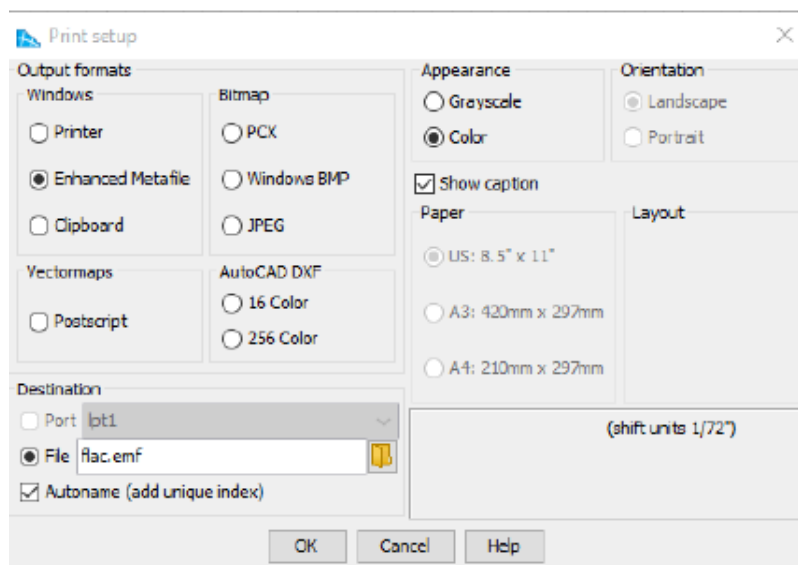
Εικόνα 57: Συντελεστής ασφαλείας του μοντέλου 2 για μεσαία διακριτοποίηση. [21']



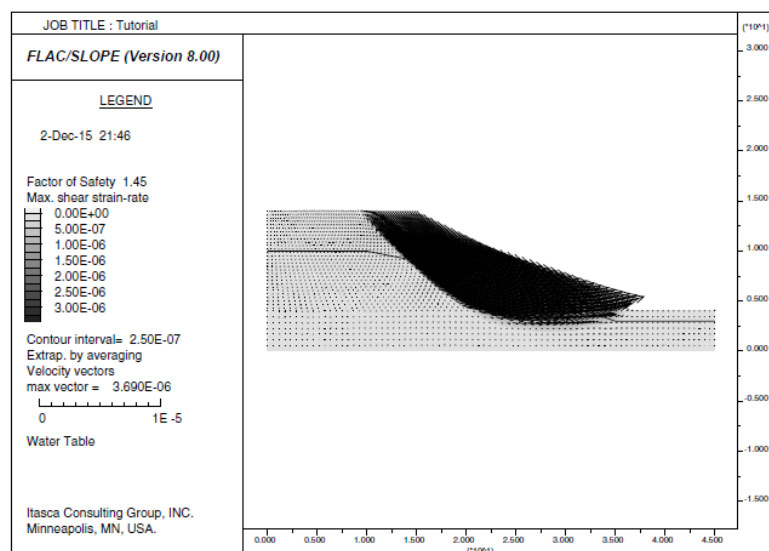
Εικόνα 58: Απεικόνιση πίεσης πόρων του μοντέλου 2 για μεσαία διακριτοποίηση.

[21']

Δημιουργία γραφημάτων σε έντυπη μορφή – Διατίθενται πολλές διαφορετικές μορφές εκτύπωσης αποτελεσμάτων για τη δημιουργία γραφικών του FLAC Slope. Έχουμε πρόσβαση στις επιλογές ρύθμισης κάνοντας κλικ στην επιλογή Print στη γραμμή εργαλείων Plot και, στη συνέχεια, κάνοντας κλικ στο Setup κουμπί στο παράθυρο διαλόγου Print Plot που ακολουθεί. Αυτό ανοίγει το παράθυρο διαλόγου Print Setup, όπως φαίνεται στην Εικόνα 59.

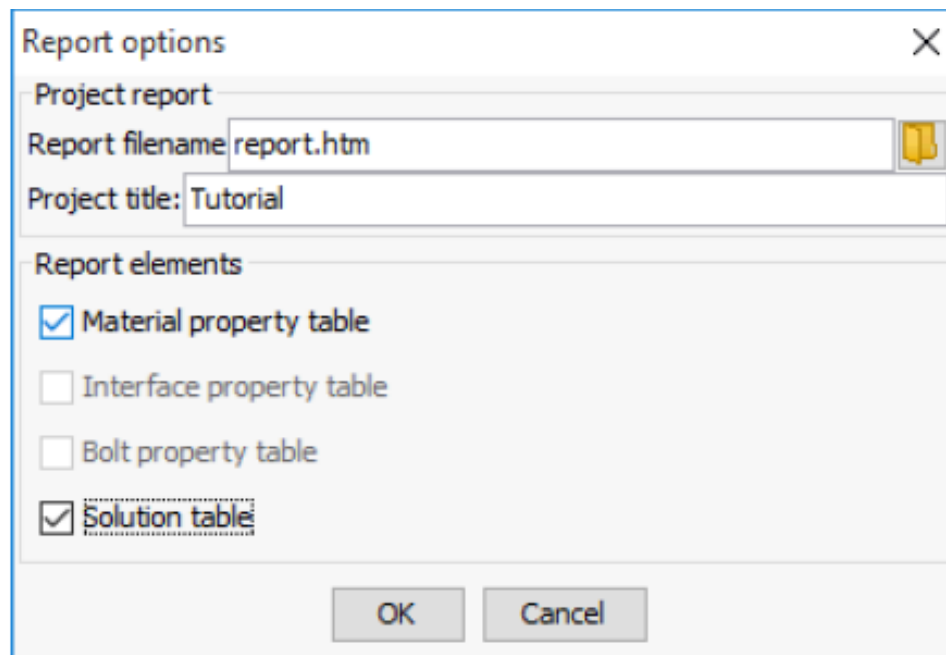


Εικόνα 59: Παράθυρο διαλόγου Print Setup. [21']



Εικόνα 60: Εκτυπώσιμη μορφή αποτελεσμάτων. [21']

Είναι επίσης δυνατό να δημιουργηθούν πίνακες που συνοψίζουν τα αποτελέσματα της μελέτης. Κάντε κλικ στο File >> Create Report γίνεται άνοιγμα του διαλόγου Report Options όπως φαίνεται στην Εικόνα 65. Από εκεί δίνεται η δυνατότητα να εμφανιστούν σε πίνακα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας αλλά και οι ιδιότητες των υλικών των μοντέλων.(Εικόνα 66)



Εικόνα 65: Απεικόνιση Διαλόγου Report Options. [21’]

Project file: slope.psl
Project title: Tutorial

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.
upper soil	1500.0	5000.0	0.0	20.0	0.0
lower soil	1800.0	10000.0	0.0	25.0	0.0

Factor of Safety						
Project	Model	Material Type	Shape	Mesh	Switches	FOS
slope	Model_1	Mohr-Coulomb	Simple Slope	Medium	fc	1.62
slope	Model_2	Mohr-Coulomb	Simple Slope	Medium	fc	1.45

Program: FLAC/Slope v8.0.427 & GISC/Slope v2.20.496
Created: Fri Oct 30 09:04:41 CDT 2015

Εικόνα 66: Απεικόνιση στοιχείων Πίνακα. [21’]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ FLAC SLOPE ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

4.1 Σύνοψη του μοντέλου

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση ενός υποθαλάσσιου πρανούς και έγινε διερεύνηση διάφορων συνθηκών ώστε να υπολογιστεί για κάθε ξεχωριστή περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του πρανούς. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι κρίσιμη όσο αφορά το σχεδιασμό και την υλοποίηση υποθαλάσσιων έργων υποδομής (π.χ. υποθαλάσσιοι αγωγοί, θαλάσσια αιολικά πάρκα και εξέδρες άντλησης ορυκτών καυσίμων) . Η προσομοίωση έγινε μέσω του προγράμματος Flac Slope. Κατασκευάστηκε ένα αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και με την τροποποίηση των παραμέτρων του προβλήματος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα: συντελεστή ασφαλείας (με τις εν δυνάμει επιφάνειες αστοχίας) και ο ρυθμός ανάπτυξης διατμητικής τάσης. Επισημαίνεται ότι η διακριτοποίηση που έγινε είναι μεσαίου μεγέθους (medium) με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού χρόνου εξαγωγής αποτελεσμάτων.

4.2 Χαρακτηριστικά του μοντέλου

Στη συνέχεια αναλύονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Το μοντέλο έχει μήκος πυθμένα ίσο με 380 μέτρα, η κλίση των στρωμάτων είναι 12° με την πρώτη παρειά να έχει ύψος 120 μέτρων ενώ η δεύτερη έχει ύψος 60 μέτρων ενώ εκατέρωθεν του επικλινούς τμήματος συνυπάρχουν επίπεδες στρώσεις εδάφους 50 μέτρων. Η στάθμη του νερού βρίσκεται 120 μέτρα ψηλότερα από το ψηλότερο σημείο της στρωματογραφίας. Η συγκεκριμένη επιλογή των χαρακτηριστικών έγινε μετά από δοκιμές που έδειξαν ότι επιλέγοντας την μεσαία διακριτοποίηση τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας δεν διέφεραν παρά ελάχιστα (σε τάξη δεύτερου δεκαδικού) όταν υπήρξε διεύρυνση της γεωμετρικής κλίμακας του μοντέλου.

Εξαρχής ο σκοπός ήταν να ευρεθεί το γεωμετρικό πλαίσιο του μοντέλου με τις ελάχιστες διαστάσεις (ελάχιστος υπολογιστικός χρόνος) που δίνει ταυτόχρονα

αξιόπιστα αποτελέσματα. Η κλίση των 12° είναι μία κλίση σχετικά μεγάλη αλλά ρεαλιστική για δεδομένα θαλάσσιου πυθμένα. Επιπροσθέτως υπάρχουν ιστορικά δεδομένα που υποδεικνύουν τη ύπαρξη κατολισθήσεων με την συγκεκριμένη κλίση [7]. Επιπλέον ύστερα από δοκιμές προέκυψε ότι στην κλίση των 12 μοιρών ο συντελεστής ασφαλείας (ανάλογα και στην στρωματογραφία) βρίσκεται στην κλίμακα 1,50 - 2,00, πλησίον δηλαδή του 1,00 που αποτελεί τον κρίσιμο συντελεστή ασφαλείας στο όριο αστοχίας και ισορροπίας του πρανούς. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων των προγενέστερων δοκιμών. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές (παραμετροποίηση κλίσεων) έγιναν για διστρωματικό μοντέλο (άργίλο με οργανικά πρόσμεικτα στην-άνω στρώση & άργιλο υψηλής πλαστικότητας – κάτω στρώση) με πάχος άνω στρώματος 20 μέτρα και λαμβάνοντας υπόψιν και το φορτίο της ανεμογεννήτριας. Σε μοντέλο με ίδια χαρακτηριστικά έγινε και η ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό την επιλογή της κατάλληλης διακριτοποίησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΚΛΙΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ + ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
12	1,78
15	1,34
16	1,22
17	1

Εικόνα 67: Πίνακας παραμετροποίησης κλίσεων για υπολογισμό συντελεστή ασφαλείας

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οριακή ισορροπία επέρχεται για πρανές με γωνία κλίσης ίση με 17°.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ		
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ + ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ)		
COARSE	MEDIUM	FINE
1,66	1,59	1,53

Εικόνα 68: Πίνακας παραμετροποίησης διακριτοποίησης για υπολογισμό συντελεστή ασφαλείας

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσο πυκνότερη γίνεται η διακριτοποίηση, τόσο μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας (περίπου 4% ανά βαθμίδα διακριτοποίησης). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πυκνότερη διακριτοποίηση, συνεπάγεται περισσότερες πιθανές επιφάνειες αστοχίας και άρα προκύπτει επιφάνεια με μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο σύνολο των αναλύσεων αφορούν τα συγκεκριμένα εδαφικά προφίλ με τις προκαθορισμένες ιδιότητες τους. Δεν μπορεί να γίνει γενίκευση των αποτελεσμάτων και επίσης πιθανόν στα αποτελέσματα να εμπεριέχονται κάποια σφάλματα λόγω των συννοριακών συνθηκών του μοντέλου.



Εικόνα 69: Γεωμετρικό προσομοίωμα μοντέλου

4.3 Τυπικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια της προσομοίωσης επιλέχθηκε ως επιπρόσθετο φορτίο στα ήδη στατικά, το βάρος μίας πλωτής ανεμογεννήτριας.

4.3.1 Πλωτές ανεμογεννήτριες

Η τεχνολογία των πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων εξελίσσεται συνεχώς και η διάδοσή τους είναι διαρκώς αυξανόμενη, ενώ θεωρείται η πλέον κατάλληλη και για την περίπτωση της Ελλάδας. [C]

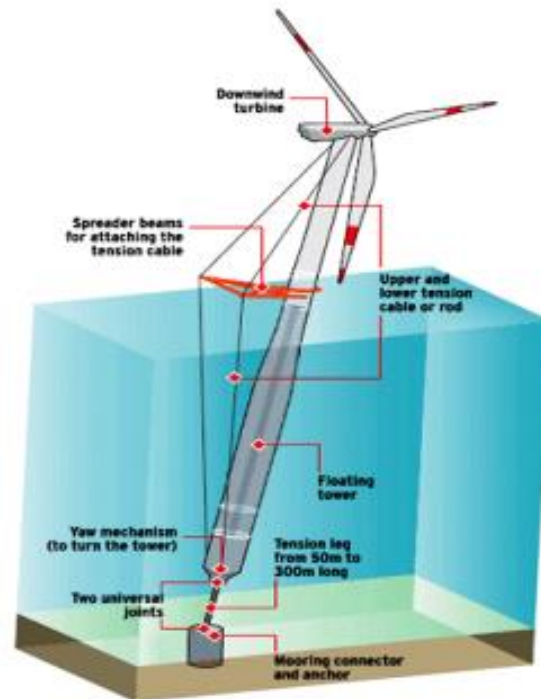
Μέχρι πρότινος η πλειονότητα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων κατασκευάζονταν με χρήση ανεμογεννητριών «σταθερού πυθμένα», με βάση στερεωμένη στον πυθμένα της θάλασσας. Παρόλο αυτά, η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών είναι εφικτό να γίνει σε μια πλωτή πλατφόρμα η οποία με την σειρά της είναι στερεωμένη στον πυθμένα με διάφορες διατάξεις (συρματόσχοινα , κυλινδρικά πλαίσια κ.α.). Κατά αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη πλωτών ανεμογεννητριών σε πολύ μεγαλύτερα βάθη σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες σταθερού πυθμένα. Στην εικόνα 69 παρακάτω παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό πλωτό υπεράκτιο αιολικό πάρκο. [C]



Εικόνα 70: Ενδεικτικό πλωτό αιολικό πάρκο.[22’]

FLOATING ASSETS

Sway's floating foundation that can tilt to reduce stress



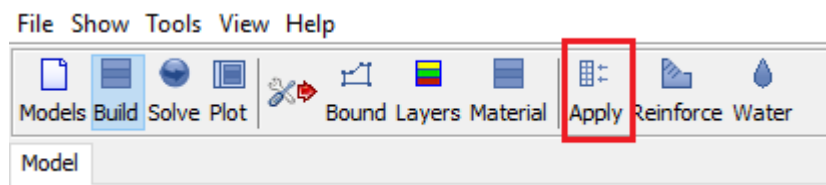
Εικόνα 71: Ενδεικτικό μοντέλο πλωτής ανεμογεννήτριας [23']

Το συγκεκριμένο σύστημα θεμελίωσης (Sway's floating foundation) έχει την ιδιότητα ελαφράς μετατόπισης ώστε να μειώνεται η καταπόνηση του πυλώνα. Ο συγκεκριμένος τύπος έχει δυνατότητα θεμελίωσης σε μεγάλα βάθη που είναι και το ζητούμενο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα. Έχουν μελετηθεί θεμελιώσεις τέτοιου τύπου για γεννήτρια ισχύος έως 10MW. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου, για γεννήτρια ισχύος 5 MW είναι: μήκος κυλινδρικού τμήματος (πλωτός πύργος) που επιπλέει 120 μέτρα και έχει διάμετρο από 6,5 έως 9,4 μέτρα γιατί είναι κωνικό. Η διάμετρος του θεμελίου που βρίσκεται στο βυθό ισούται 5,2 μέτρα και τα συρματόσχοινα που προσδένουν τον κυλινδρικό πλωτό πύργο με το θεμέλιο έχουν διάμετρο 0,09 μέτρα. Η συνολική μάζα του θεμελίου προσεγγίζει τους 7.000 τόνους. Βάσει των παραπάνω συνθηκών στο μοντέλο η δύναμη επιρροής της ανεμογεννήτριας ισούται με $8 \cdot 10^7$ N [12].

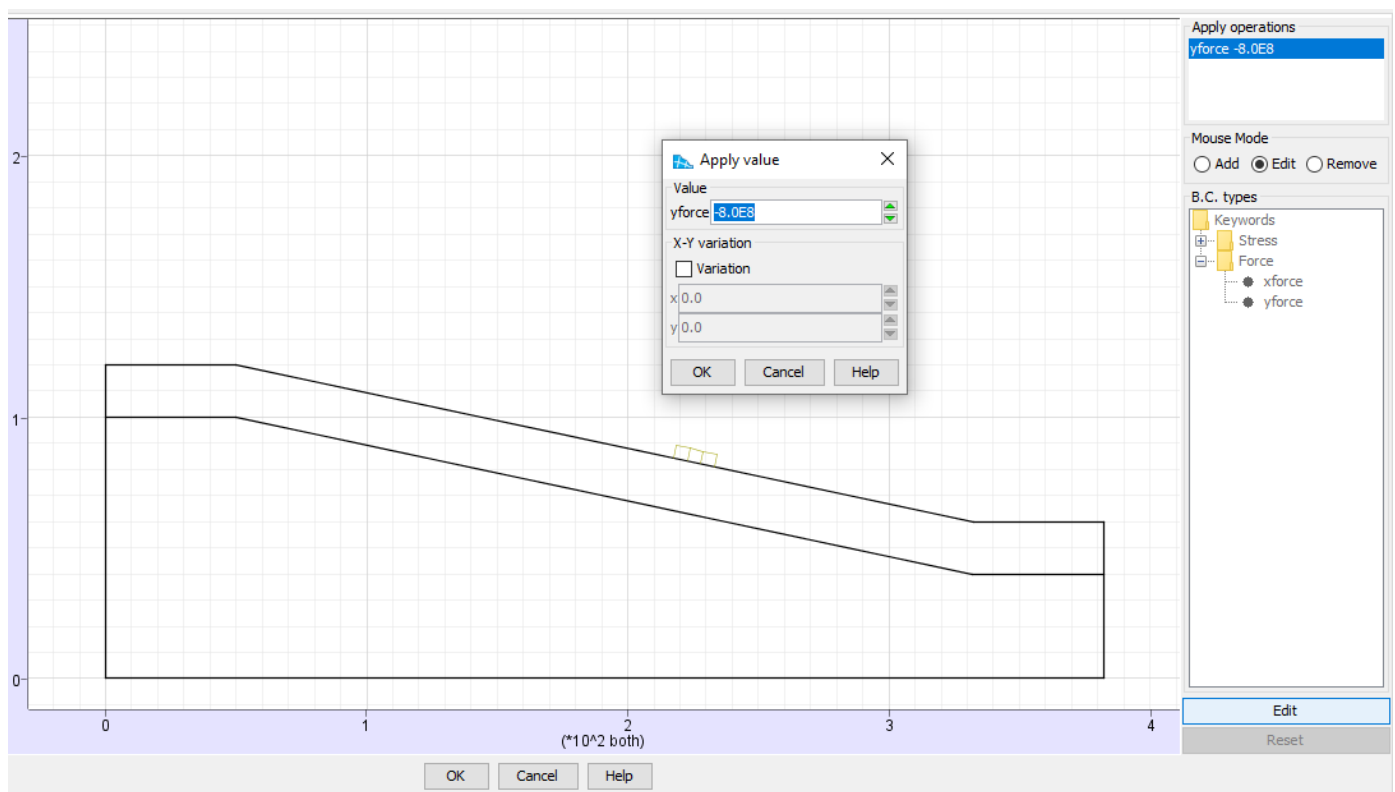
4.3.2 Τρόπος εφαρμογής φορτίου ανεμογεννήτριας στο μοντέλο του Flac Slope

Είναι εφικτή η εφαρμογή σημειακών φορτίων και τοπικών τάσεων κατά μήκος μιας επιφάνειας κλίσης επιλέγοντας το κουμπί Apply στη γραμμή εργαλείων Build (Εικόνα 71). Αυτό ανοίγει το εργαλείο Apply, όπως φαίνεται στην Εικόνα 72.

