



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΜΑΥΡΟΔΟΝΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

ΔΡ. ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΤΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΔΡ. ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.Δ.Ι.Π./Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες αρχικά προς τον καθηγητή κύριο **Μαρίνο Καττή** όπου ανέλαβε την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και προς τον κύριο **Πρόδρομο Ψαρρόπουλο** για την συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια η οποία ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ο κύριος Ψαρρόπουλος υπήρξε πραγματικά ακούραστος καθοδηγητής, αυστηρός κριτής, αλλά και θερμός εμπυχωτής της προσπάθειας αυτής. Έχοντας ενεργό ρόλο από την αρχή μέχρι και το τέλος της εργασίας, μέσα από νέα δεδομένα εκπαίδευσης λόγω της πανδημίας, οργάνωνε σαν ομάδα τους φοιτητές του κανονίζοντας εβδομαδιαία τακτικά ραντεβού. Επίσης, τον ευχαριστώ γιατί εξαιτίας του εισάχθηκα στα μονοπάτια της επιστήμης της Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας επίσης συνέλαβε ο φίλος και συμφοιτητής Γιώργος Καπράλης ο οποίος ήταν σαν ένα χέρι βοήθειας σε κάθε μου πρόβλημα. Δοκιμασμένος και ο ίδιος σε θέματα εδαφομηχανικής και χρήσης λογισμικού Plaxis υπήρξε κατάλληλος σύμβουλος επί του έργου.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη τιμή που μου έκαναν να βρίσκονται στην τριμελή επιτροπή της κρίσης της προπτυχιακής μου εργασίας, τον κύριο Μαρίνο Καττή, τον κύριο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο και τον κύριο Γιάννη Τσομπανάκη.

Τέλος, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω, την οικογένεια μου που ανέχτηκε την απουσία μου όλο αυτό το διάστημα σε προσωπικό και επαγγελματικό επίπεδο εν μέσω κρίσης, τη κοπέλα, φίλους, συμφοιτητές και συγγενείς για το ακατάπαυστο ενδιαφέρον, την στήριξη και εμπύχωση που μου παρείχαν.

Σας ευχαριστώ!

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η ευστάθεια των εδαφών είναι ένα κύριο θέμα των Γεωτεχνικών Μηχανικών. Φυσικά και τεχνητά πρανή μπορεί να καταστούν ασταθή και η αστοχία τους μπορεί να είναι καταστροφική. Παλαιότερα η ευστάθεια ενός κεκλιμένου εδάφους αναλυόταν κυρίως με μεθόδους οριακής ισορροπίας. Τελευταία, με τις εξελίξεις στις τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων και τη διαθεσιμότητα ισχυρών επεξεργαστών υπολογισμού, οι αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν αναδυθεί ως ένα δημοφιλές εργαλείο. Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας που αναλύουν την ισορροπία της μάζας του εδάφους όπου μπορεί να ολισθήσει σε μία υποτιθέμενη επιφάνεια αστοχίας, δεν εκτιμά τις παραμορφώσεις και τις τάσεις που ενεργούν στη μάζα των γήινων υλικών. Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούν ειδικά λογισμικά προγράμματα όπως το Abaqus ή το Plaxis, ενσωματώνοντας κατάλληλα μοντέλα όπως του Mohr-Coulomb, προσομοιάζουν τη συμπεριφορά των τάσεων παραμορφώσεων του εδάφους.

Το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτελεί την απόκριση της συμπεριφοράς διάφορων πρανών, τόσο υπό στατικές όσο και υπό σεισμικές συνθήκες, υπολογισμένα με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ). Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι το Plaxis V. 8.2. Η εισαγωγή της σεισμικής επιτάχυνσης στο εδαφικό μοντέλο έγινε με την ψευδοστατική μέθοδο. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τιμές σεισμικής επιτάχυνσης (0.16g, 0.24g και 0.36g), όπως αυτές ορίζονται από τον ΕΑΚ 2000 και οι οποίες αποτελούν τις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδος.

Το παρόν έργο απαιτούσε εκατοντάδες αναλύσεις υλοποιημένες σε ηλεκτρονικό υπολογιστή εξετάζοντας την κατάσταση ισορροπίας διαφορετικής γεωμετρίας πρανών, αλλά και εδαφικών παραμέτρων.

Σκοπός της εργασίας ήταν η επανεξέταση γραφήματος που πρότεινε ο Taylor (1937) σε μία εποχή περιορισμένων υπολογιστικών μέσων και όταν η μέθοδος οριακής ισορροπίας έκανε τα πρώτα της βήματά, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.) υπό στατικές συνθήκες.

Ο τελικός στόχος ήταν η πρόταση νέων διαγραμμάτων και εξισώσεων προσεγγιστικού, και με γρήγορο τρόπο, υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety) ευστάθειας ποικίλων πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες.

NUMERICAL ANALYSIS OF SLOPE STABILITY UNDER STATIC AND SEISMIC CONDITIONS

Abstract

This dissertation was carried out within the framework of the undergraduate curriculum of the School of Rural and Surveying Engineering of the National Technical University of Athens.

Soil stability is a main theme of Geotechnical Engineering. Natural and artificial slopes can become unstable and their failure can be catastrophic. In the past, the stability of a slope was mainly analysed by methods of marginal equilibrium. Lately, with developments in finite element techniques and the availability of powerful calculation processors, numerical simulations have emerged as a popular tool. Marginal equilibrium methods that analyse the equilibrium of soil mass, where it can slide on a supposed failure surface, do not estimate deformations and stresses acting on the mass of soil materials. With the Finite Element Method (FEM) using special software programs such as Abaqus or Plaxis, incorporating appropriate models such as Mohr-Coulomb, they simulate the behavior of soil deformation stresses.

The main subject of the current thesis is constituted on analyzing a variety of different slopes, either under static or seismic conditions, calculated with the Finite Element Method (FEM). The software used for the extraction of outputs is Plaxis Software V. 8.2. The introduction of seismic acceleration on soil model was made under pseudo-static method. Three values of seismic acceleration were used (0.16g, 0.24g and 0.36g), as they are defined by Hellenic Seismic Code 2000 and constitute the Seismic Risk Zones of Greece.

This project required hundreds of analyses carried out on a computer, examining the equilibrium state of different geometry of slopes, as well as soil parameters.

The aim of this study was to review a chart proposed by Taylor (1937) at a time of limited computational means and when the marginal equilibrium method took its first steps, with the results obtained from the Finite Elements Method (FEM) under static conditions.

The ultimate objective was to propose new diagrams and equations for the rapid calculation of the Factor of Safety of various slopes under static and seismic conditions.

Even today, in various routine applications, engineers use the Taylor stability chart as the main tool for determining the safety factor (FS) for homogeneous soil slopes. In addition to Taylor's stability chart, there are many other renowned scientists who have improved or devised new approach ways of calculating the safety factor. I hope that this effort will be included in the list.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Περιεχόμενα	5
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 2 Γεωκίνδυνοι.....	10
2.1 Κατολισθήσεις.....	11
2.2 Σεισμός	14
2.3 Ρήγματα	16
2.4 Ηφαιστειακές Εκρήξεις.....	17
Κεφάλαιο 3 Ευστάθεια Πρανών.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες	20
3.3 Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων	27
Κεφάλαιο 4 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS.....	32
4.1 Ιστορικά.....	32
4.2 Περί λογισμικού.....	33
4.3 Πρόγραμμα Input-Program.....	34
4.4 Πρόγραμμα υπολογισμών-Calculation Program.....	43
4.5 Πρόγραμμα Εξαγωγής Αποτελεσμάτων - Output Program	48
4.6 Πρόγραμμα δημιουργίας καμπυλών - Curves Program.....	51
Κεφάλαιο 5: Μελέτη κατολισθητικών φαινομένων και ευστάθεια πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες.	53
5.1 Εισαγωγή.....	53
5.2: Προσδιορισμός και σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή ασφαλείας και ευστάθειας πρανών και δημιουργία εξισώσεων	54
5.3 Σύγκριση με τη μέθοδο Taylor.....	69
5.4 Σύγκριση νέων διαγραμμάτων με διαγράμματα Hoek & Bray (1977).....	79
5.5 Κατασκευή νέων διαγραμμάτων υπό στατικές συνθήκες.....	83
5.6 Παραμετρικές αναλύσεις υπό σεισμικές συνθήκες	87
5.7 Υπολογισμός νέων αριθμών ευστάθειας.....	106
5.8: Κατασκευή νέων διαγραμμάτων υπό ψευδοστατικές συνθήκες	122
Κεφάλαιο 6 Μελέτη ευστάθειας συμμετρικών επιχωμάτων	127

Κεφάλαιο 7 Εφαρμογή σε πρανές της Ικαρίας	131
7.1 Γεωλογική δομή	132
7.2 Υδατικοί πόροι	135
7.3 Σεισμικοτεκτονικές συνθήκες του νησιού και της περιοχής μελέτης	136
7.4 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά Στοιχεία της περιοχής μελέτης.....	137
7.5 Γεωτεχνικοί Παράμετροι Σχεδιασμού	140
7.6 Υπολογισμοί ευστάθειας πρανούς.....	141
Κεφάλαιο 8 Γενικά συμπεράσματα και προεκτάσεις.....	146
Βιβλιογραφία	149

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

Οι **κατολισθήσεις** (που είναι αναλογικές της ευστάθειας πρανών) αποτελούν διεθνώς ένα από τα πλέον καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα των οποίων οι επιπτώσεις έχουν σημαντικές και οικονομικές προεκτάσεις που πολλές φορές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη βιωσιμότητα πολλών οικισμών, ακόμη και ολόκληρων περιφερειών.