Διάφορες μορφές φορτίων μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοστούν στην επιφάνεια της πλαγιάς. Οι τύποι φορτίων παρατίθενται σε μια πτυσσόμενη δομή δέντρου στο δεξί μέρος του παραθύρου. Για να εφαρμοστεί ένα συγκεκριμένο φορτίο, επιλέγεται η επιθυμητή φόρτιση στο δέντρο και στη συνέχεια σύρεται το ποντίκι πάνω από το τμήμα του ορίου στο οποίο επιθυμούμε να εφαρμόσουμε το φορτίο.



Εικόνα 72: Γραμμή εργαλείων για επιλογή φορτίου



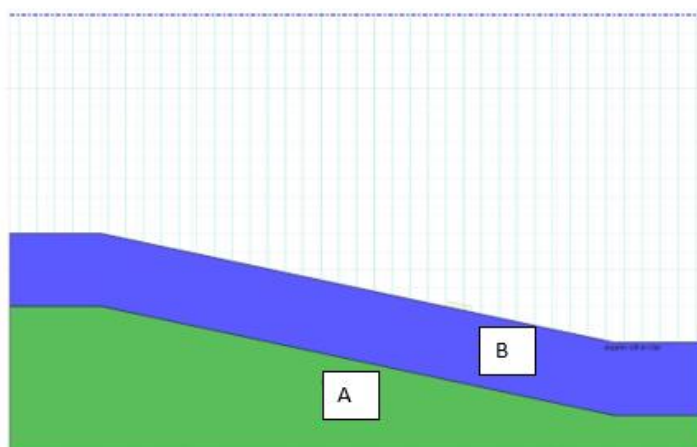
Εικόνα 73: Προσθήκη φορτίου στο Flac Slope

4.4 Παραμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου

Οι παραμετρικοί παράγοντες που αναλύθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι εξής:

- 1) Ύπαρξη 2 στρωμάτων με παραμετροποίηση:
 - a) του πάχους του άνω στρώματος
 - b) της ύπαρξης ή μη φορτίου από ανεμογεννήτρια
 - c) των εδαφικών (ή βραχωδών) υλικών των 2 στρωμάτων
- 2) Ύπαρξη 3 στρωμάτων με παραμετροποίηση:
 - a) του πάχους του ενδιάμεσου στρώματος
 - b) της ύπαρξης ή μη φορτίου από ανεμογεννήτρια
 - c) των εδαφικών (βραχωδών) υλικών των 2 στρωμάτων
- 3) Ψευδοστατική ανάλυση

4.4.1 Ύπαρξη 2 στρωμάτων

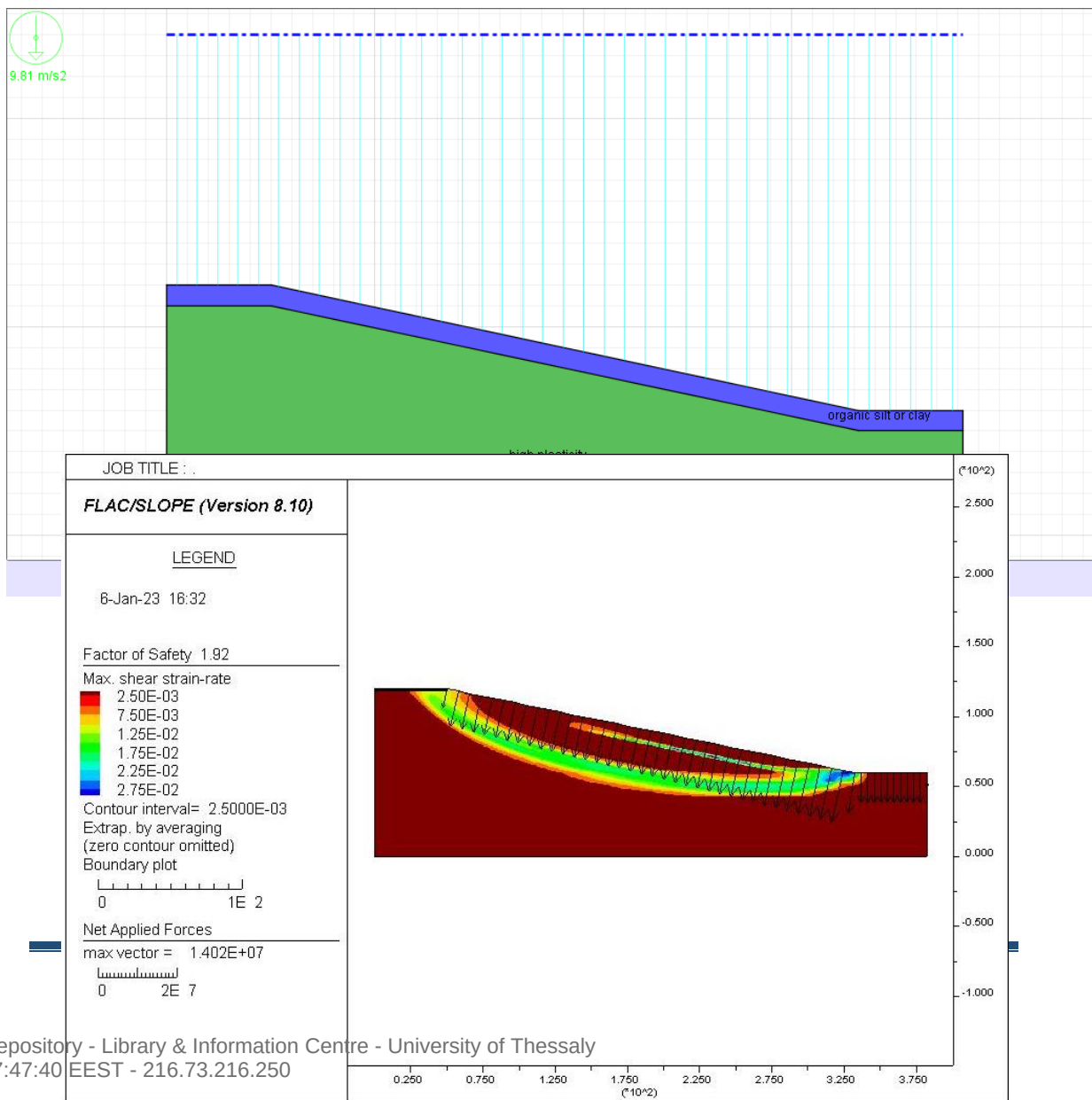


Στην εικόνα 74 απεικονίζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών στην περίπτωση εξέτασης του μοντέλου για 2 στρώματα. Το υλικό που βρίσκεται στην επάνω στρώση είναι άργιλος με οργανική ιλύ (clay: organic silt) ενώ στη κάτω στρώση είναι άργιλος υψηλής πλαστικότητας (clay: high plasticity). Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των συντελεστών ασφαλείας για σενάριο που τροποποιεί το πάχος της άνω στρώσης σε κάθε περίπτωση ή και προσθέτει το φορτίο της ανεμογεννήτριας.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΙΛΥ (B)	ΑΡΓΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (A)
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΑΚΟΡΕΣΤΟ (kg/m³)	1550	1650
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ (kg/m³)	2050	2150
ΣΥΝΟΧΗ (kPa)	7	10
ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (degrees)	15	17

Εικόνα 74: Πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών των 2 στρωμάτων

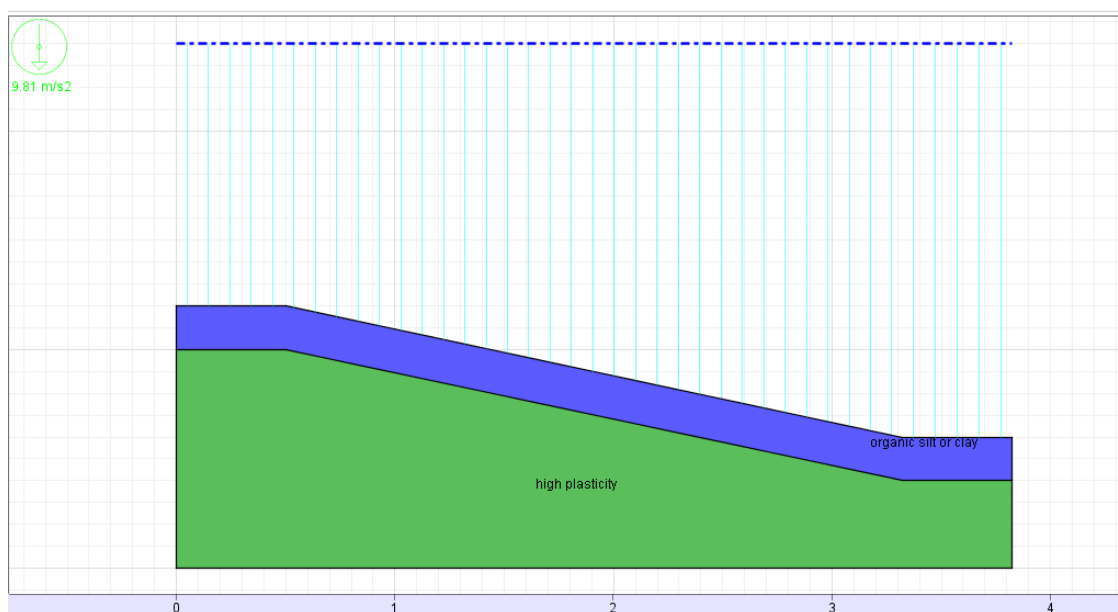
- Πάχος άνω στρώματος (B) 10 μέτρα



Εικόνα 75: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα-
10 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται ο χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας τόσο στο κατώτερο στρώμα, όσο και στην διεπιφάνεια των 2 στρωμάτων.

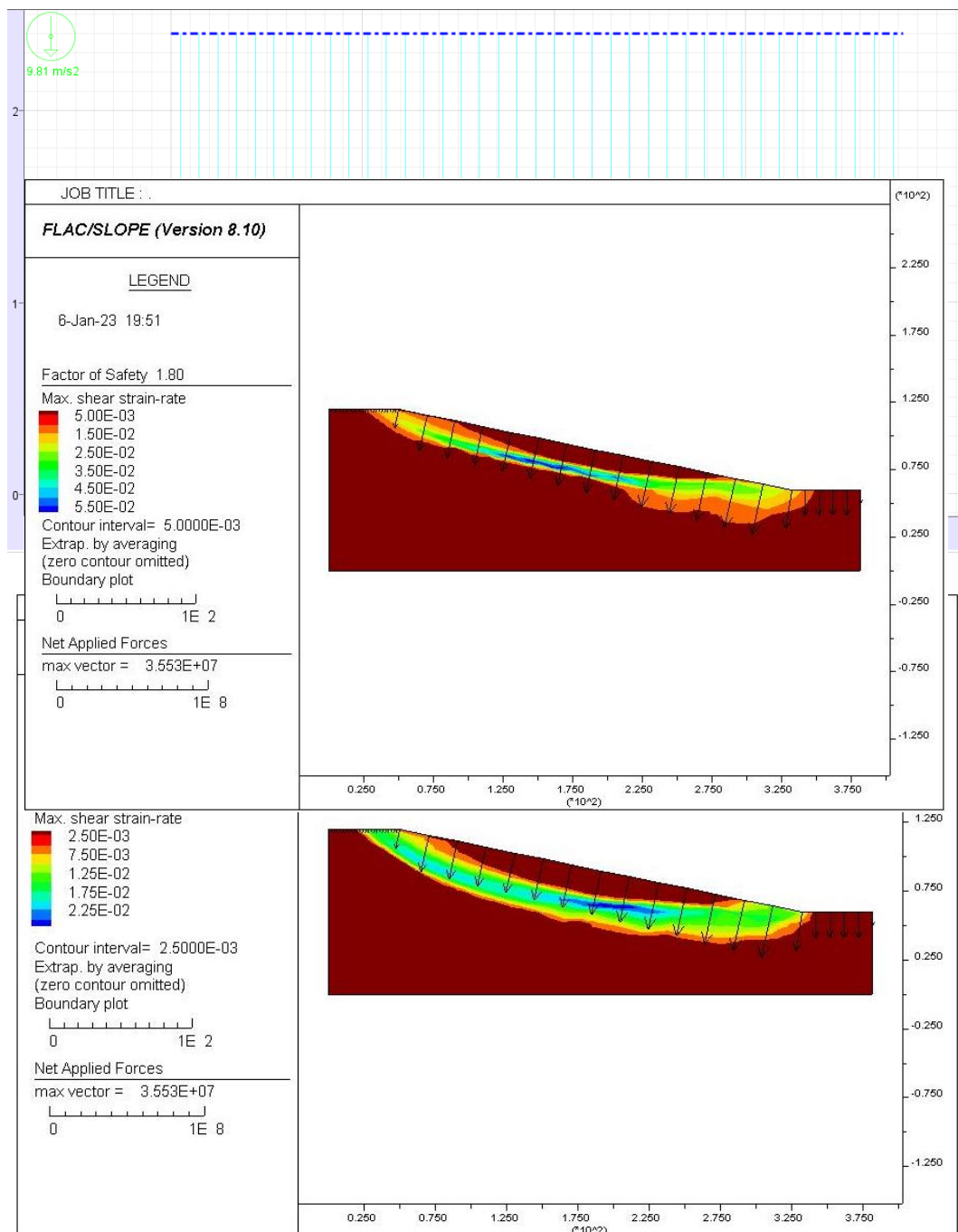
- Πάχος άνω στρώματος (B) 20 μέτρα



Εικόνα 76: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα-20 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας με την αύξηση του πάχους του άνω στρώματος. Επιπλέον αυτός συναντάται στην διεπιφάνεια των 2 στρωμάτων.

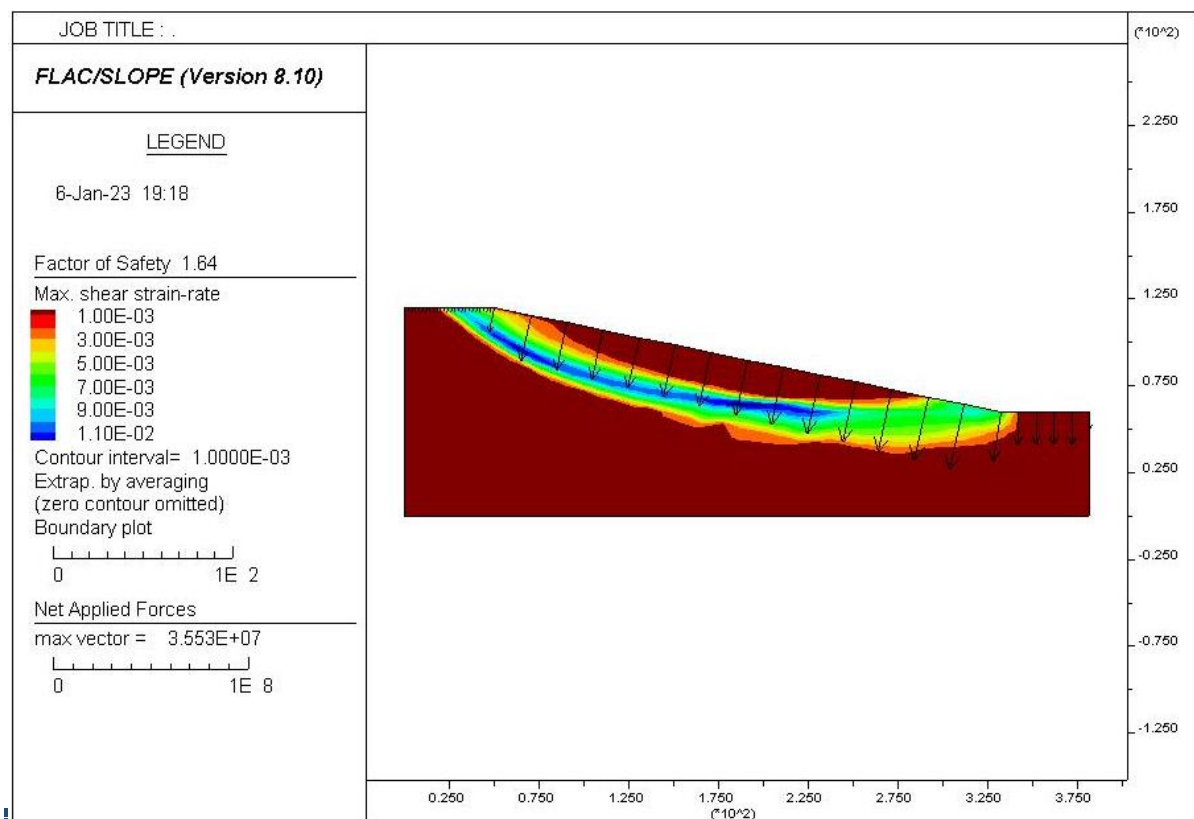
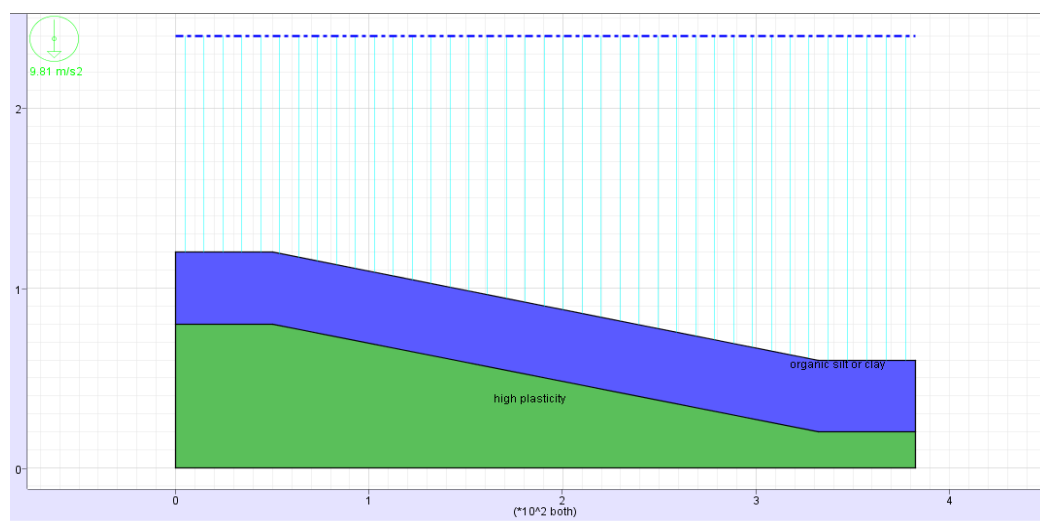
- Πάχος άνω στρώματος (B) 30 μέτρα



Εικόνα 77: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα-30 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων ο συντελεστής ασφαλείας εξακολουθεί να μειώνεται με την αύξηση του πάχους του άνω στρώματος. Επιπλέον συναντάται στην διεπιφάνεια των 2 στρωμάτων.