Η συχνότητα των **κατολισθήσεων** φαίνεται να βρίσκεται σε άνοδο. Οι κύριοι λόγοι για την παρατηρούμενη αύξηση των καταστροφών από κατολισθήσεις είναι η αύξηση της ευαισθησίας της επιφάνειας του εδάφους ως προς την ευστάθεια, αποτέλεσμα της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων και της αποδάσωσης, αλλά και της μεγαλύτερης ευπάθειας του εκτεθειμένου πληθυσμού ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της αστικοποίησης και της ανεξέλεγκτης χρήσης γης. Επιπλέον, οι παραδοσιακά ακατοίκητες περιοχές, όπως τα βουνά, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για λόγους ψυχαγωγικούς και μεταφορών, επιτείνοντας το πρόβλημα. Η αλλαγή κλίματος και οι πιθανές ακραίες καιρικές συνθήκες μπορούν επίσης να είναι ένας συντελεστικός παράγοντας.

Με άλλα λόγια, όταν οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο εδαφικό πρανές είναι μεγαλύτερες από τη διατμητική αντοχή του, τότε πρόκειται να αστοχήσει και να καταρρεύσει.

Τα άμεσα αποτελέσματα των κατολισθήσεων είναι η καταστροφή περιουσιών ή ακόμη και απώλεια ανθρώπινων ζώων ενώ τα έμμεσα η απόφραξη ρεμάτων ποταμών, ή πλήρωση λεκανών ταμιευτήρων, αλλοίωση ποταμών με κορήματα και λάσπες, καταστροφή αγροτικής γης κτλ.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι κατολισθητικά φαινόμενα διενεργούνται και κάτω από την επιφάνεια υδάτων (λίμνες ή θάλασσες), όμως εδώ δεν θα αναλυθούν διότι ερευνήσαμε μόνο χερσαία πρανή σε στραγγισμένες συνθήκες.

Τα δύο σημαντικότερα αίτια τα οποία εξετάζονται στην παρούσα εργασία, είναι η φόρτιση που ασκείται από το **εδαφικό βάρος** της μάζας του πρανούς, και η φόρτιση που ασκείται από τη **σεισμική επιτάχυνση** κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος.

Ο στόχος της εργασίας είναι η προσομοίωση προβλημάτων ευστάθειας πρανών (στατικά και σεισμικά) και η επίλυση τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ) για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας τους. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με μια άλλη μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών, τη μέθοδο Taylor, προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβειά της. Ο έλεγχος αφορούσε μόνο στατική φόρτιση καθώς η μέθοδος Taylor πραγματοποιεί αναλύσεις ευστάθειας πρανών υπό στατικές συνθήκες. Τέλος από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις τόσο υπό στατικές, όσο και υπό σεισμικές συνθήκες, προτάθηκαν νέες εξισώσεις με τις οποίες γίνεται ευκολότερος ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας (FS) και κατ' επέκταση της ευστάθειας ή μη των πρανών. Οι παραμετρικές αναλύσεις διεξήχθησαν με τη βοήθεια του λογισμικού Plaxis V.8.2.

Στην **πρώτη ενότητα** υπολογισμών υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας στο πρόγραμμα Plaxis και με την μέθοδο Taylor. Στο πρόγραμμα Plaxis δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα πρανούς το οποίο αποτελείται από στραγγισμένο εδαφικό υλικό. Στις αναλύσεις που ακολούθησαν για δεδομένο ειδικό βάρος, μέτρο ελαστικότητας Young και συνοχή προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας. Οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψιν ήταν το ύψος του πρανούς (την απόσταση από το πόδι έως το φρύδι), η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές, και η γωνία κλίσης του πρανούς. Αρχικά για δεδομένη γωνία εσωτερικής τριβής για διαφορετικές τιμές του ύψους και της γωνίας κλίσης του πρανούς υπολογίστηκε η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Ύστερα για δεδομένο το ύψος του πρανούς υπολογίστηκε η τιμή του συντελεστή ασφαλείας για διαφορετικές τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής και για διαφορετικές τιμές της γωνίας κλίσης του πρανούς. Επιπρόσθετα επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις για τις τρεις σεισμικές κατηγορίες της Ελλάδας με χρήση της ψευδοστατικής μεθόδου. Έπειτα για τις ίδιες εδαφικές καταστάσεις και γεωμετρίας πρανών υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας και με την μέθοδο Taylor όπου πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των εξαγόμενων συντελεστών από το λογισμικό Plaxis υπό στατικές συνθήκες. Το τελικό προϊόν ήταν η κατασκευή νέων διαγραμμάτων υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας βάση των τιμών του προγράμματος.

Στην **δεύτερη ενότητα** υπολογισμών εξετάστηκε κατά πόσο επηρεάζεται ο συντελεστής ασφαλείας συμμετρικών πρανών από την μεταξύ τους απόσταση. Στο λογισμικό Plaxis δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα με πρανή τα οποία κοιτάνε προς την αντίθετη κατεύθυνση και η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας ήταν ακριβώς η ίδια με την οποία ακολουθήθηκε και στην πρώτη φάση. Αρχικά, θεωρήθηκε σταθερή η γωνία εσωτερικής τριβής ενώ μεταβάλλονταν οι τιμές των υψών και των γωνιών κλίσης των πρανών. Ύστερα, θεωρήθηκε σταθερό το ύψος των πρανών, ενώ μεταβάλλονταν οι τιμές των γωνιών εσωτερικής τριβής και οι τιμές των γωνιών κλίσης των πρανών. Στις δύο περιπτώσεις για κάθε αλλαγή των τιμών των παραπάνω παραμέτρων άλλαζε και η τιμή της απόστασης μεταξύ των πρανών (οι αποστάσεις μεταξύ των πρανών υπολογίζονται από τα φρύδια τους). Στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι διαφορές των τιμών του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο συμμετρικών πρανών (επιχωμάτων) και μεμονωμένων πρανών.

Στην **τρίτη ενότητα** υπολογισμών πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή νέου διαγράμματος ευστάθειας πρανών σε πρανές της Ικαρίας και η σύγκριση των εξαγόμενων τιμών από το διάγραμμα και από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Το πρανές προσομοιάστηκε με ένα γεωμετρικό μοντέλο πρανούς στο λογισμικό Plaxis. Το γεωμετρικό μοντέλο που σχεδιάστηκε ήταν μια απλοποίηση της πραγματικότητας, ενώ οι ιδιότητες του υλικού του προσομοιώματος που εισήχθησαν στο λογισμικό προσέγγισαν τις ιδιότητες του πραγματικού υλικού από το οποίο αποτελείτο το πρανές που εξετάστηκε για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Για όλες τις περιπτώσεις σε όλες τις φάσεις υπολογισμού δεν ελήφθη υπόψιν η επίδραση του νερού στο πρανές. Το νερό απουσιάζει και στις τρεις ενότητες υπολογισμών του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς καθότι μελετήθηκαν στραγγισμένες (drained) καταστάσεις.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- ❖ Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα ζητήματα που πραγματεύεται η εργασία, μαζί με τον στόχο για τον οποίο πραγματοποιείται και την δομή της.
- ❖ Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους βασικούς γεωκινδύνους που συντελούνται στη γήινη επιφάνεια. Αναφέρονται οι βασικές κατηγορίες τους, τα αίτια από τα οποία προκαλούνται και οι επιπτώσεις που έχουν στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.
- ❖ Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σχετικά με την ευστάθεια των πρανών. Εδώ περιγράφονται οι κατηγορίες των πρανών, οι παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθειά τους, τα αίτια τα οποία οδηγούν στην αστοχία τους, οι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειάς τους και κάποιοι βασικοί κανονισμοί.
- ❖ Στο 4^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση του προγράμματος Plaxis το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις που εκτελέστηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας των πρανών.
- ❖ Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπολογισμοί του συντελεστή ασφαλείας των πρανών με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού Plaxis σε σύγκριση με την μέθοδο Taylor (1937) και νομογραφημάτων Hoek & Bray (1977), με την χρήση αντίστοιχων διαγραμμάτων υπό στατικές συνθήκες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας υπό σεισμικές συνθήκες τα οποία υπολογίστηκαν με τη ψευδοστατική μέθοδο και οι εξισώσεις αυτών.
- ❖ Στο 6^ο Κεφάλαιο εξετάστηκε κατά πόσο ο συντελεστής ασφαλείας επηρεάζεται από την απόσταση μεταξύ δύο συμμετρικών γεωμετρικά επιχωμάτων με το ίδιο εδαφικό υλικό.
- ❖ Στο 7^ο Κεφάλαιο, μελετήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας σε ένα πραγματικό πρανές σε περιοχή της Ικαρίας.
- ❖ Στο 8^ο Κεφάλαιο αναφέρονται κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Επίσης αναφέρονται κάποιες πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2 Γεωκίνδυνοι

Ο όρος **‘γεωκίνδυνος’** είναι σύνθετη λέξη και προέρχεται από την ένωση της λέξης ‘γή’ και ‘κίνδυνος’. Επομένως, αφορά οιοδήποτε γεωλογικό, υδρογεωλογικό ή γεωμορφολογικό συμβάν ή διαδικασία που μπορεί να προκαλέσει άμεσο ή δυνητικό κίνδυνο και να οδηγήσει σε καταστροφές και ανεξέλεγκτες καταστάσεις (Psarrououlos, 2016).