- Πάχος άνω στρώματος (B) 40 μέτρα

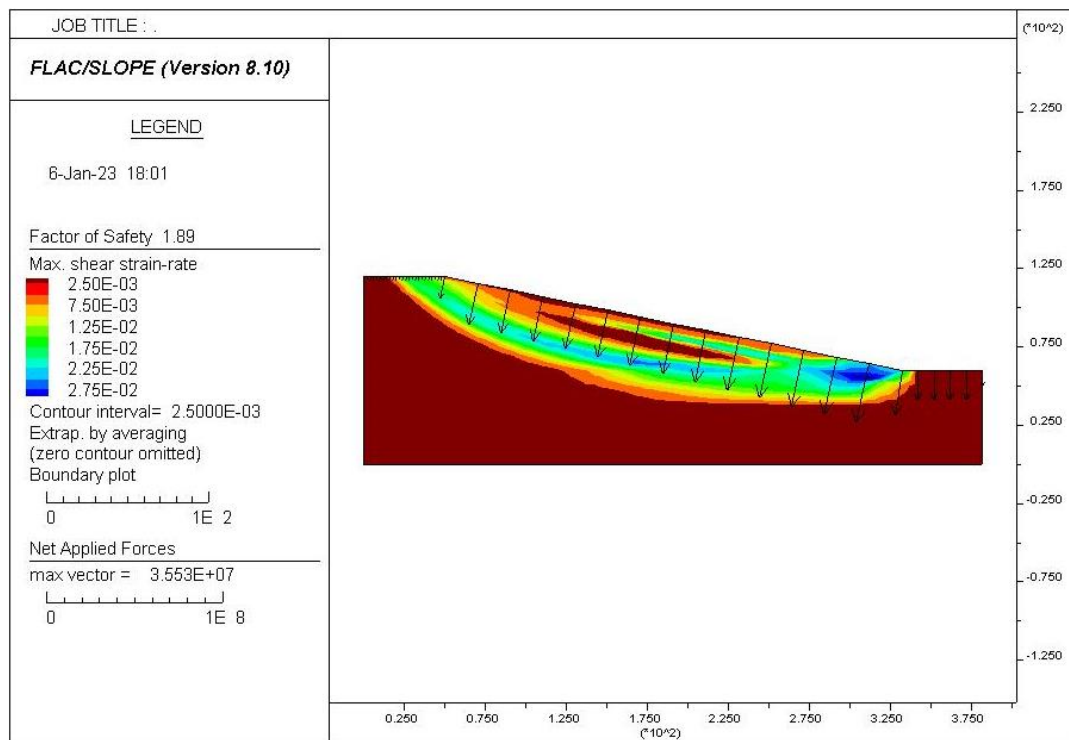
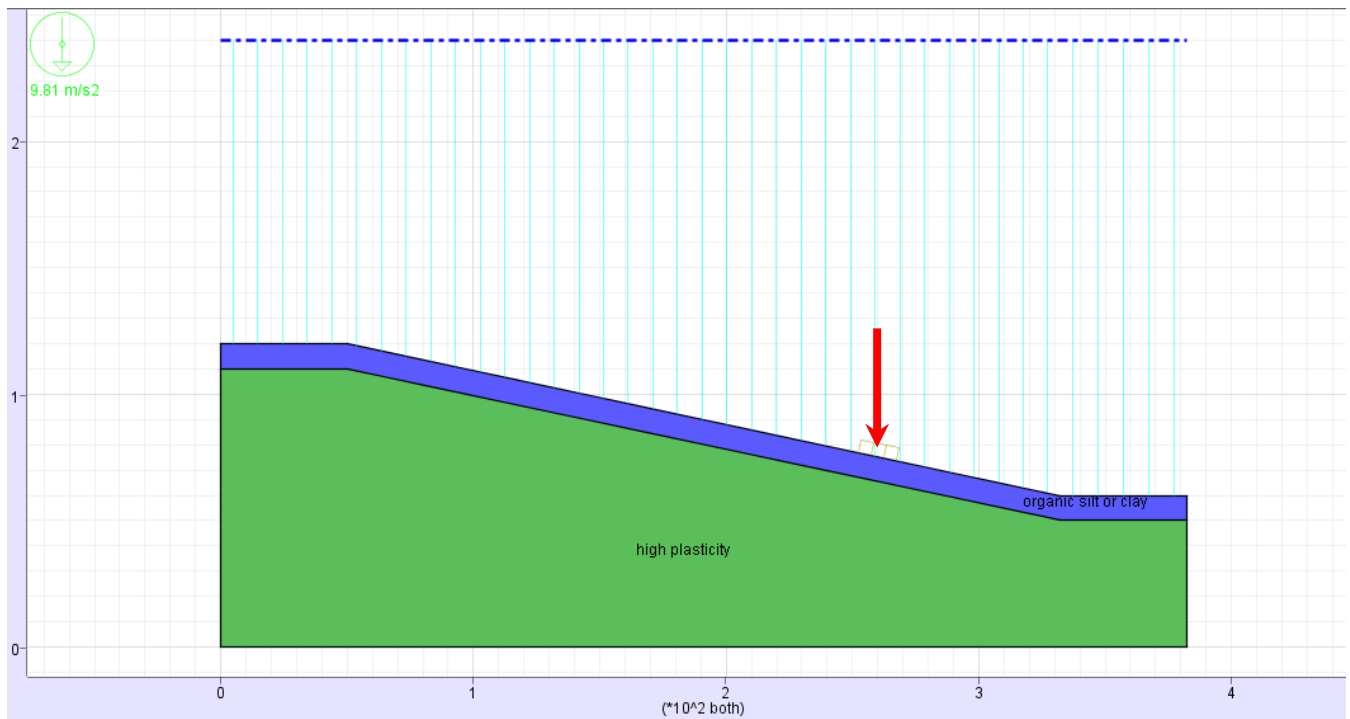


Εικόνα 78: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα-30 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων ο συντελεστής ασφαλείας αρχίζει να σταθεροποιείται στην τιμή 1,64 και να συναντάται σε ένα συγκεκριμένο βάθος από την επιφάνεια του πρανούς. Δηλαδή η αύξηση του πάχους του άνω στρώματος δεν επηρεάζει τον FoS.



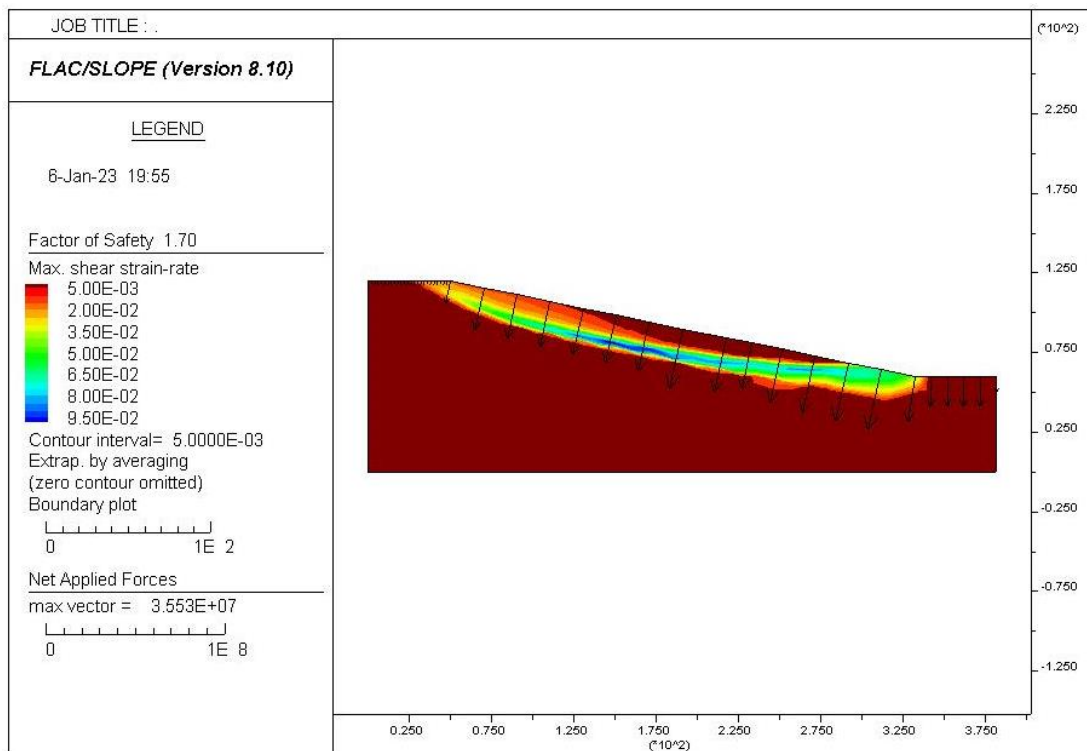
- Πάχος άνω στρώματος (B) 10 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 79: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα +Φορτίο Ανεμογεννήτριας - 10 μέτρα)

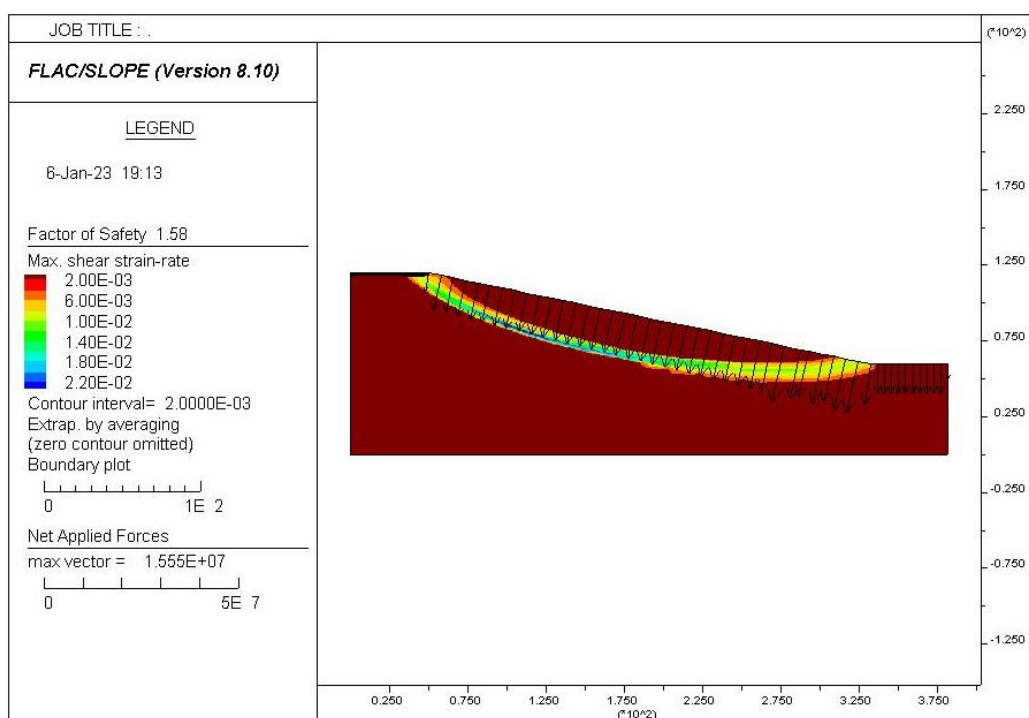
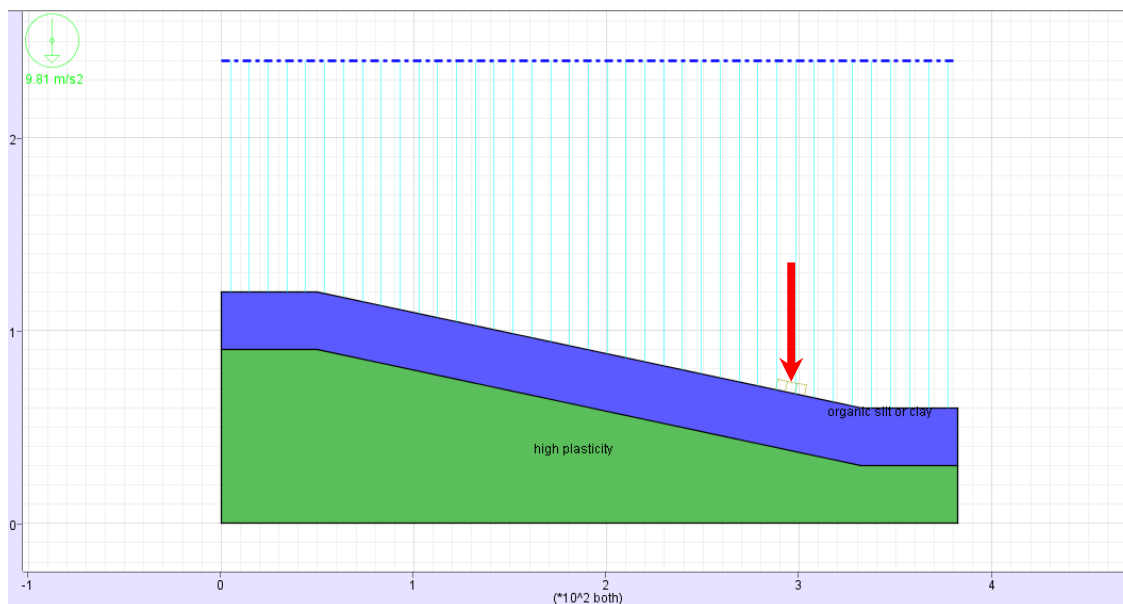
Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας με την ύπαρξη του φορτίου της ανεμογεννήτριας 1,89(<1,92). Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο.

- Πάχος άνω στρώματος (B) 20 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



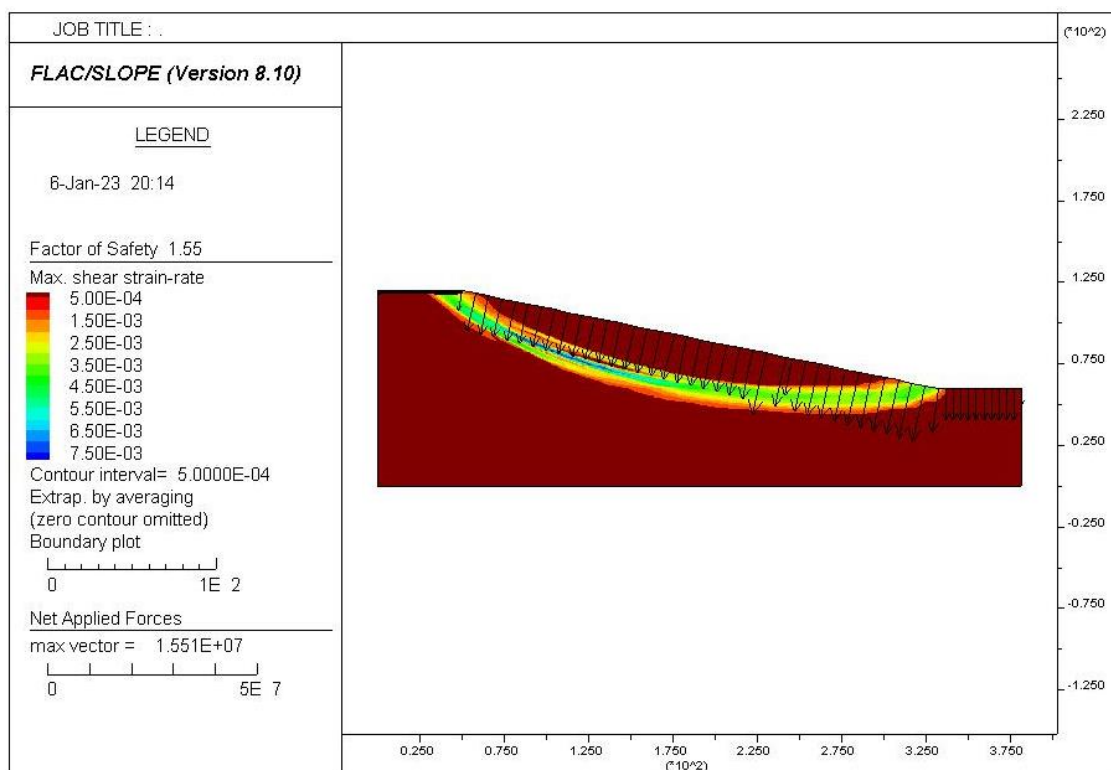
Εικόνα 80: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας - 20 μέτρα)

- Πάχος άνω στρώματος (B) 30 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 81: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας - 30 μέτρα)

- Πάχος άνω στρώματος (B) 40 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 82: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας- 40 μέτρα)

Τα αποτελέσματα προδίδουν ότι με τη αύξηση του πάχους του άνω στρώματος αλλά και με την ύπαρξη του φορτίου της ανεμογεννήτριας ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται μέχρι κάποιο συγκεκριμένο πάχος του άνω

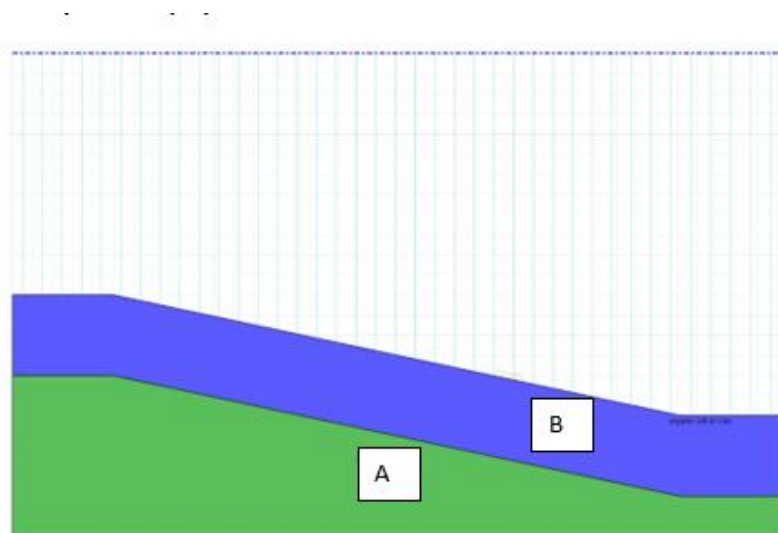
στρώματος (30 μέτρα). Στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του πάχους δεν το επηρεάζει και τον διατηρεί σταθερό.

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	
ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ(ΜΕΤΡΑ)	ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ	ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ + ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
10	1,92	1,89
20	1,80	1,70
30	1,64	1,58
40	1,64	1,55

Εικόνα 83: Πίνακας με συνοπτικά αποτελέσματα σενάριο 2 στρώσεων με παραμετροποίηση του πάχους άνω στρώματος και την ύπαρξη ή μη φορτίου ανεμογεννήτριας

Ως γενική διατύπωση μπορεί να ειπωθεί ότι θεωρείται φυσιολογική η κλιμάκωση των αποτελεσμάτων του συντελεστή ασφαλείας με την αύξηση του πάχους του άνω στρώματος . Ειδικότερα η αύξηση του πάχους του άνω στρώματος (μικρότερη συνοχή και γωνία τριβής από το κάτω στρώμα) συνεπάγεται μειωμένη αντοχή για το σύνολο της στρωματογραφίας. Επιπλέον είναι αναμενόμενο να μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας όταν προστίθεται το φορτίο της ανεμογεννήτριας.

- **Εδαφικοί συνδυασμοί υλικών των 2 στρωμάτων**



Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε ένα σύνολο εδαφικών συνδυασμών εκτός του **V0** με σκοπό να διερευνηθεί ο συνδυασμός που αποδίδει τον δυσμενέστερο συντελεστή ασφαλείας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται το σύνολο των συνδυασμών που μελετήθηκαν. Η μοντελοποίηση έγινε θεωρώντας σταθερό πάχος της άνω στρώσης ίση με 20 μέτρα και λαμβάνοντας υπόψιν το ίδιο βάρος των στρωμάτων πλέον της υδροστατικής πίεσης και του βάρους της ανεμογεννήτριας.

ΤΥΠΟΙ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΤΟΜΩΝ				
	V1	V2	V3	V0
B	Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας	Πηλίτης μέτριας έως υψηλής πλαστικότητας	Ομοιόμορφα αδρόκοκκη άμμος	Άργιλος με οργανική ιλύ
A	Σχιστόλιθος	Βράχος με αμμόπετρα	Ομοιόμορφο χαλίκι	Άργιλος υψηλής πλαστικότητας
	V4	V5	V6	
B	Άργιλος υψηλής πλαστικότητας	Άργιλος με οργανική ιλύ (Clay:Organic silt)	Ομοιόμορφα αδρόκοκκη άμμος	
A	Μείγμα χαλικιού και άμμου	Καλά διαβαθμισμένη Άμμος	Άργιλος μέσης πλαστικότητας	

Εικόνα 84: Πίνακας με το σύνολο των εδαφικών συνδυασμών για το διστρωματικό μοντέλο.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (20M)						
V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
1,70	2,53	2,72	3,66	2,09	1,78	2,22

Εικόνα 85: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας των εδαφικών συνδυασμών του διστρωματικού μοντέλου.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ως δυσμενέστερο συνδυασμό τον **V5** με συντελεστή ασφαλείας ίσο με **1,78**.

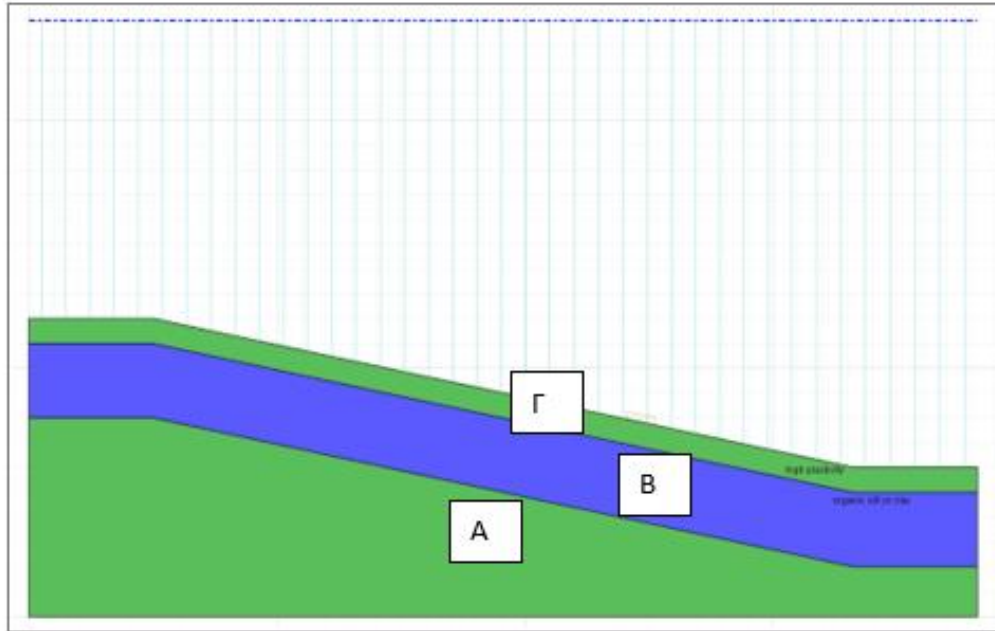
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ-V5(ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ)		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΙΛΥ	ΑΜΜΟΣ - ΚΑΛΑ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΗ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΑΚΟΡΕΣΤΟ (kg/m³)	1550	1800
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ -ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ (kg/m³)	2050	2300
ΣΥΝΟΧΗ (kPa)	7	0
ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (degrees)	15	33

Εικόνα 86: Πίνακας με τα εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου συνδυασμού.