Οι Γεωτεχνικοί Μηχανικοί καλούνται να εντοπίσουν μια σειρά από προκλήσεις που αφορούν μια ποικιλία γεωκινδύνων και εδαφικών αστοχιών που απειλούν την ασφάλεια και τη σωστή λειτουργία κάθε τεχνικού έργου.

Ο φλοιός της Γης θεωρείται από τους περισσότερους ανθρώπους κάτι το πολύ σταθερό. Μια αντίληψη που μολονότι είναι βαθιά ριζωμένη μέσα μας κλονίζεται σημαντικά σε βίαιες αναταράξεις του, όπως για παράδειγμα οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις ή οι κατολισθήσεις. Μόνο όταν συμβούν τέτοιου είδους ασυνήθιστα παροξυσμικά φαινόμενα, τότε στρέφεται και το δημόσιο ενδιαφέρον στις δυναμικές διεργασίες του γήινου φλοιού. Οι μικρότερες κινήσεις του γήινου φλοιού περνούν από το σύνολο απαρατήρητες, μπορεί όμως να αποδειχθούν πολλές φορές εξίσου οικονομικά επιζήμιες.

Οι γεωκίνδυνοι έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- εκδηλώνονται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα
- αντιπροσωπεύουν πιθανές καταστροφές
- δημιουργούν καταστάσεις έκτακτης ανάγκης
- έχουν άμεσα και ακούσια αποτελέσματα

Μία **φυσική καταστροφή** είναι η συνέπεια ενός **φυσικού κινδύνου** (π.χ. μίας ηφαιστειακής έκρηξης, ενός σεισμού, μίας κατολίσθησης ή μιας πλημμύρας) η οποία περνάει από το στάδιο της πιθανότητας σε μία ενεργή φάση και κατά συνέπεια έχει επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η ανθρώπινη αδυναμία μπροστά στις φυσικές καταστροφές οδηγεί σε οικονομικές, δομικές και ανθρώπινες απώλειες. Το μέγεθος της απώλειας εξαρτάται από την ικανότητα του πληθυσμού να υποστηρίξει ή να αντισταθεί στην καταστροφή, την ανθεκτικότητά του, την επάρκειά του σε κατάλληλο εξοπλισμό και είδη πρώτης ανάγκης. Έτσι ένας φυσικός κίνδυνος δεν θα καταλήξει ποτέ σε φυσική καταστροφή σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα. Κατά συνέπεια, ο όρος ‘φυσικός’ δέχεται έντονη κριτική καθώς τα γεγονότα δεν είναι κίνδυνοι ή καταστροφές χωρίς ανθρώπινη συμμετοχή.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ταξινομεί τις φυσικές καταστροφές στις εξής κατηγορίες :

- ❖ **Γεωφυσικές** (π.χ. σεισμοί, ηφαιστειακές εκρήξεις και κατολισθήσεις)
- ❖ **Υδρολογικές** (π.χ. πλημμύρες)
- ❖ **Μετεωρολογικές** (π.χ. θύελλες και καταιγίδες)
- ❖ **Κλιματολογικές** (π.χ. ακραίες υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες).
- ❖ **Βιολογικές** (λόγω της έκθεσης των ζώντων οργανισμών σε παθογόνους μικροοργανισμούς)

Στην Ελλάδα, οι πιο συνηθισμένες φυσικές καταστροφές οφείλονται σε σεισμούς, έντονες βροχοπτώσεις, πλημμύρες και πυρκαγιές, που μπορεί να οδηγήσουν σε αποψιλώσεις περιοχών, όπου για μεγάλες κλίσεις, ευνοούν τη δημιουργία κατολισθήσεων.

Στη παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη κατηγορία των γεωφυσικών καταστροφών και συγκεκριμένα με τις κατολισθήσεις και τη πρόβλεψη τους μέσα από τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες.

2.1 Κατολισθήσεις

Μια κατολίσθηση είναι μια μετακίνηση βραχομάζας, χωμάτων ή κορημάτων σε μια κατωφέρεια λόγω της βαρύτητας. Οι κατολισθήσεις συμβαίνουν σε τακτική βάση ανά τον κόσμο, πάνω ή κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, καθώς είναι μέρος της φυσικής εξέλιξης των εδαφών.

Οι κατολισθήσεις ανήκουν σε μια ομάδα των γεωλογικών διεργασιών, που αναφέρονται ως **μετακίνηση μαζών**: η μαζική μετακίνηση περιλαμβάνει την προς τα έξω ή προς τα κάτω κίνηση της εδαφικής μάζας, υπό την επίδραση της βαρύτητας. Σε οποιαδήποτε στιγμή τα πρηνή βρίσκονται σε καταστάσεις που κυμαίνονται από πολύ σταθερές και ασφαλείς έως οριακά σταθερές και επικίνδυνες να κατολισθήσουν.

Ταξινομούνται σε έξι κατηγορίες ανάλογα με τον *τύπο μετακίνησης*.

- ❖ **Πτώση** μάζας που αποκολλάται από ένα απότομο πρηνές κατά μήκος μίας επιφάνειας πάνω στην οποία ενεργούνται ελάχιστες διατμητικές τάσεις.
- ❖ **Ανατροπή** μαζών η οποία οφείλεται σε δυνάμεις οι οποίες δημιουργούν ορμή γύρω από ένα σημείο περιστροφής το οποίο βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους της επηρεαζόμενης βραχώδους μάζας.
- ❖ **Ολίσθηση** μαζών που οφείλεται στην εξέλιξη του μετώπου της ολίσθησης γαιών. Χαρακτηρίζεται από εις βάθος αστοχία του υλικού και ολίσθηση της διαρρηγνυόμενης μάζας σε καθορισμένη ζώνη. Η ολίσθηση έχει τέσσερις κατηγοριοποιήσεις:
 1. Μεταβατική
 2. Περιστροφική
 3. Μπλοκ
 4. Πλευρική
- ❖ **Ροή** περιλαμβάνει την παραμόρφωση ολόκληρης της μάζας του εδάφους που στη συνέχεια ρέει προς τα κάτω ως ιξώδες ή κολλώδες υγρό. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε νερό ή όταν σεισμικές δονήσεις οδηγούν σε υγροποίηση του εδάφους. Η ροή μπορεί να διακριθεί σε δύο τύπους:
 1. Ροή κορημάτων μπορεί να σχηματιστεί γρήγορη και με ταχύτατη ροή κορεσμένων μη πλαστικών κορημάτων σε ένα απόκρημνο κανάλι. Η ένταση και η διάρκεια των βροχοπτώσεων ευνοούν τη ροή.
 2. Λασποροή (ροή γαιών) δημιουργείται στην υγρή άμμο ή σε λασπώδη μείγματα αργίλου, τα οποία έχουν μεταφερθεί δευτερογενώς με το νερό ή έχουν υγροποιηθεί με δομικές αλλαγές που λαμβάνουν χαρακτήρα ροής. Συνήθως

ακολουθούν χαντάκια ή ρηχές καταπτώσεις και απλώνονται σε επίπεδα λεπτά στρώματα.

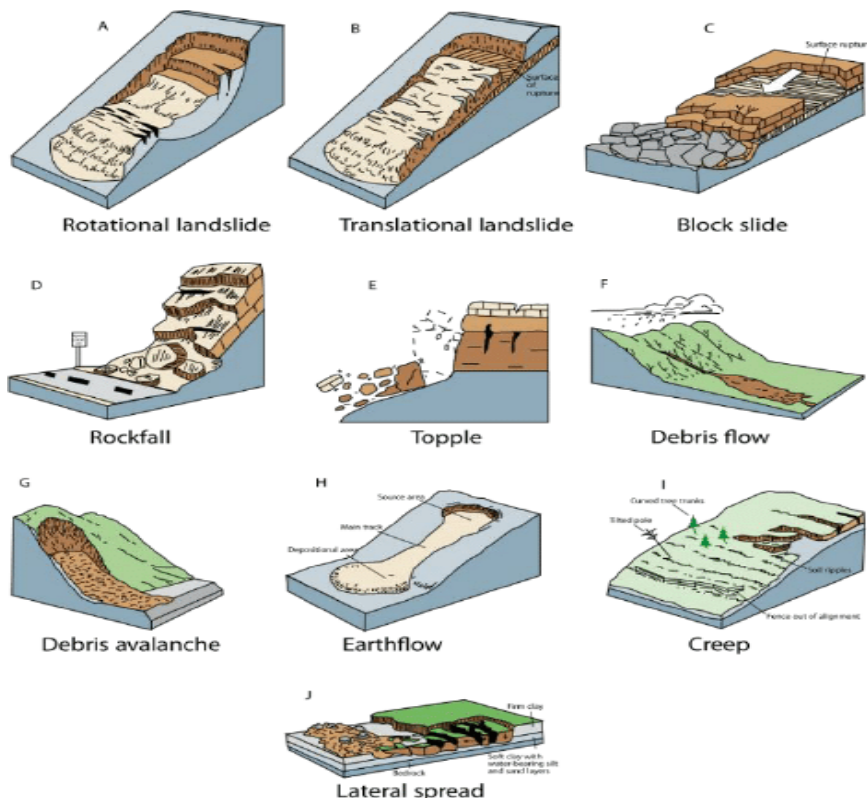
- ❖ **Ερπυσμός** ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το έδαφος κάτω από σταθερή δύναμη του βάρους εκδηλώνει αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού.
- ❖ **Σύνθετες κινήσεις** είναι το αποτέλεσμα δύο ή περισσότερων εκ των πέντε κατηγοριών.