4.4.2 Ύπαρξη 3 στρωμάτων

Στην εικόνα 87 απεικονίζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών στην περίπτωση εξέτασης του μοντέλου για 2 στρώματα. Το υλικό που βρίσκεται στην επάνω και κάτω στρώση είναι άργιλος με οργανικά πρόσμεικτα ενώ στην ενδιάμεση στρώση είναι άργιλος υψηλής πλαστικότητας. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση

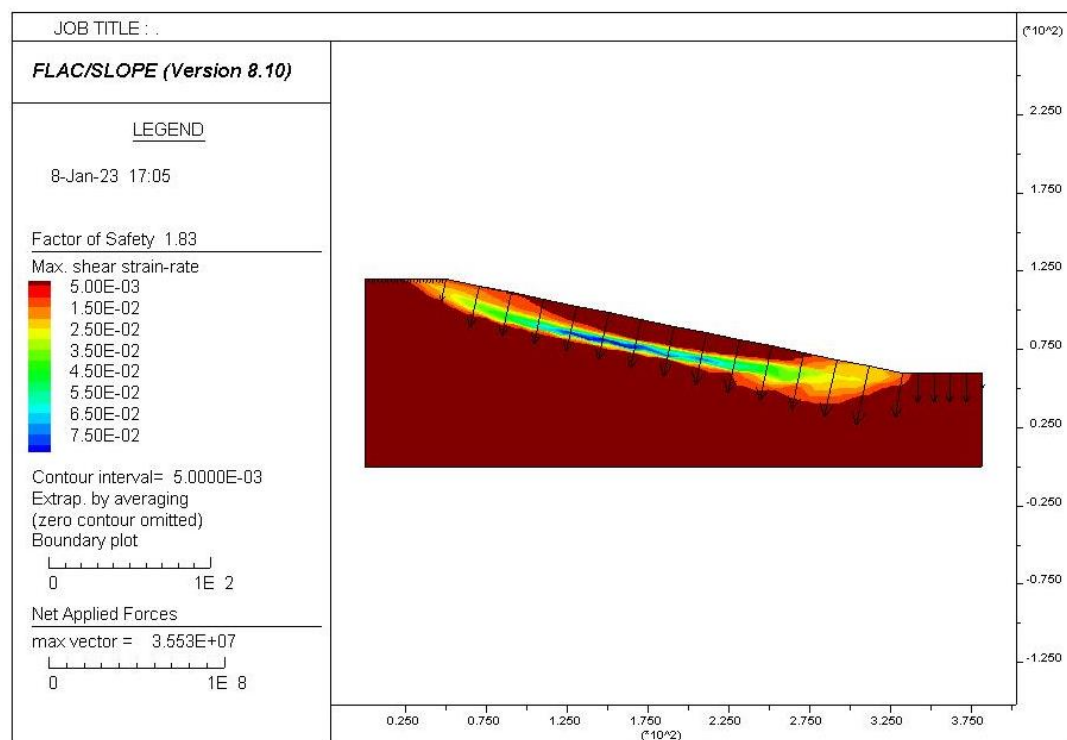
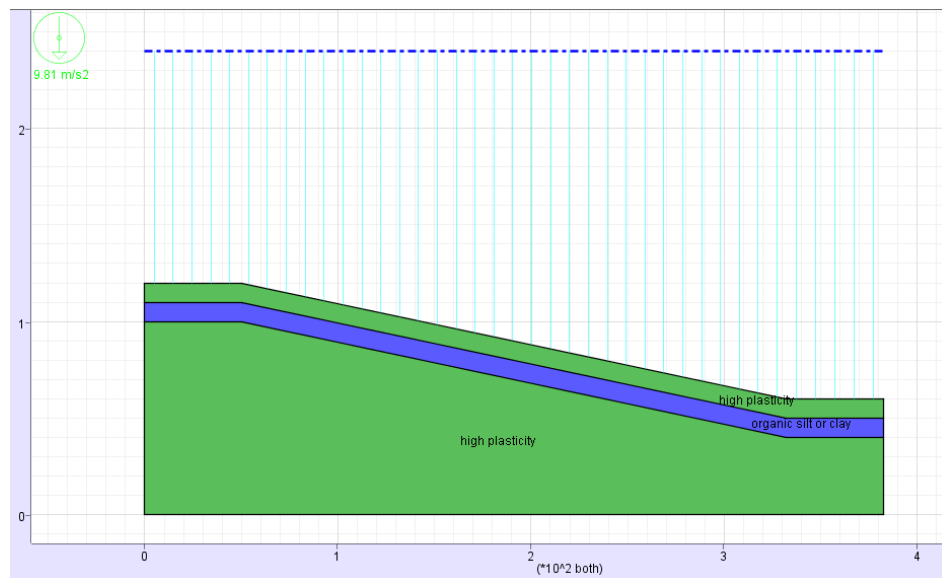
των αποτελεσμάτων των συντελεστών ασφαλείας για σενάριο που τροποποιεί το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης σε κάθε περίπτωση ή και προσθέτει το φορτίο της ανεμογεννήτριας.



ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΙΛΥ (Α,Γ)	ΑΡΓΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Β)
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΑΚΟΡΕΣΤΟ (kg/m ³)	1550	1650
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ (kg/m ³)	2050	2150
ΣΥΝΟΧΗ (kPa)	7	10
ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (degrees)	15	17

Εικόνα 87: Πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών των 3 στρωμάτων

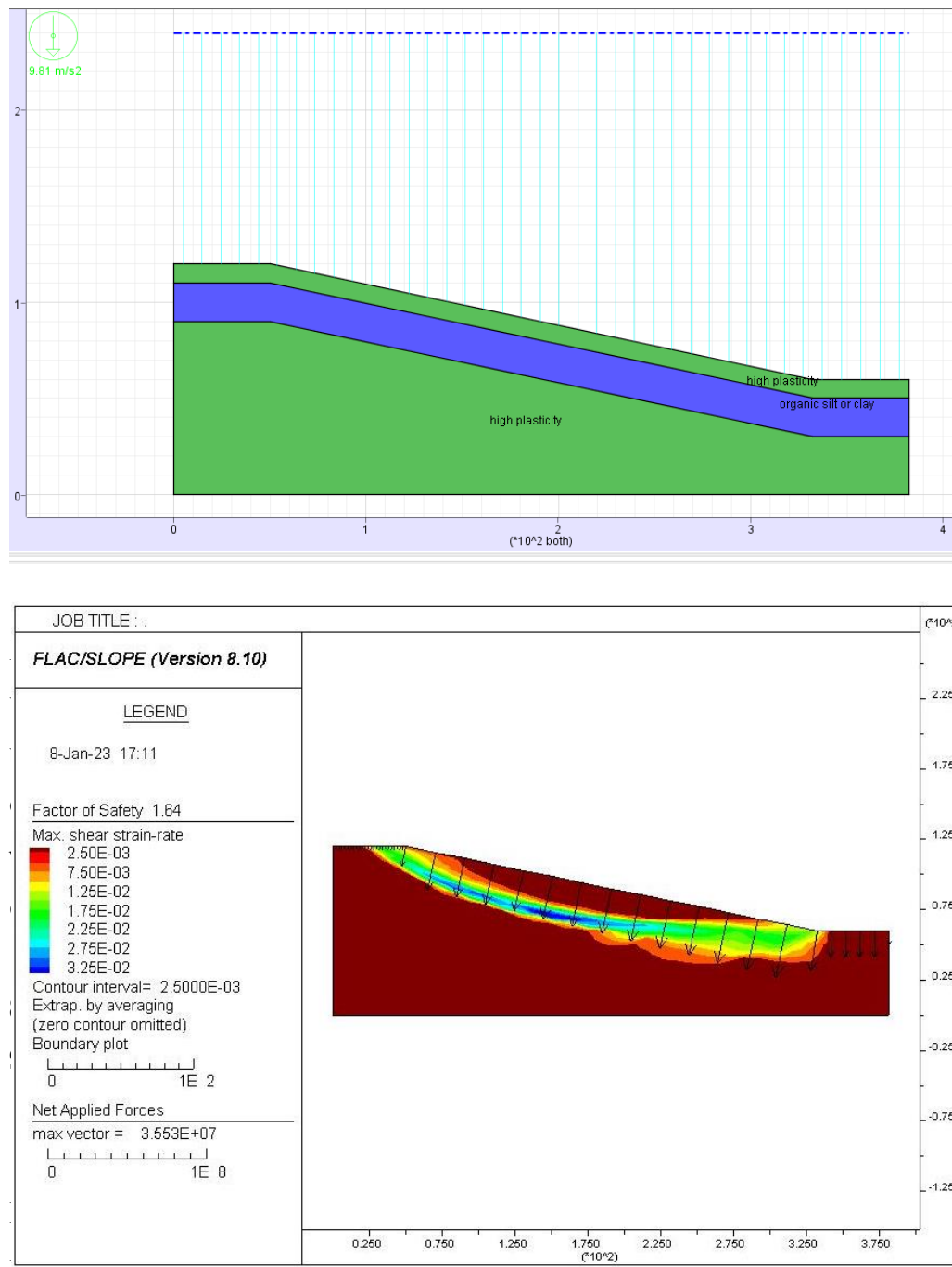
- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 10 μέτρα



Εικόνα 88: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 10 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται ο χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας στην διεπιφάνεια του ενδιάμεσου με το κάτω στρώμα.

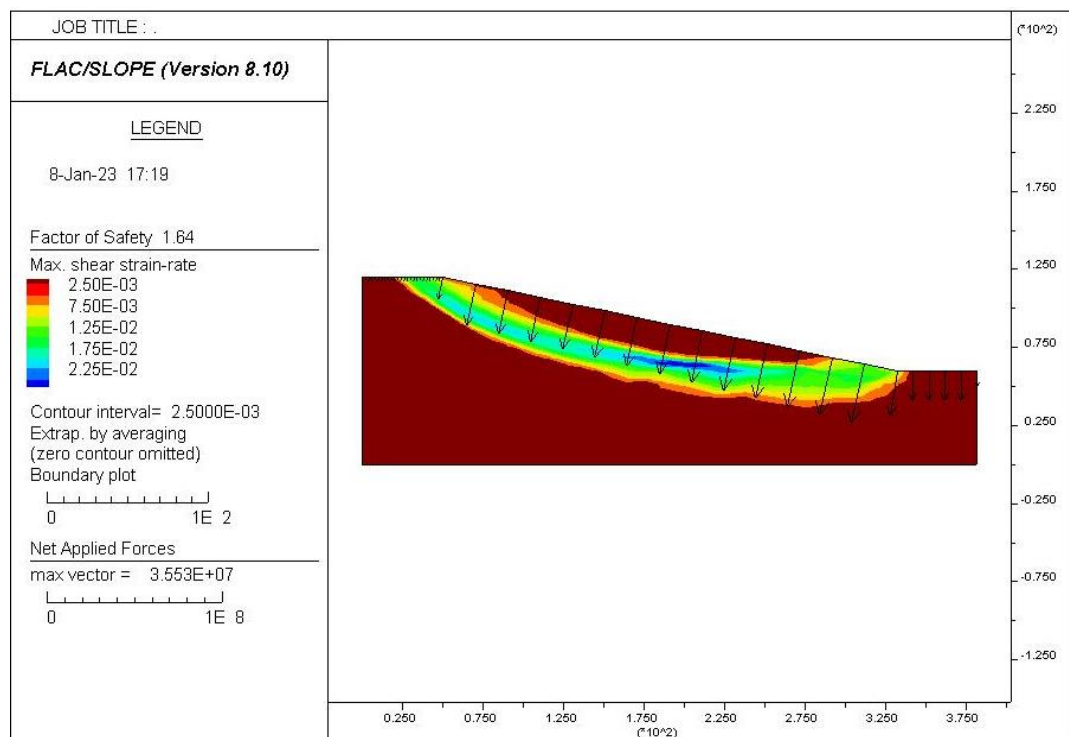
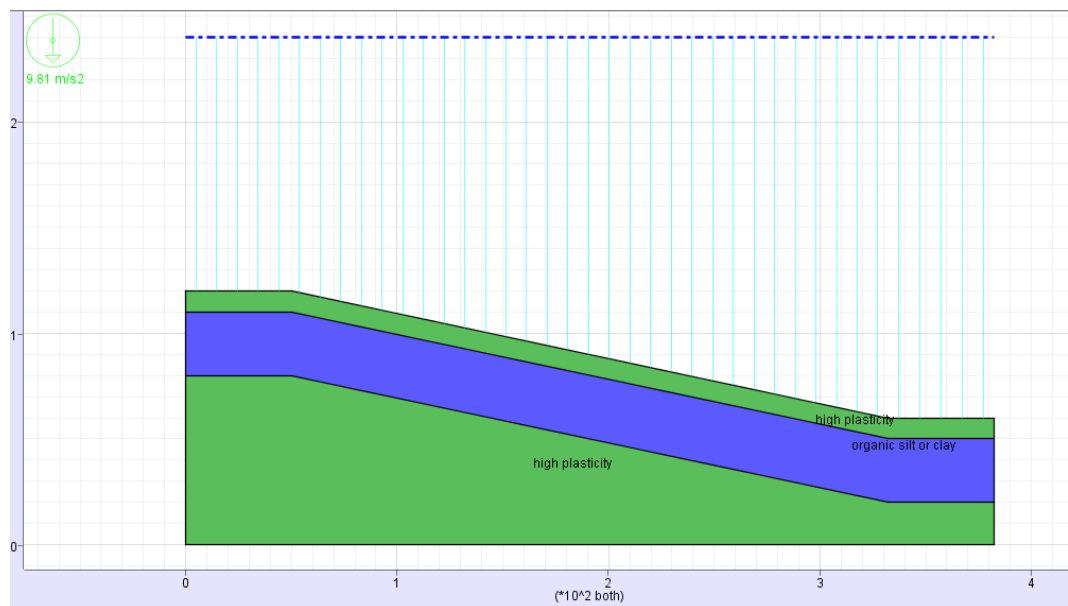
- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 20 μέτρα



Εικόνα 88: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 20 μέτρα)

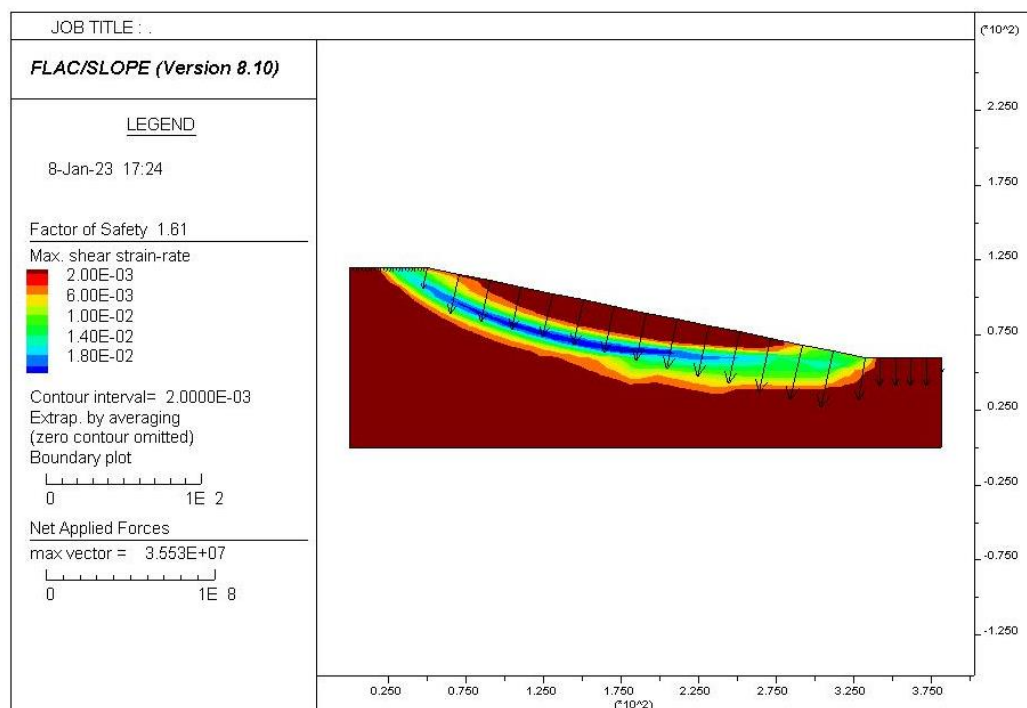
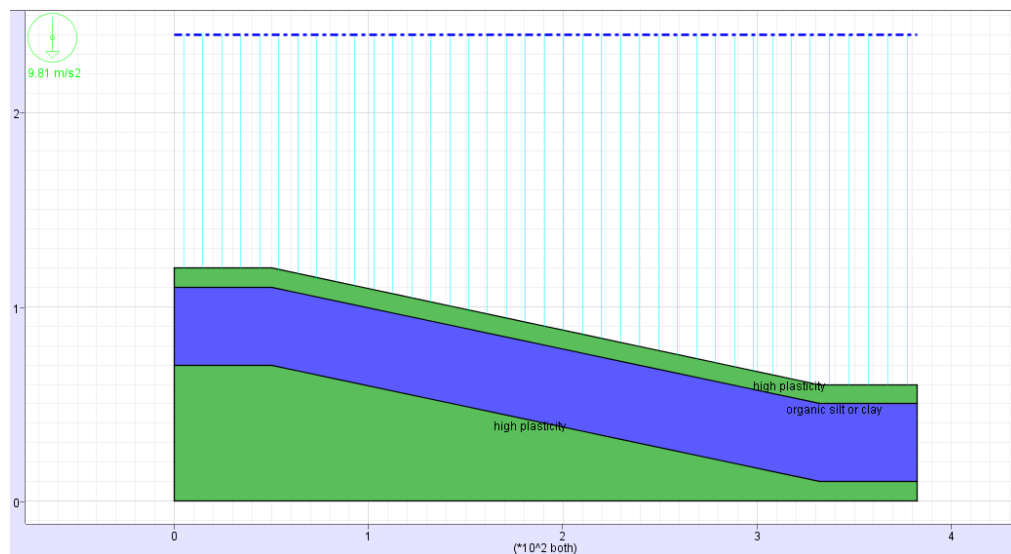
Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας με την αύξηση του πάχους ενδιάμεσου στρώματος. Επιπλέον αυτός εξακολουθεί να συναντάται στην διεπιφάνεια του ενδιάμεσου με το κάτω στρώμα.

- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 30 μέτρα



Εικόνα 90: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 30 μέτρα)

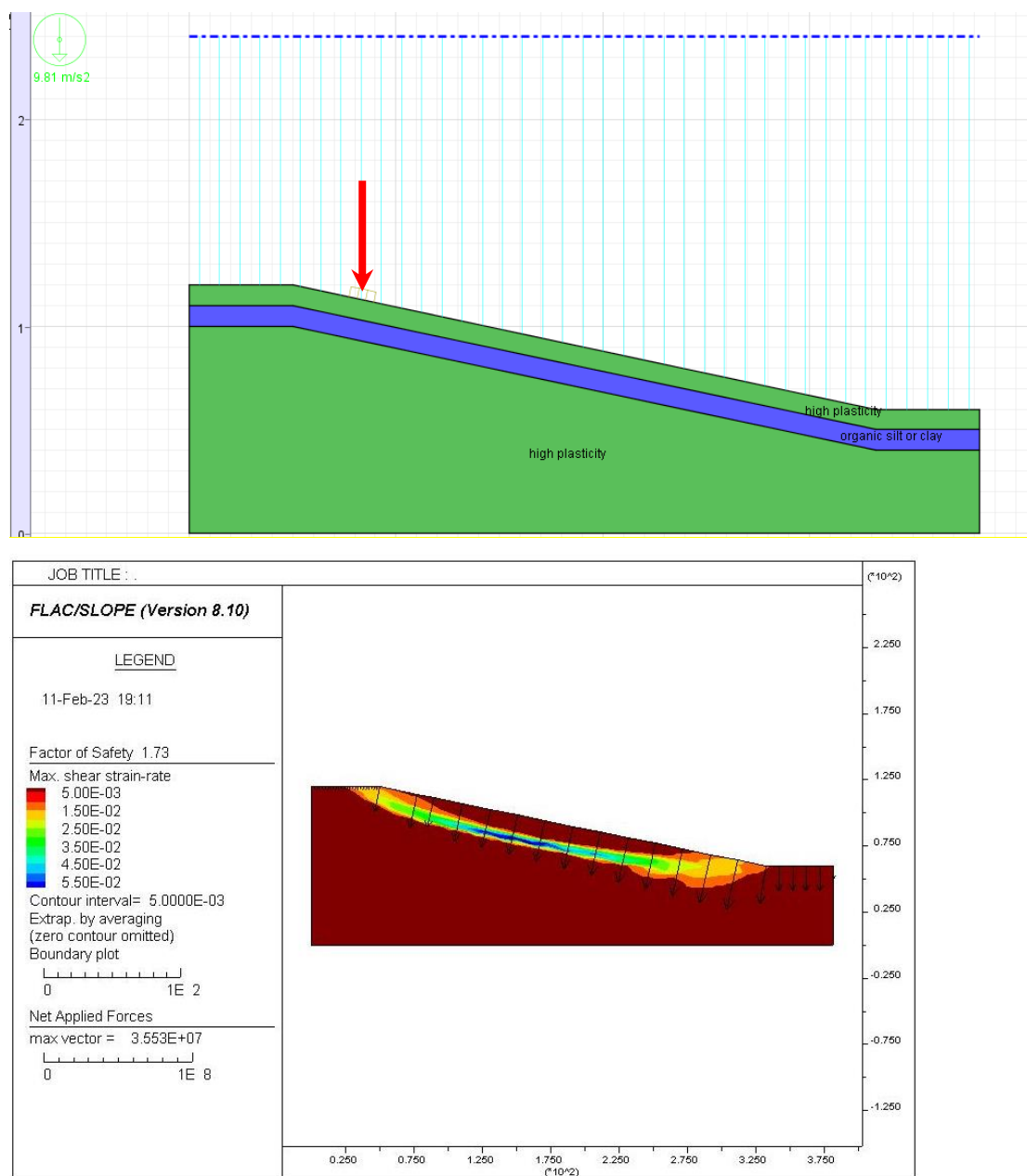
- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 40 μέτρα



Εικόνα 91: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 40 μέτρα)

Βάσει αποτελεσμάτων ο συντελεστής ασφαλείας αρχίζει να σταθεροποιείται στην τιμή 1,61 και να συναντάται σε ένα συγκεκριμένο βάθος από την επιφάνεια του πρανούς. Δηλαδή η αύξηση του πάχους του ενδιάμεσου στρώματος δεν επηρεάζει τον FOS.

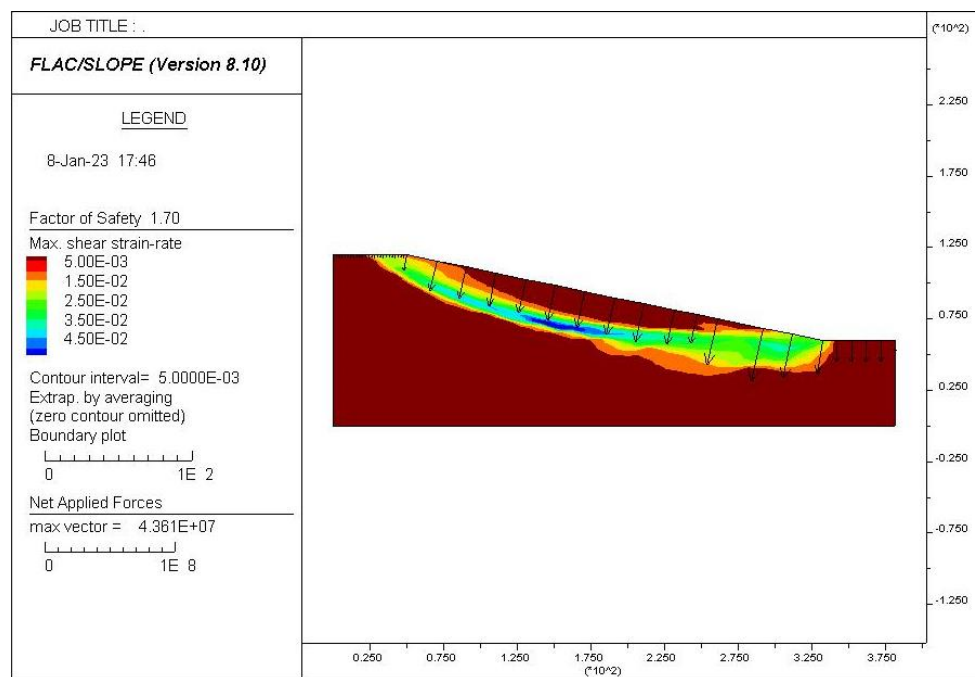
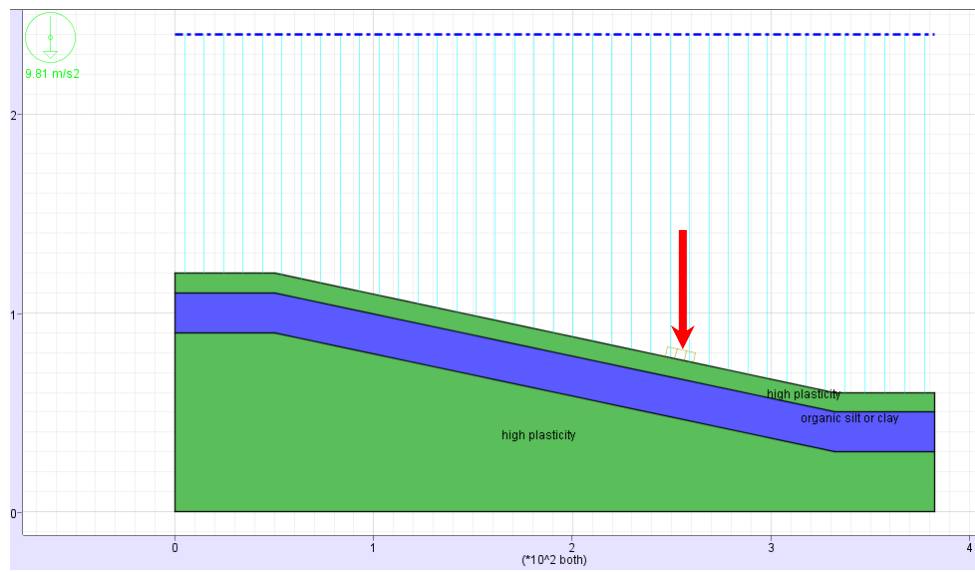
- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 10 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 92: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα -10 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας)

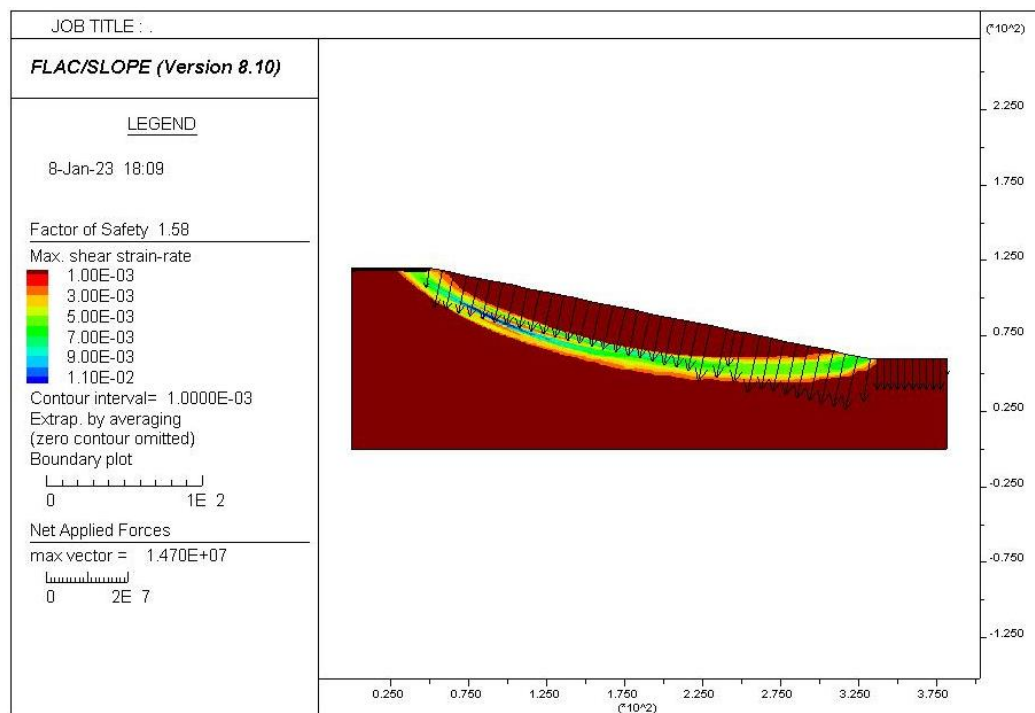
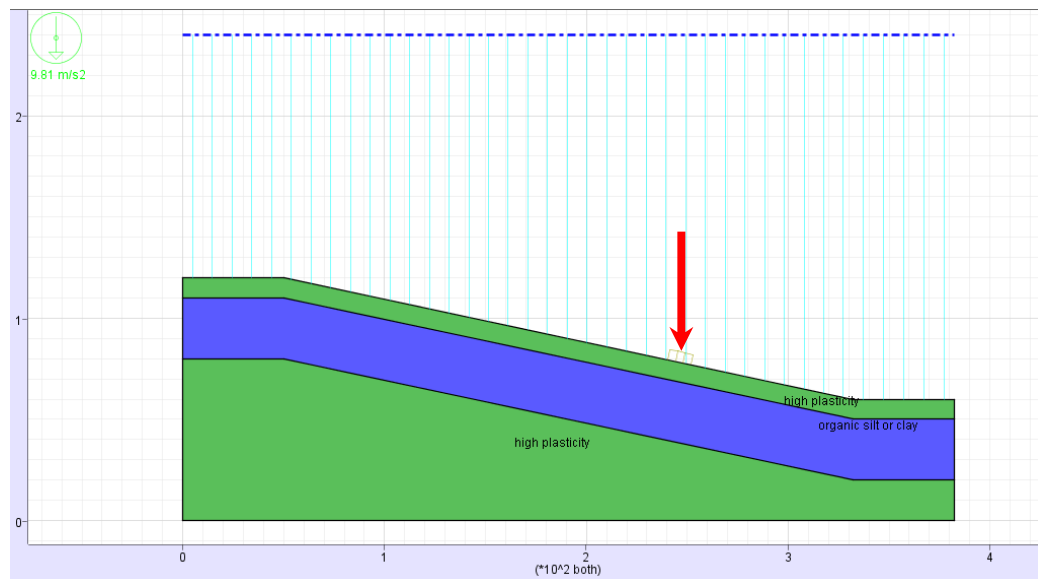
Βάσει αποτελεσμάτων παρατηρείται χαμηλότερος συντελεστής ασφαλείας με την ύπαρξη του φορτίου της ανεμογεννήτριας 1,73(<1,83). Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο.

- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 20 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



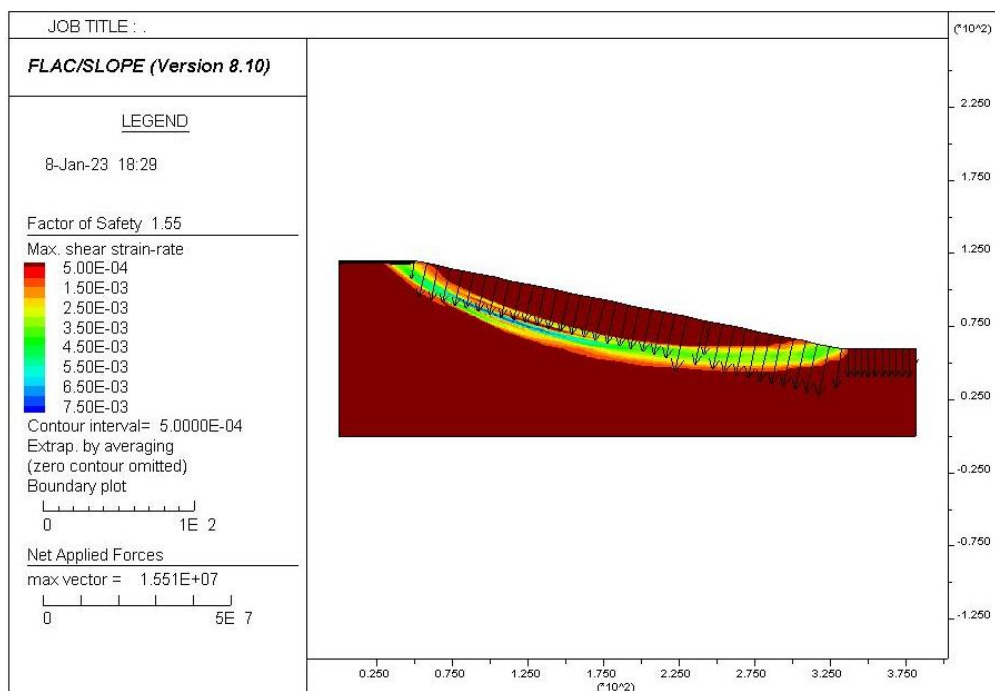
Εικόνα 93: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 20 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας)

- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 30 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 94: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 30 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας)

- Πάχος ενδιάμεσου στρώματος (B) 40 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας



Εικόνα 95: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (3 στρώματα - 40 μέτρα + Φορτίο Ανεμογεννήτριας)

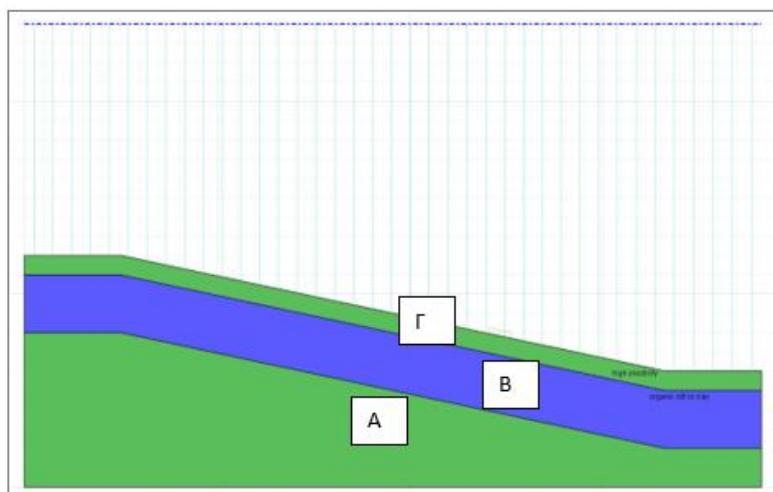
Τα αποτελέσματα προδίδουν ότι με τη αύξηση του πάχους του άνω στρώματος αλλά και με την ύπαρξη του φορτίου της ανεμογεννήτριας ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται μέχρι κάποιο συγκεκριμένο πάχος του άνω στρώματος (30 μέτρα). Στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του πάχους δεν το επηρεάζει και τον διατηρεί σταθερό.

	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	
ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ(ΜΕΤΡΑ)	ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ	ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ + ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
10	1,83	1,73
20	1,64	1,59
30	1,64	1,59
40	1,59	1,55

Εικόνα 96: Πίνακας με συνοπτικά αποτελέσματα για σενάριο 2 στρώσεων με παραμετροποίηση του πάχους άνω στρώματος και την ύπαρξη ή μη φορτίου ανεμογεννήτριας

Ως γενική διατύπωση μπορεί να ειπωθεί ,πως και σε αυτή την περίπτωση, ότι θεωρείται φυσιολογική η κλιμάκωση των αποτελεσμάτων του συντελεστή ασφαλείας με την αύξηση του πάχους του άνω στρώματος . Ειδικότερα η αύξηση του πάχους του ενδιάμεσου στρώματος (μικρότερη συνοχή και γωνία τριβής από τα εκατέρωθεν στρώματα) συνεπάγεται μειωμένη αντοχή για το σύνολο της στρωματογραφίας. Επιπλέον είναι αναμενόμενο να μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας όταν προστίθεται το φορτίο της ανεμογεννήτριας.

- **Εδαφικοί συνδυασμοί υλικών των 3 στρωμάτων**



Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε ένα σύνολο εδαφικών συνδυασμών εκτός του **V0** με σκοπό να διερευνηθεί ο συνδυασμός που αποδίδει τον δυσμενέστερο

συντελεστή ασφαλείας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται το σύνολο των συνδυασμών που μελετήθηκαν. Η μοντελοποίηση έγινε θεωρώντας σταθερό πάχος της ενδιάμεσης στρώσης ίση με 20 μέτρα και λαμβάνοντας υπόψιν το ίδιο βάρος των στρωμάτων πλέον της υδροστατικής πίεσης και του βάρους της ανεμογεννήτριας.

ΤΥΠΟΙ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΤΟΜΩΝ				
	V1	V2	V3	V0
Γ	Άργιλος μεσαίας πλαστικότητας	Άργιλος υψηλής πλαστικότητας	Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας	Άργιλος υψηλής πλαστικότητας
B	Ομοιόμορφα διαβαθμισμένη Άμμος	Πηλίτης χαμηλής πλαστικότητας	Ομοιόμορφα αδρόκοκκη άμμος	Άργιλος με οργανική ιλύ
A	Ασβεστόλιθος	Καλά διαβαθμισμένη Άμμος	Αμμώδες Χαλίκι	Άργιλος υψηλής πλαστικότητας
	V4	V5	V6	
Γ	Άργιλος με οργανική ιλύ	Ομοιόμορφα αδρόκοκκη άμμος	Ομοιόμορφα αδρόκοκκη άμμος	
B	Πηλίτης μέτριας ως υψηλής πλαστικότητας	Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας	Μείγμα χαλικιού και άμμου	
A	Αργυρόλιθος	Σχιστόλιθος	Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας	

Εικόνα 97: Πίνακας με το σύνολο των εδαφικών συνδυασμών για το τριστρωματικό μοντέλο.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (20M)						
V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
1,84	2,84	2,91	3,16	2,47	2,41	2,84

Εικόνα 98: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας των εδαφικών συνδυασμών του τριστρωματικού μοντέλου.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ως δυσμενέστερο συνδυασμό τον **V5** με συντελεστή ασφαλείας ίσο με **2,41**.

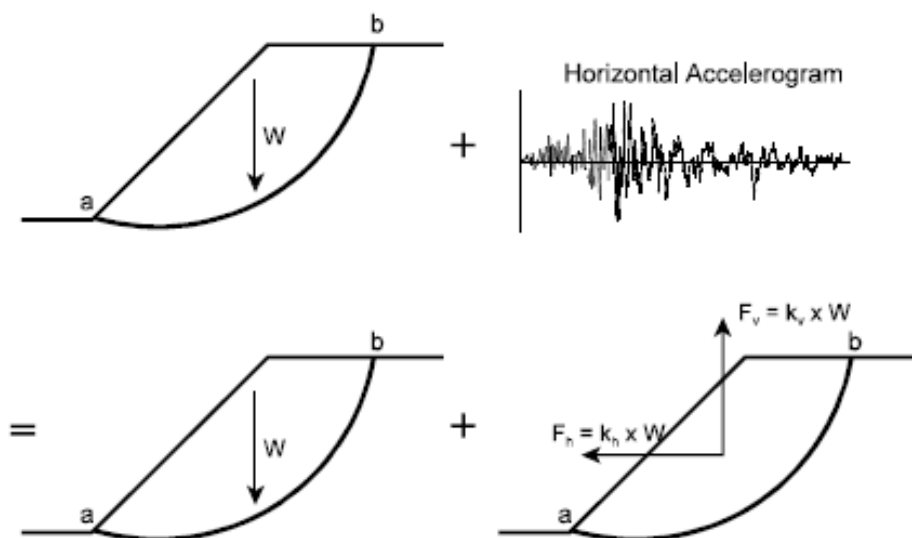
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ-V5(ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ)			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ	ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ - ΑΚΟΡΕΣΤΟ (kg/m ³)	1600	1900	2700
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ -ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ (kg/m ³)	2100	2400	2710
ΣΥΝΟΧΗ (kPa)	0	6	38400
ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (degrees)	34	24	14,4

Εικόνα 99: Πίνακας με τα εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου συνδυασμού.