Οι ταχύτητες μετακίνησης για τους διάφορους τύπους κατολισθήσεως ποικίλουν κατά πολύ:

- Μερικές κατολισθήσεις καταγράφουν μόνο μερικά εκατοστά μετακίνησης ανά έτος
- Ορισμένες ροές κορημάτων έχουν καταγράψει ταχύτητες των 100χλμ/ώρα, ενώ κατολισθήσεις πετρωμάτων μπορούν να φτάσουν ταχύτητες των 350χλμ/ώρα

Άρα σύμφωνα με τον *ρυθμό μετακίνησης*, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- ❖ **Αργές μετακινήσεις:** η παραμόρφωση είναι προοδευτική και μπορεί να συνοδεύεται από ρήγμα, αλλά καταρχήν δεν υπάρχει ξαφνική επιτάχυνση. Η επιτάχυνση είναι προοδευτική και καταλήγει σε ξαφνική ολίσθηση μετά από μία φάση προειδοποιητικών σημείων (θραύσεις, παραμορφώσεις, εδαφική υποχώρηση), η οποία δεν αποτελεί άμεση απειλή εάν παρακολουθείται και ελέγχεται σωστά.
- ❖ **Γρήγορες μετακινήσεις:** η διαδικασία της γρήγορης εδαφικής υποχώρησης και βίαιης αναπάντεχης κατάρρευσης.

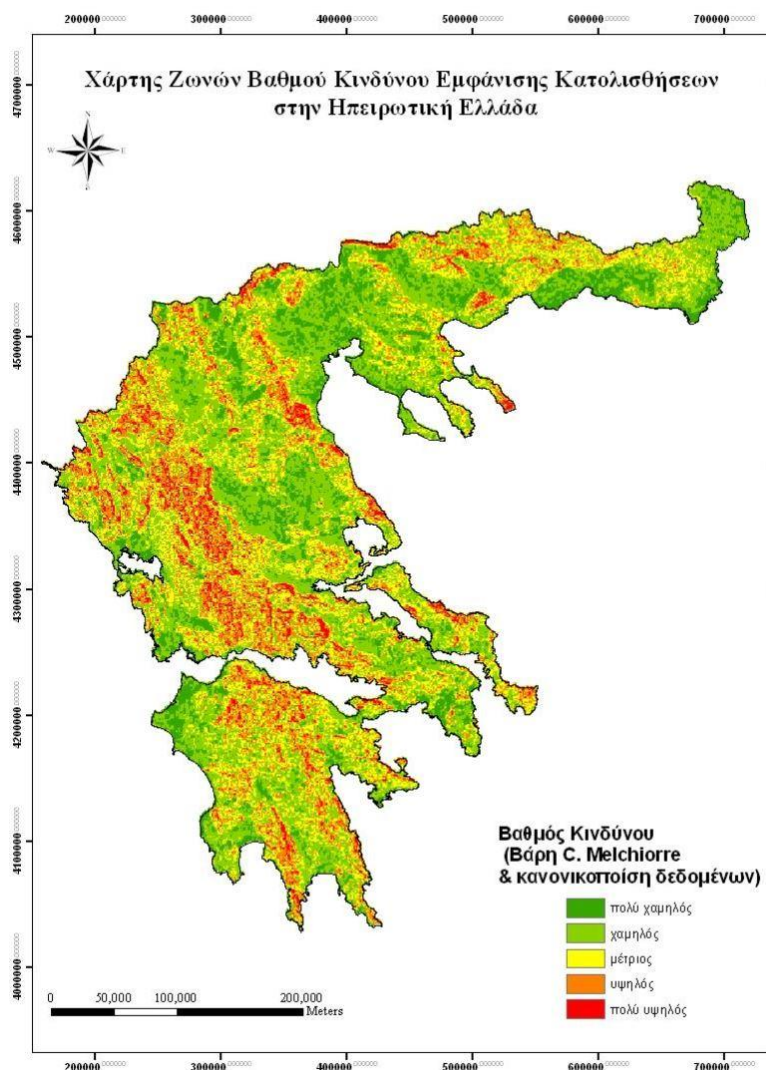


Εικόνα 2.1 Βασικές κατηγορίες κατολισθήσεων

Ο κίνδυνος των κατολισθήσεων γενικά παραμελείται σε σχέση με άλλους κινδύνους, όπως ο κίνδυνος από σεισμό ή ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθότι πρόκειται για σποραδικά φαινόμενα, συνήθως μικρής έκτασης και περιορισμένων επιπτώσεων. Ωστόσο, ορισμένες κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές λόγω της ποικιλομορφίας τους, της συχνότητάς τους και της ευρείας γεωγραφικής έκτασης.