4.5 Ψευδοστατική ανάλυση

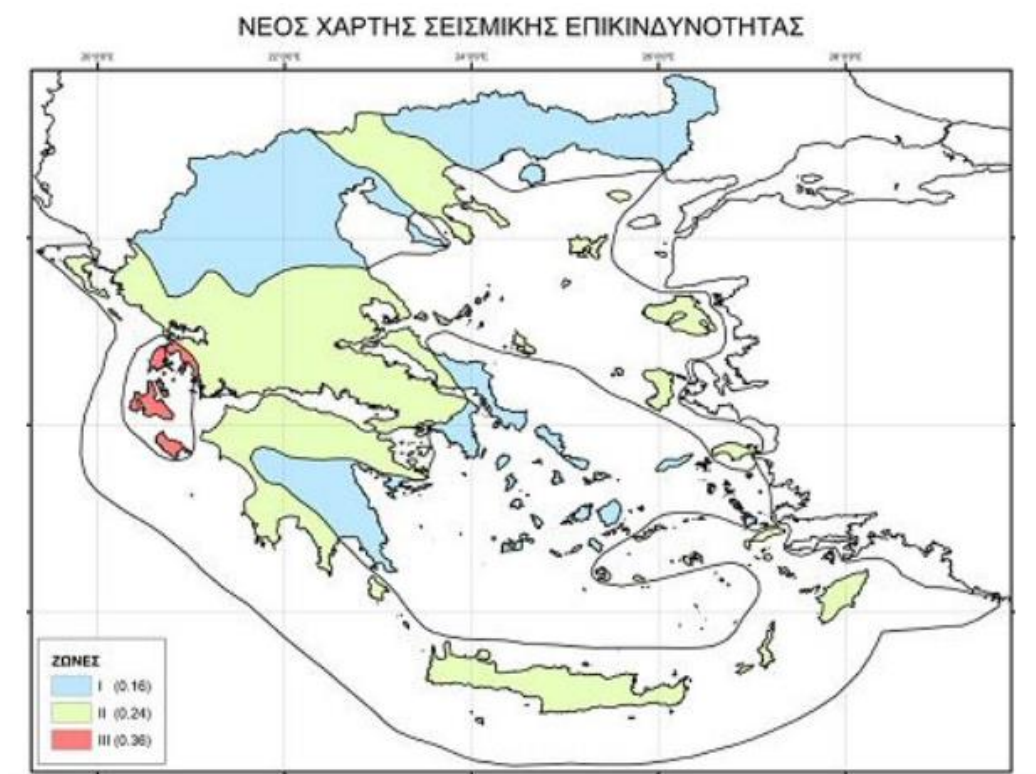
Η ψευδοστατική ανάλυση είναι μια από τις απλούστερες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στη σεισμική μηχανική για την ανάλυση της σεισμικής απόκριση εδαφικών επιχώσεων και πρανών. Ωστόσο, η επιλογή των σεισμικών συντελεστών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση μπορεί να είναι αυθαίρετη και γενικά στερείται λογικής. Σε σεισμογενείς περιοχές, οριζόντιοι και κάθετοι ψευδοστατικοί (σεισμικοί) συντελεστές, k_h και k_v , αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της οριζόντιας και κάθετης δύναμης που προκαλούνται από έναν πιθανό σεισμό, όπως

φαίνεται στην εικόνα 98. Αυτές οι δυνάμεις με τη σειρά τους προστίθενται στο συνολικό υπολογισμό ισορροπίας του Flac Slope για τις εν δυνάμει επιφάνειες αστοχίας [13].



Εικόνα 100: Προσέγγιση της ψευδοστατικής ανάλυσης. [24']

Η επιλογή ενός κατάλληλου σεισμικού συντελεστή είναι η πιο σημαντική και δύσκολη πτυχή μιας ψευδοστατικής ανάλυσης σταθερότητας. Θεωρητικά, οι τιμές των σεισμικών συντελεστών θα πρέπει να εξαρτώνται από κάποιο μέτρο του πλάτους της αδρανειακής δύναμης που προκαλείται στην κλίση από τις δυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Διότι τα πράγματα δεν είναι άκαμπτα και η μέγιστη επιτάχυνση που δημιουργείται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού διαρκεί μόνο για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα του χρόνου, οι σεισμικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην πράξη αντιστοιχούν γενικά σε τιμές επιτάχυνσης πολύ κάτω από το προβλεπόμενες μέγιστες επιταχύνσεις. Ωστόσο, η επιλογή των συντελεστών που χρησιμοποιούνται στη σταθερότητα της κλίσης έγκειται στην κριτική ικανότητα του μελετητή και την απαίτηση ακρίβειας που θέτει σε κάθε περίπτωση. Οι Εικόνες 101 & 101α παρακάτω απεικονίζουν πίνακες που δείχνουν τον οριζόντιο σεισμικό συντελεστή τιμές που έχουν προταθεί για σχεδιασμό τόσο σε ελληνικό επίπεδο όσο και σε παγκόσμιο [13]. Είναι ιδιαίτερος σημαντικό να τονιστεί ότι οι παρακάτω συντελεστές αφορούν χερσαίες ζώνες και δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμη το μέτρο της διαφοράς αυτών στις υποθαλάσσιες ζώνες.



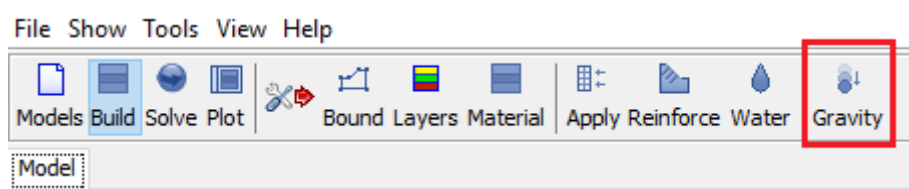
Εικόνα 101: Προτεινόμενοι οριζόντιοι σεισμικοί συντελεστές για τα ελληνικά δεδομένα. [25’]

Horizontal Seismic Coefficient, k_h	Description	
0.05 - 0.15	In the United States	
0.12 - 0.25	In Japan	
0.1	"severe" earthquakes	Terzaghi [4]
0.2	"violent, destructive" earthquakes	
0.5	"catastrophic" earthquakes	
0.1 - 0.2	Seed [2], FOS ≥ 1.15	
0.10	Major Earthquake, FOS > 1.0	Corps of Engineers [5]
0.15	Great Earthquake, FOS > 1.0	
$\frac{1}{2}$ to $\frac{1}{3}$ of PHA	Marcuson [6], FOS > 1.0	
$\frac{1}{2}$ of PHA	Hynes-Griffin [7], FOS > 1.0	
FOS = Factor of Safety. PHA = Peak Horizontal Acceleration, in g's.		

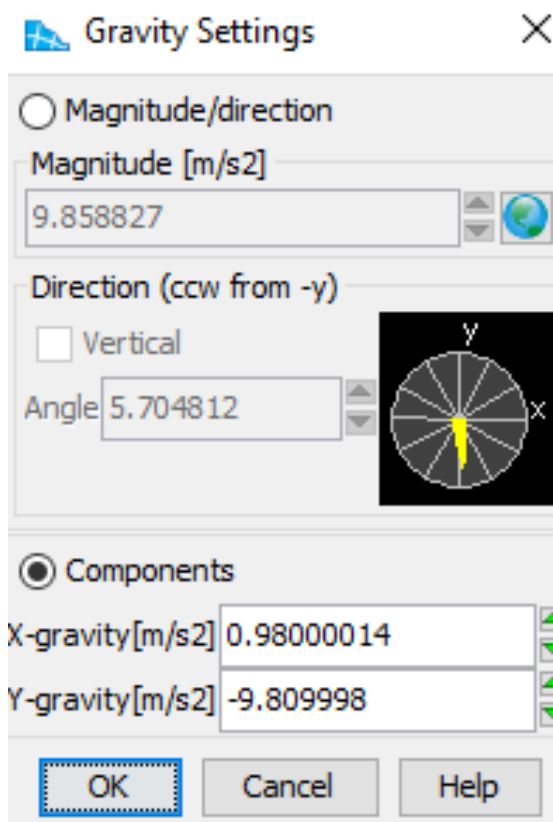
Εικόνα 101α: Προτεινόμενοι οριζόντιοι σεισμικοί συντελεστές. [24’]

4.5.1 Τρόπος εφαρμογής ψευδοστατικού φορτίου στο μοντέλο του Flac Slope

Ψευδοστατικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν κατά μήκος μιας επιφάνειας κλίσης κάνοντας κλικ στο κουμπί Gravity στη γραμμή εργαλείων Build (Εικόνα 100). Αυτό ανοίγει το εργαλείο Gravity Settings , όπως φαίνεται στην Εικόνα 102. Οριζόντια και κατακόρυφα ψευδοφορτία μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοστούν στην επιφάνεια της πλαγιάς. Για να εφαρμοστεί ένα συγκεκριμένο φορτίο, επιλέγεται η επιθυμητή φόρτιση ($K_h \cdot g$) στη περιοχή components του Gravity Settings. Σημειώνεται ότι η κατακόρυφη ψευδοφόρτιση παραμένει g καθώς έχει αποδειχθεί ότι η συνεισφορά του συντελεστή K_v σε σχέση με το K_h στη ψευδοστατική ανάλυση είναι αμελητέα [13]. Στο υπάρχον μοντέλο ο συντελεστής K_h κυμαίνεται μεταξύ 0,05-0,15.



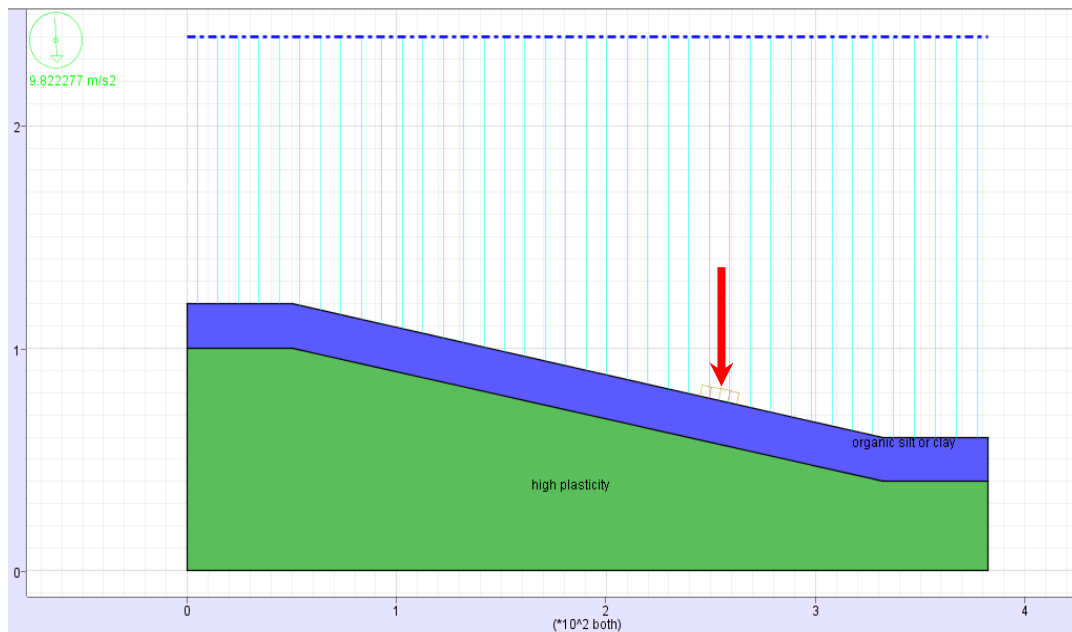
Εικόνα 102: Γραμμή εργαλείων – Εργαλείο Gravity



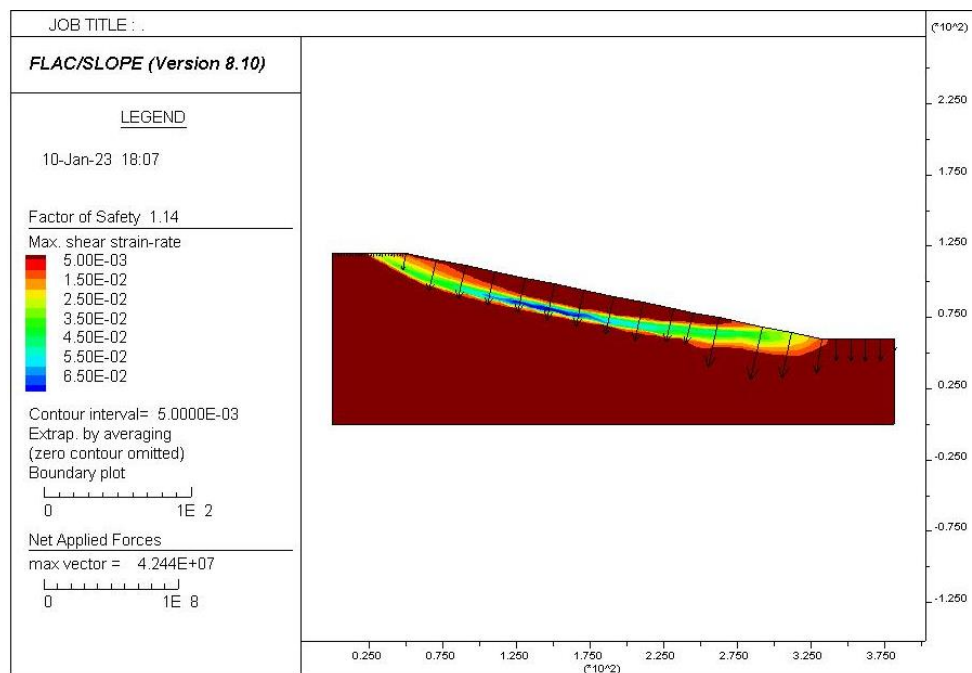
Εικόνα 103: Γραμμή εργαλείων – Εργαλείο Gravity

4.5.2 Εφαρμογή ψευδοστατικής ανάλυσης

Η ψευδοστατική ανάλυση έγινε για τους συνδυασμούς V0 & V5, για ύπαρξη φορτίου ανεμογεννήτριας και για διάφορες εδαφικές επιταχύνσεις. Ο λόγος επιλογής των παραπάνω συνδυασμών οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί αποτελούσαν τους δυσμενέστερους συνδυασμούς ως προς τον συντελεστή ασφαλείας στις στατικές φορτίσεις. Επιπλέον οι εδαφικές επιταχύνσεις που εξετάστηκαν έλαβαν υπόψιν σεισμικό συμβάν “σοβαρής” έντασης από τον πίνακα της Εικόνας 101.

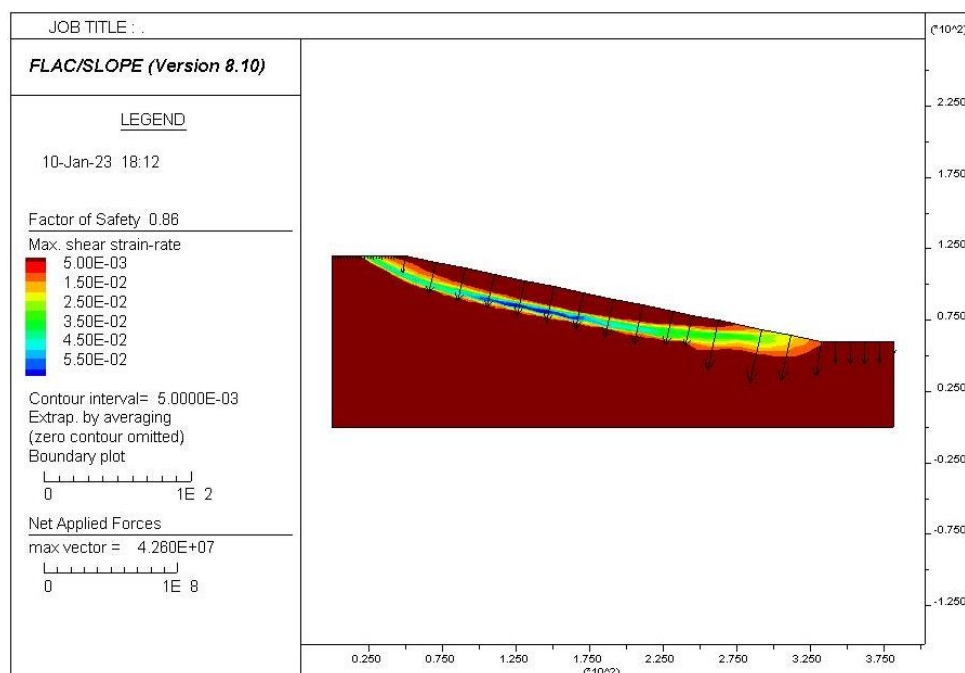


Εικόνα 104: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου διστρωματικού συνδυασμού.



Εικόνα 105: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,05g)

Είναι ευνόητο από το αποτέλεσμα του συντελεστή ασφαλείας ότι το πρανές αντέχει την σεισμική επιτάχυνση των 0,05g.

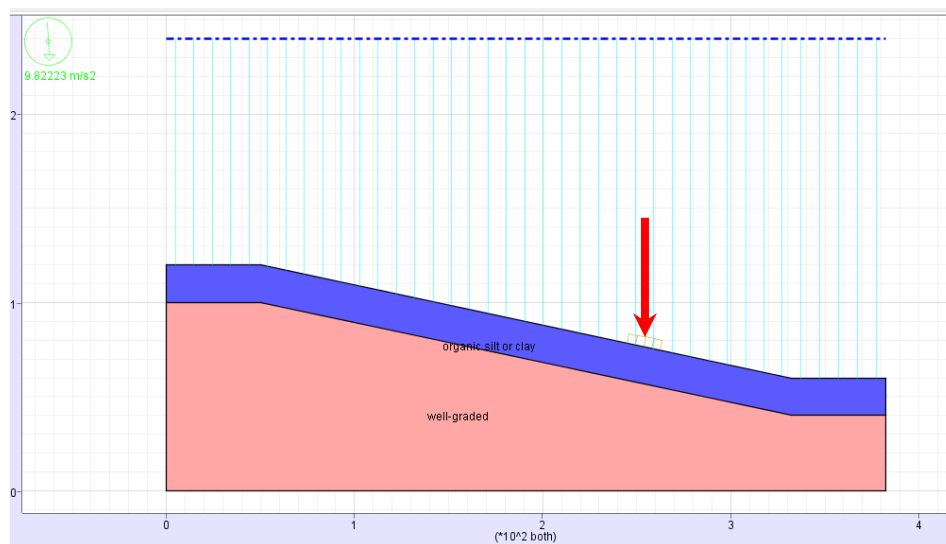


Εικόνα 106: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας – (2 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,10g)

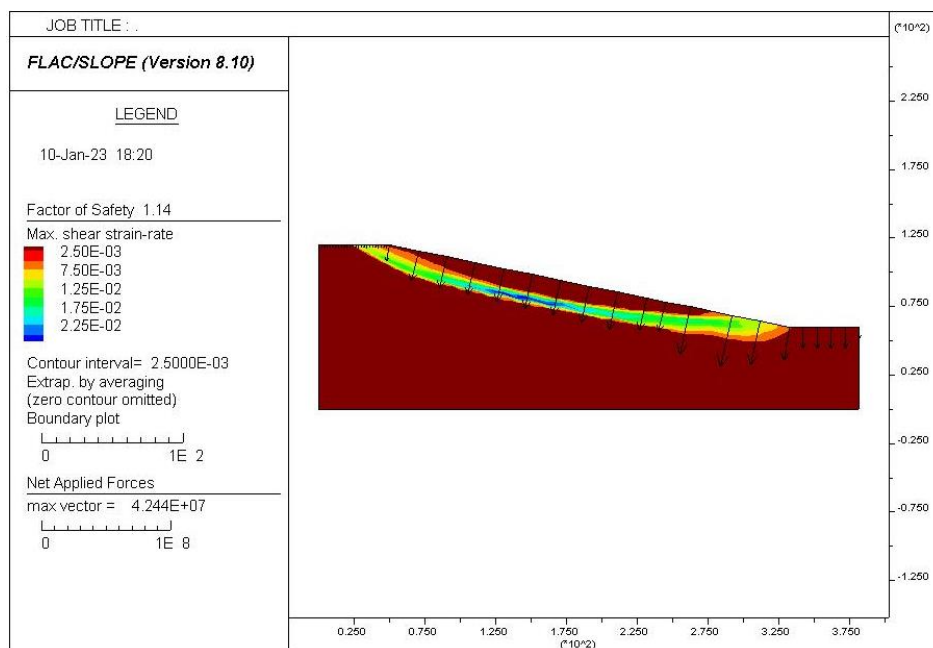
Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν το γεγονός ότι επέρχεται αστοχία στο πρηνές όταν η σεισμική επιτάχυνση διπλασιάζεται και φτάνει την τιμή 0,1g.

ΨΕΥΔΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
(20M) - V0		
Kh	0,05g	0,10g
FOS	1,14	0,86

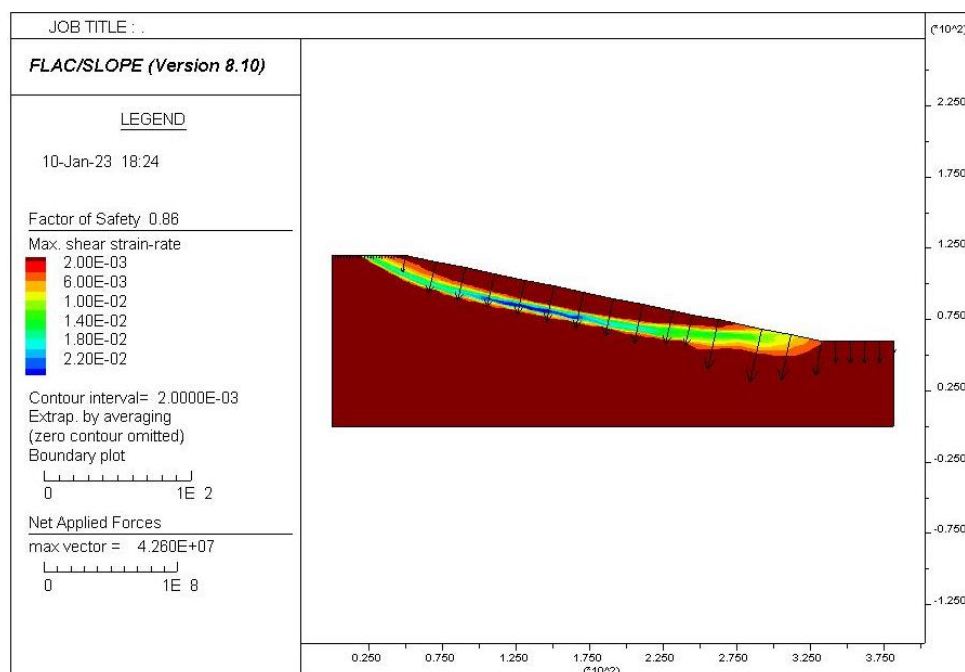
Εικόνα 107: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας της ψευδοστατικής ανάλυσης του διστρωματικού μοντέλου (Συνδυασμός στρώσεων V0)



Εικόνα 108: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου διστρωματικού συνδυασμού(V5)



Εικόνα 109: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5 – (2 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,05g

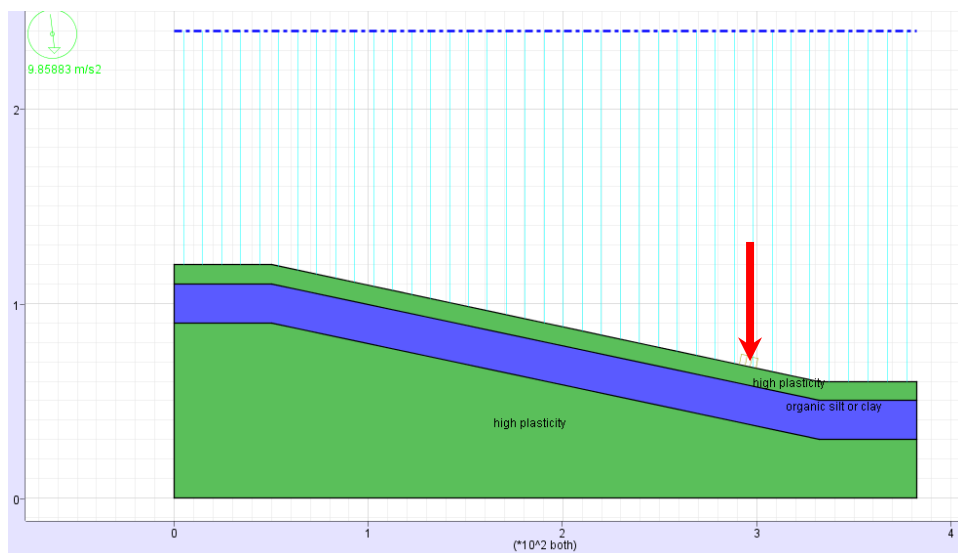


Εικόνα 110: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5 – (2 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,1g

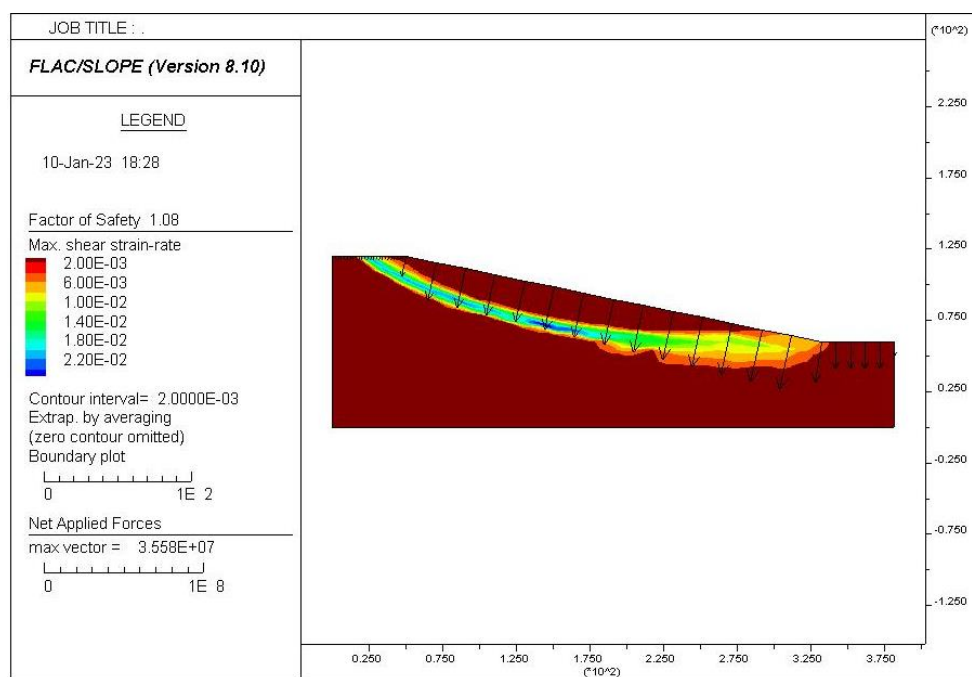
Παρά την αλλαγή της εδαφικής τομής τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας είναι παρεμφερή για τους συνδυασμούς V0 & V5.

ΨΕΥΔΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
(20M) -V5		
Kh	0,05g	0,10g
FOS	1,14	0,84

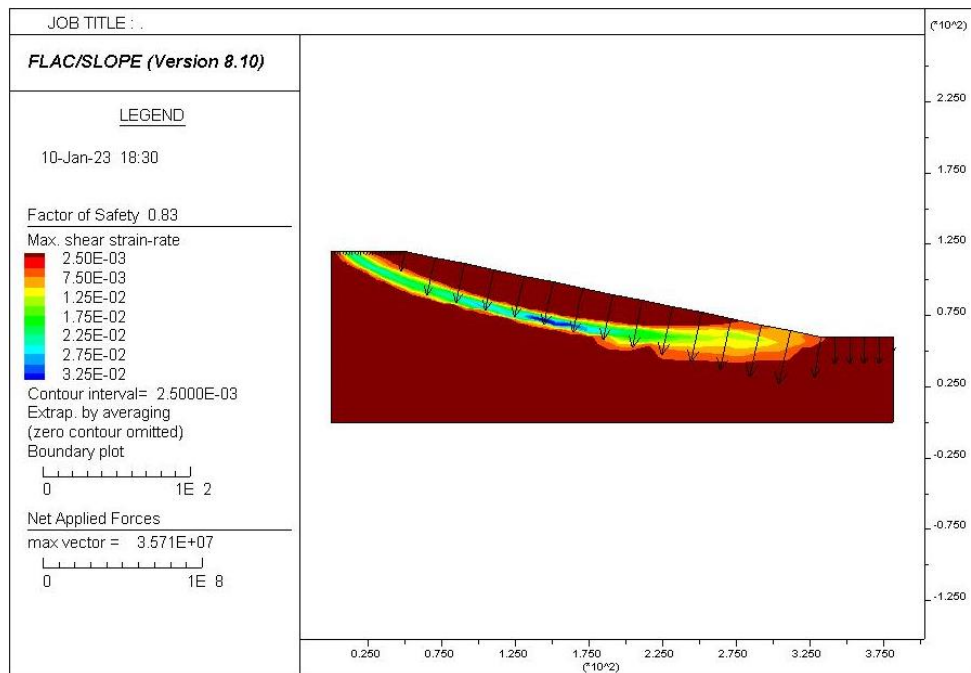
Εικόνα 111: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας της ψευδοστατικής ανάλυσης του διστρωματικού μοντέλου (συνδυασμός στρώσεων V5)



Εικόνα 112: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου τριστρωματικού συνδυασμού(V0)



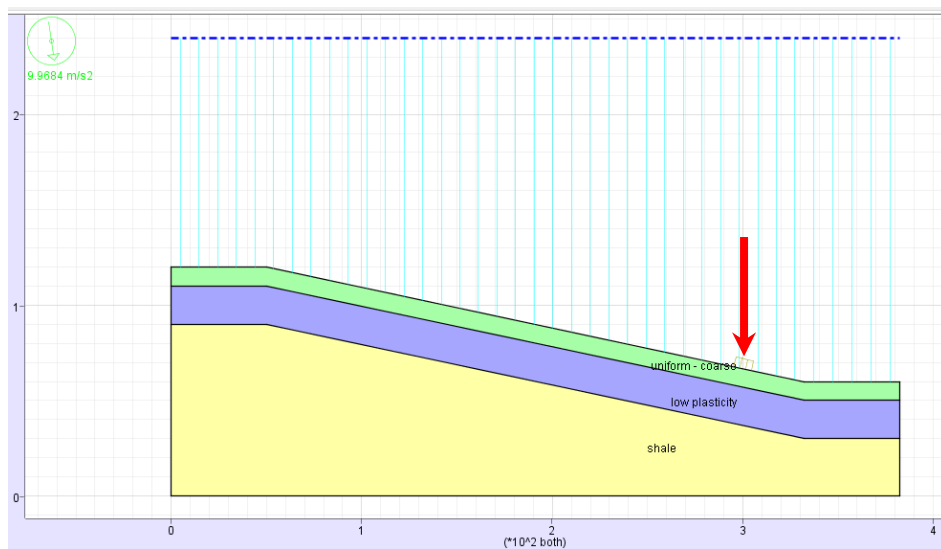
Εικόνα 113: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V0 – (3 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,05g



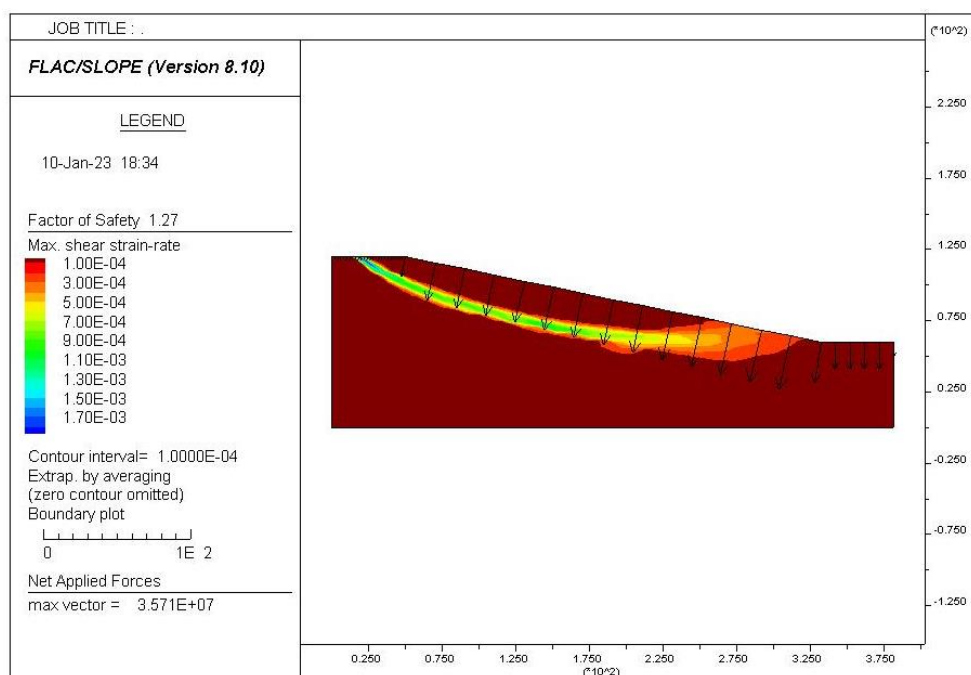
Εικόνα 114: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V0 – (3 στρώματα -Ψευδοστατική ανάλυση 0,1g

ΨΕΥΔΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
(20M) -V0		
Kh	0,05g	0,1g
FOS	1,08	0,83

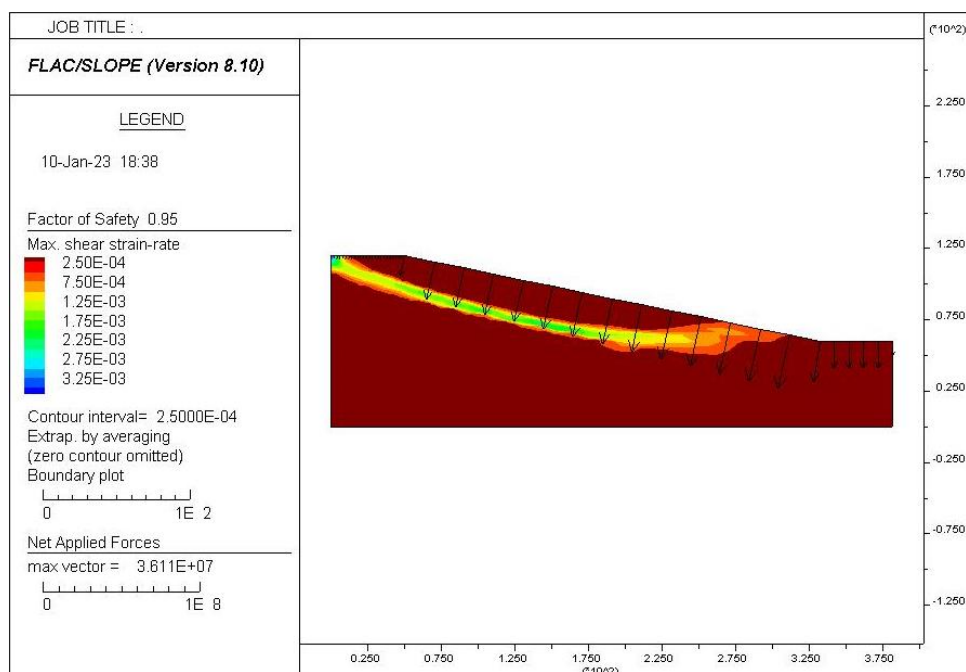
Εικόνα 115: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας της ψευδοστατικής ανάλυσης του τριστρωματικού μοντέλου (συνδυασμός στρώσεων V0)



Εικόνα 116: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου τριστρωματικού συνδυασμού(V5)



Εικόνα 117: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5 – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,1g



Εικόνα 118: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5 – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,15g

Βάσει αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το τριστρωματικό μοντέλο (V5) αστοχεί εντός της κλίμακας 0,1g – 0,15g παρουσιάζοντας μεγαλύτερη αντοχή από τις προηγούμενες εδαφικές τομές.

ΨΕΥΔΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		
(20M) -V5		
Kh	0,1g	0,15g
FOS	1,27	0,95

Εικόνα 119: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας της ψευδοστατικής ανάλυσης του τριστρωματικού μοντέλου (Συνδυασμός στρώσεων V5)

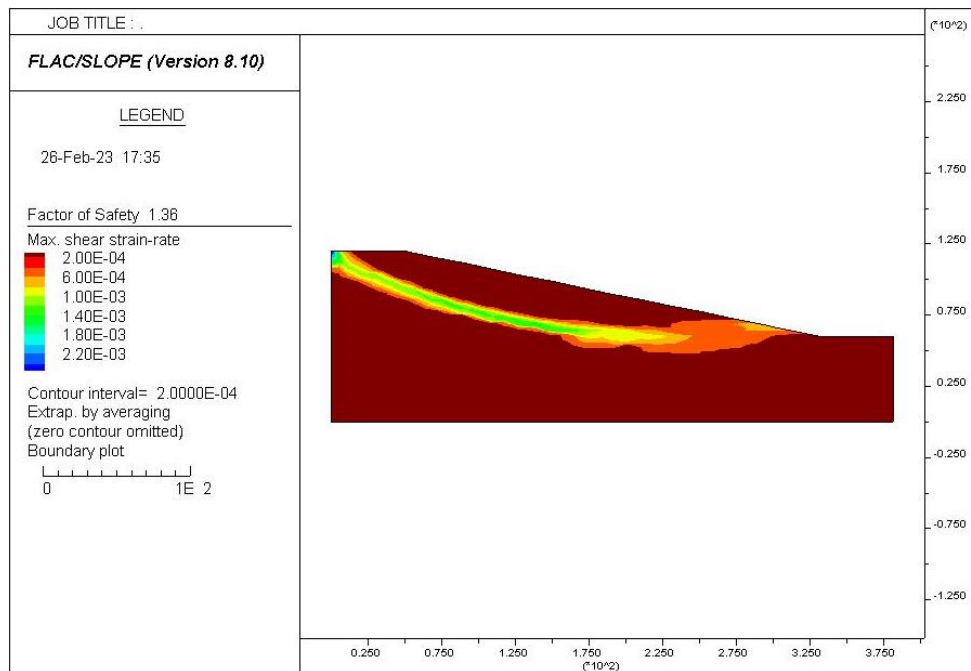
- **Εδαφικοί συνδυασμοί υλικών των 3 στρωμάτων με διαφορετική (ανομοιόμορφη) κλίση από το υποθαλάσσιο πρανές**

Η συγκεκριμένη ανάλυση έγινε για τον συνδυασμό V5, για ύπαρξη φορτίου ανεμογεννήτριας, για διάφορες εδαφικές επιταχύνσεις και για διαφορετική κλίση των στρωμάτων σε σχέση με τον θαλάσσιο πυθμένα. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκε η παρακάτω ανάλυση είναι για να αναδείξει αν η διαφορετική (ανομοιόμορφη) κλίση του πρανούς και των στρωμάτων επηρεάζει ή μη τον συντελεστή ασφαλείας.

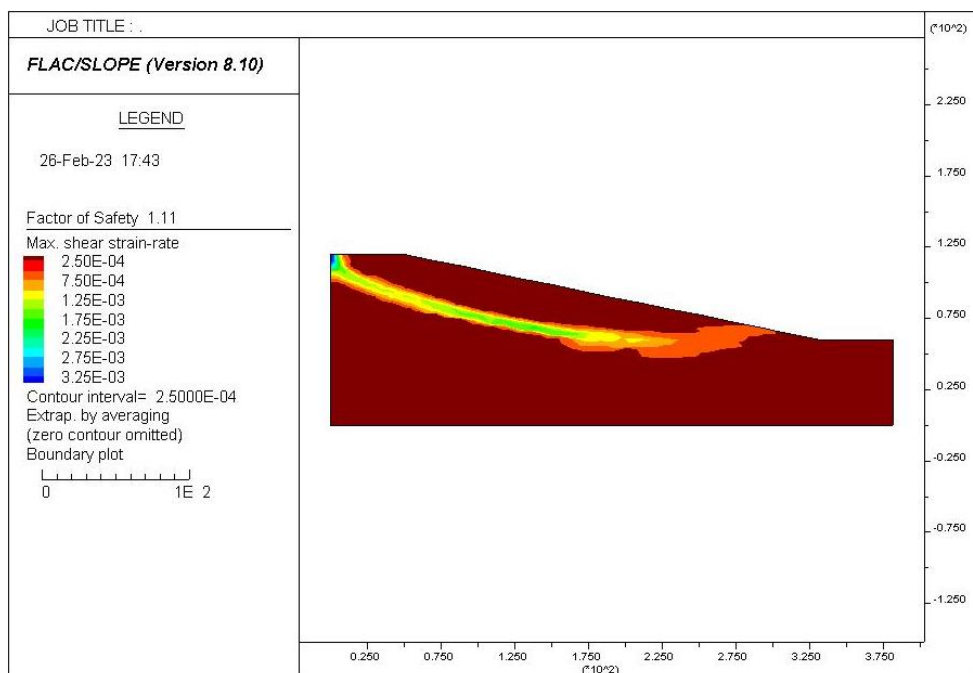
- **Ανομοιόμορφη κλίση (α)**



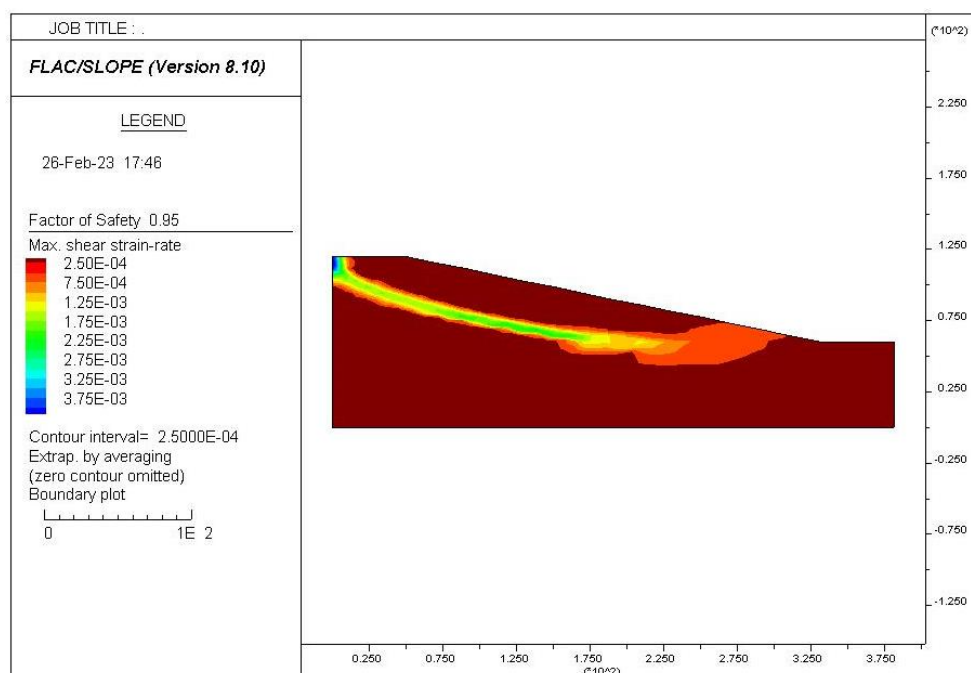
Εικόνα 120: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου τριστρωματικού συνδυασμού(V5) για ανομοιόμορφη κλίση (α)



Εικόνα 121: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5
ανομοιόμορφη κλίση (α) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,10g)

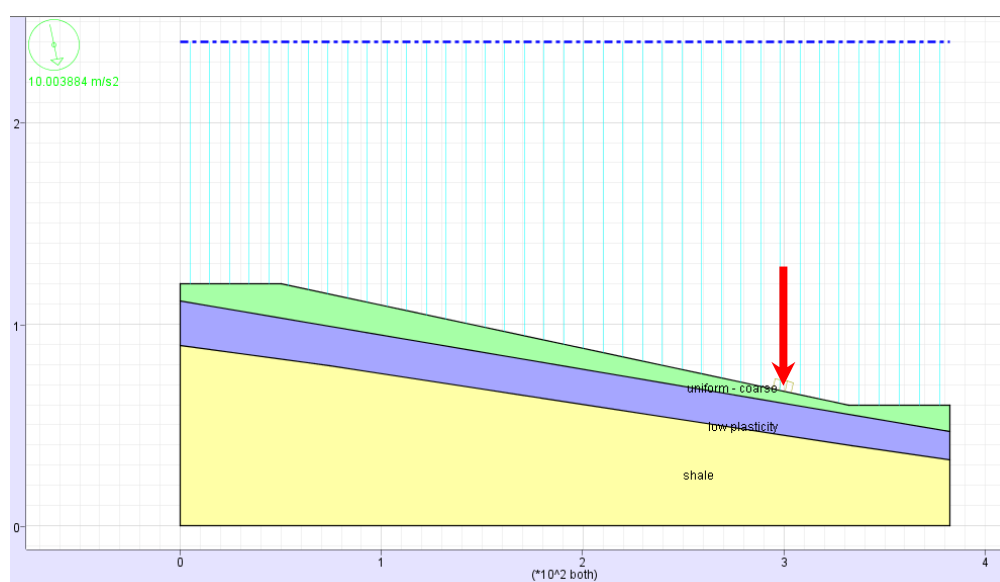


Εικόνα 122: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5
ανομοιόμορφη κλίση (α) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,15g)

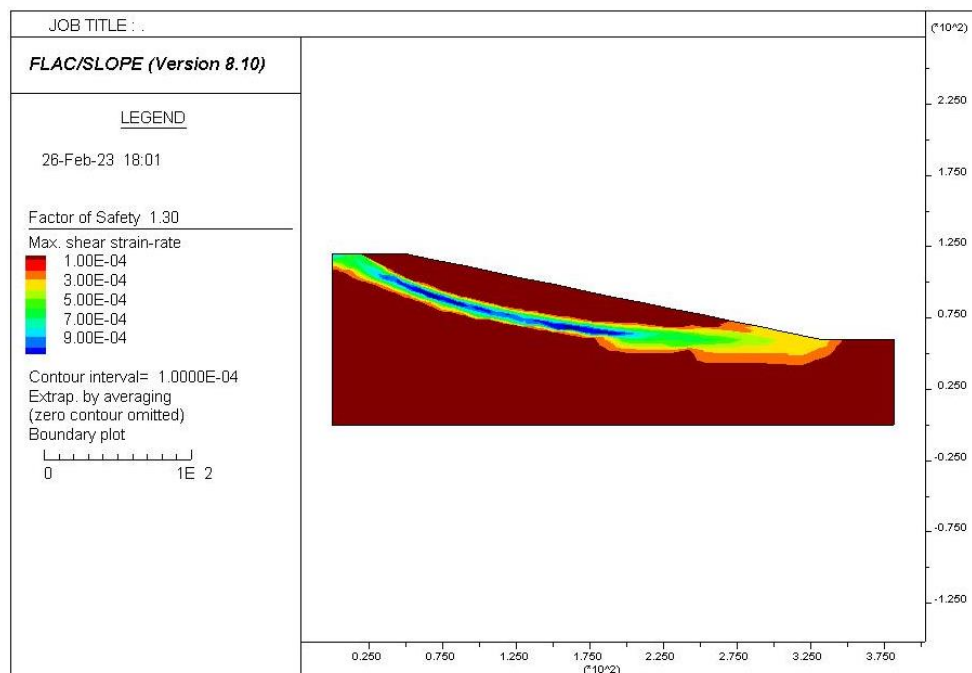


Εικόνα 123: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5 ανομοιόμορφη κλίση (α) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,20g)

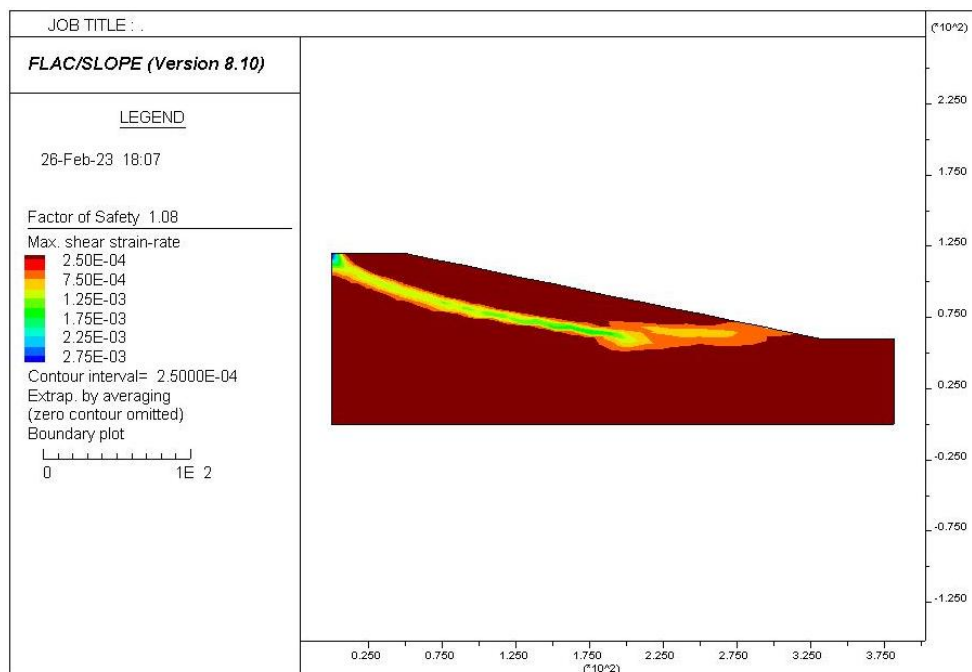
- Ανομοιόμορφη κλίση (β)



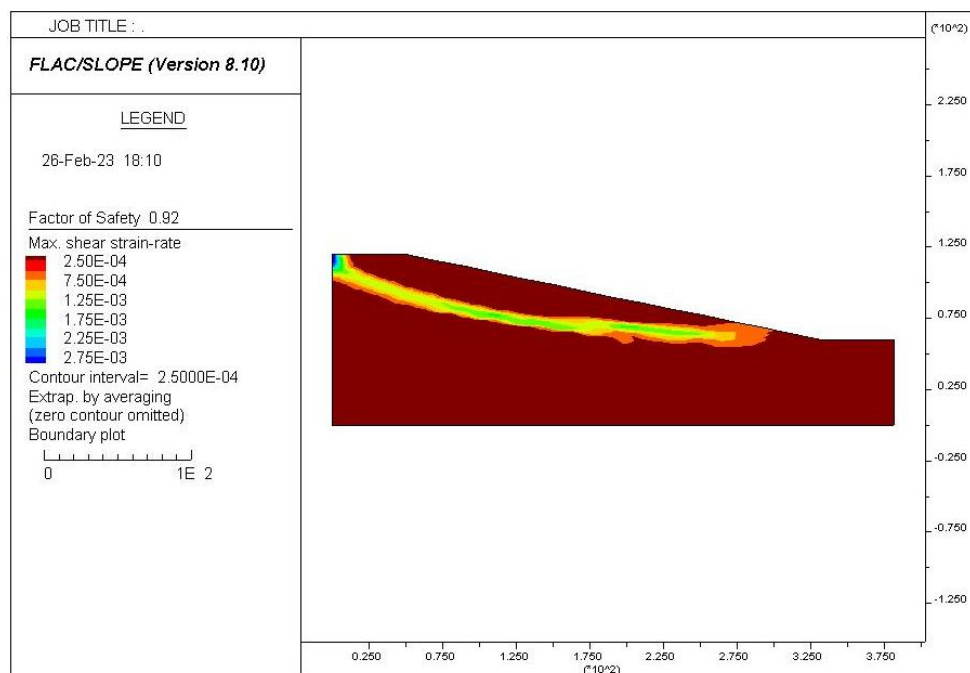
Εικόνα 124: Εδαφικά χαρακτηριστικά του δυσμενέστερου τριστρωματικού συνδυασμού(V5) για ανομοιόμορφη κλίση (β)



Εικόνα 125: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5
ανομοιόμορφη κλίση (β) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,10g)



Εικόνα 126: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5
ανομοιόμορφη κλίση (β) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,15g)



Εικόνα 127: Απεικόνιση μοντέλου και συντελεστής ασφαλείας V5
ανομοιόμορφη κλίση (β) – (3 στρώματα - Ψευδοστατική ανάλυση 0,20g)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ (ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ)-ΤΡΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ			
(20M) -V5			
Kh	0,1g	0,15g	0,20g
FOS	1,28	1,03	0,91
FOS (ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΛΙΣΗ-A)	1,36	1,11	0,95
FOS (ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΛΙΣΗ-B)	1,30	1,08	0,92

Εικόνα 128: Πίνακας με τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας της
ψευδοστατικής ανάλυσης του τριστρωματικού μοντέλου για ανομοιόμορφες κλίσεις
(συνδυασμός στρώσεων V5)

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης προκύπτει ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος όταν υπάρχει ανομοιομορφία κλίσεων (μεταξύ του υποθαλάσσιου πρανούς και των στρωμάτων), γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη δυσκολία ολίσθησης όταν η κλίση του πρανούς δεν είναι ίδια με την κλίση των στρωμάτων, αλλά ομόρροπη.

Ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει ότι για οριζόντια εδαφική επιτάχυνση μεταξύ 0,10g-0,20g , συναντώνται μειωμένοι συντελεστές ασφαλείας αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που επέρχεται ακόμη και αστογία των υπό εξέταση θαλάσσιων πρανών με συντελεστές ασφαλείας που κυμαίνονται από 1,27 έως 0,83.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, στην συγκεκριμένη εργασία, διερευνήθηκαν οι συνθήκες για την ασφαλή έδραση υποθαλάσσιων ανεμογεννητριών στους θαλάσσιους πυθμένες. Η διερεύνηση έγινε μέσω του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας σε υποθαλάσσια πρανή με εδραζόμενη ανεμογεννήτρια, που υπόκειται ανά περίπτωση σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Σκοπός της διερεύνησης αποτέλεσε η ορθή χωροθέτηση σε μεγάλα βάθη των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, που αναμένεται να διεκδικήσουν στο εγγύς μέλλον σημαντικό μερίδιο επί του συνόλου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εργασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως αριθμητική ανάλυση των συνθηκών ευστάθειας ή ολίσθησης θαλάσσιων πρανών αφού νωρίτερα έχει παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο που χαρακτηρίζει την ανάλυση και τις κατολισθήσεις γενικότερα.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν μία σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση του σκοπού της εργασίας. Αρχικά προέκυψε το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι οι στρωματογραφίες με συνεκτικά εδάφη και βραχώδες υπέδαφος παρουσιάζουν υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας από τα αντίστοιχα μη συνεκτικά και μη βραχώδη εδάφη. Σε συνέχεια της προηγούμενης διαπίστωσης, προστίθεται το συμπέρασμα ότι η ύπαρξη επιπρόσθετων φορτίων (φορτίο μίας τυπικής πλωτής ανεμογεννήτριας) σε ένα πρανές προκαλεί μία μείωση του συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 3-5%. Βασική προϋπόθεση για την προαναφερθείσα μείωση είναι η εφαρμογή του επιπρόσθετου φορτίου να συμβαίνει σε περιοχές εν δυνάμει αστοχίας του πρανούς (πχ. πόδας του πρανούς). Οι επιφάνειες αστάθειας εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στην διεπιφάνεια των εδαφών της στρωματογραφίας.

Είναι άξιο αναφοράς επίσης ότι οι αυξομειώσεις στην κλίση του πρανούς δημιουργούν ανάλογες αυξομειώσεις και στον συντελεστή ασφαλείας. Ακόμη μία παράμετρος που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον τελικό συντελεστή ασφαλείας είναι η παραλληλότητα ή μη των εδαφικών στρώσεων στην στρωματογραφία. Πιο συγκεκριμένα η παραλληλότητα ευνοεί τις εν δυνάμει επιφάνειες αστοχίας, δίνοντας χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας. Αντίθετα το βάθος του θαλάσσιου πυθμένα δεν επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή ασφαλείας καθώς η υδροστατική πίεση ασκείται

ομοιόμορφα κατά μήκος των πρανών. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε ψευδοστατική ανάλυση που ανέδειξε το γεγονός ότι σεισμικά γεγονότα (εντός του φάσματος των σεισμικών επιταχύνσεων που συναντώνται ευρέως) απομειώνουν σημαντικά τον συντελεστή ασφαλείας. Είναι ενδεικτικό, των αποτελεσμάτων στα εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ, το γεγονός ότι μία αύξηση κατά 0,05g στην οριζόντια εδαφική επιτάχυνση προκαλεί μεσοσταθμικά μείωση του συντελεστή ασφαλείας κατά 25%. (π.χ. από 1,08 σε 0,83).

Οι παραπάνω αναλύσεις έγιναν στο πρόγραμμα αριθμητικής προσομοίωσης του Flac Slope. Το μέγεθος του μοντέλου (380 μέτρα μήκος) επιλέχτηκε ύστερα από δοκιμές που ανέδειξαν ότι περαιτέρω αύξηση του μεγέθους του δεν διαφοροποιούσε σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα αλλά και λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα, η εργασία αναδεικνύει τα είδη των παραγόντων που συντελούν στον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας ενός υποθαλάσσιου πρανούς. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα αποτελεί η μοντελοποίηση και εφαρμογή τρισδιάστατων αναλύσεων στο πρόγραμμα Flac3D που έχει περισσότερες δυνατότητες από το Flac Slope. Τέτοιες αναλύσεις μπορούν να διερευνήσουν υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που συμβαίνουν σε μικρές γωνίες κλίσεις υποθαλάσσιων πρανών. Ακόμη μέσω των αναλύσεων αυτών μπορούν να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις, οι τροπές και οι τάσεις σε κάθε σημείο του υποθαλάσσιου πρανούς και να περιγραφεί αναλυτικότερα το φαινόμενο των υποθαλάσσιων ολισθήσεων και την ευστάθειας των υποθαλάσσιων πρανών.

Βιβλιογραφία

- [1] de Blasio F. V., (2011), Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
- [2] Mosher D. et al, (2010), Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer
- [2*] Βεργούλης Π., (2020), «Γεωκίνδυνοι και περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξόρυξης υποθαλάσσιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Η περίπτωση της νοτιοανατολικής Μεσογείου», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [3] Παπαμάλαμα, Ε., (2019) «Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και υπεράκτιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [4] McGuire, B. & Maslin, M., (2013) “Climate Forcing of Geological Hazards”, The Royal Society and John Wiley & Sons, Ltd, UK.
- [5] Mosher, D., Shipp, C., Moscardelli, L., Chaytor, J., Baxter, C., Lee, H., Urgeles, R., (2010) “Submarine Mass Movements and their Consequences”, Canada, Springer.
- [6] Randolph, M. & Gourvenec, S., (2011) “Offshore Geotechnical Engineering”, Spon Press, U.S.A.
- [7] ‘Angel Puga-Bernab’, Javier L’opez-Cabrera b, Jody M. Webster c, Robin J. Beaman, (2022) “Submarine landslide morphometrics and slope failure dynamics along a mixed carbonate-siliciclastic margin, north-eastern Australia”, Elsevier
- [8] Kvalstad, T.J., Nadim, F. and Harbitz, C.B., (2001) “Deepwater geohazards: Geotechnical concerns and solutions”, Proc. Annu. Offshore Tech. Conf., Houston, Texas, Paper OTC 12958.
- [9] Henkel, D., (1970) “The role of waves in causing submarine landslides”, Geotechnique, 20(1), pp. 75- 80.
- [10] Heim, A., (1932) “Bergsturz und Menschenleben”, Zurich, Switzerland: Fretz und Wasmuth.
- [11] Flac/Slope Manual

[12] Τζανετάκης Ε., (2013) «Τεχνολογία θεμελιώσεων των παράκτιων αιολικών συστημάτων», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Κρήτη

[13] Cristiano Melo and Sunil Sharma (2004) “Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-3.

Ιστογραφία

[A] <http://greek.greek.enacademic.com>

[B] http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm

[C] <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/ta-plota-eolika-ine-to-klidi-gia-tous-makroprothesmous-energiakous-stochous/>

Εικόνες

[1'] Tappin, D., (2010) “Submarine mass failures as tsunami sources: their climate control”, Phil. Trans. R. Soc. A (2010)368, 2417–2434.

[2'] Korup, O., (2012) “Earth’s portofolio of extreme sediment transport events”, Earth-Science Reviews, 112 (3-4), pp. 115- 125.

[3'] McGuire, B. & Maslin, M., (2013) “Climate Forcing of Geological Hazards”, The Royal Society and John Wiley & Sons, Ltd, UK.

[4'] Mountjoy, J., Micallef, A., (2018) “Submarine Landslides”, Submarine Geomorphology, Springer Geology, Springer, Cham.

[5'] Randolph, M. & Gourvenec, S., (2011) “Offshore Geotechnical Engineering”, Spon Press, U.S.A.

[6'] Kvalstad, T.J., Nadim, F. and Harbitz, C.B., (2001) “Deepwater geohazards: Geotechnical concerns and solutions”, Proc. Annu. Offshore Tech. Conf., Houston, Texas, Paper OTC 12958.

[7'] http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm

[8'] Erickson, J., Kusky Marine T.M., "Geology: Exploring the New Frontiers of the Ocean", Checkmark Books; Revised edition (March 2003).

[9'] <https://www.universetoday.com/73597/what-is-lithosphere/>

[10'] Encyclopedia Britannica

[11'] <https://earthsky.org/earth/>

[12'] Δασενάκης Μ, Χημική Ωκεανογραφία

[13'] www.ngi.com

[14'] Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις

[15'] Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer

[16'] Mosher David et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer

[17'] DailyMail.co.uk

[18'] howstuffworks.com

[19'] NGI.com

[20'] <https://oceanservice.noaa.gov/facts/turbidity.html>

[21'] Flac/Slope Manual

[22'] <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/ta-plota-eolika-ine-to-klidi-gia-tous-makroprothesmous-energiakous-stochous/>

[23'] Τζανετάκης Ε., (2013) «Τεχνολογία θεμελιώσεων των παράκτιων αιολικών συστημάτων», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Κρήτη

[24'] Cristiano Melo and Sunil Sharma (2004) “Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-3.

[25'] Οργανισμός αντισεισμικού σχεδιασμού και προστασίας