Στην πραγματικότητα όμως, πρέπει να μας απασχολεί περισσότερο ο τεράστιος αριθμός κατολισθήσεων μετρίου έως μικρού μεγέθους, οι οποίες είναι τόσο εκτεταμένες, που το σχετικό κόστος στην κοινωνία είναι πολύ περισσότερο από το κόστος των σπάνιων καταστροφικών γεγονότων μετακίνησης μαζών υψηλής ισχύος.

Επιπρόσθετα ο αριθμός απωλειών λόγω γεγονότων χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας αυξάνεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία αυξάνει τους κινδύνους των κατολισθήσεων (δημιουργία δρόμων, λατομία κ.λπ.) και ευνοεί ευάλωτες καταστάσεις.



Εικόνα 2.2 Χάρτης ζωνών κινδύνου εμφάνισης κατολισθήσεων στην Ηπειρωτική Ελλάδα.
(Πηγή: Βολιώτη, 2009)

2.2 Σεισμός

Σεισμός είναι η ξαφνική εκτόνωση ενέργειας στον φλοιό της γης λόγω των πιέσεων, που υφίστανται τα πετρώματα, που βρίσκονται στα βαθύτερα στρώματα της γης, ο επονομαζόμενος στερεός μανδύας (περιέχεται στην λιθόσφαιρα) και στο λιωμένο μανδύα (την ασθενόσφαιρα).

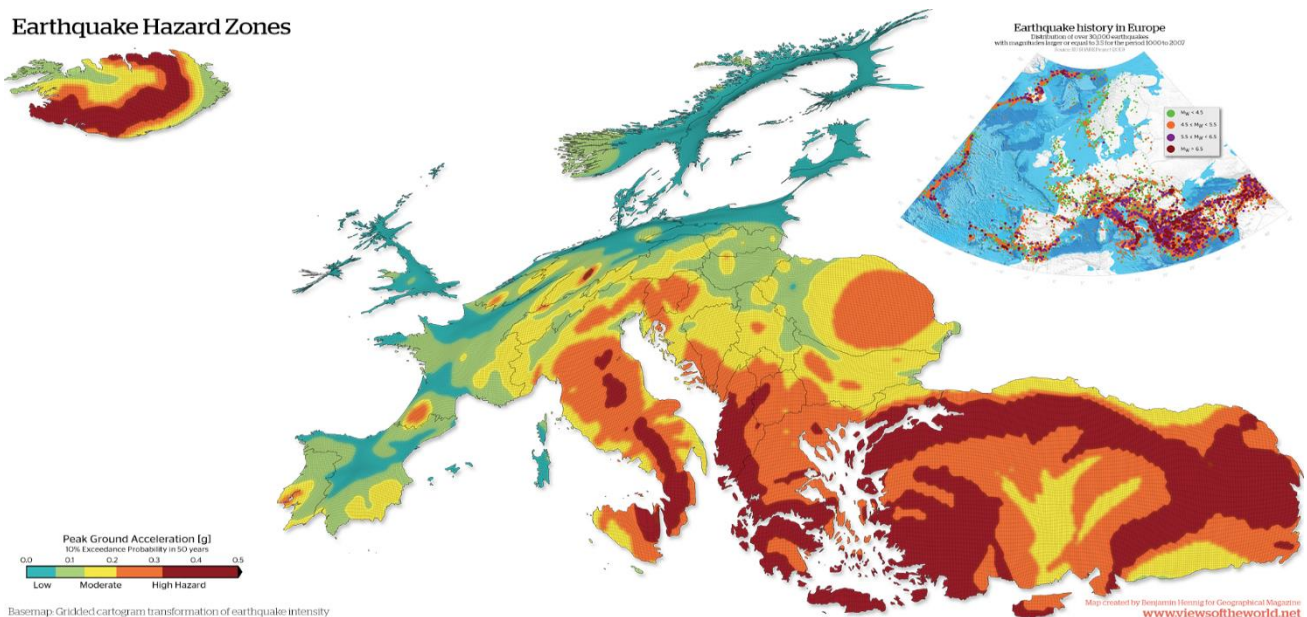
Η εκτόνωση ενέργειας ενός σεισμού ξεκινάει από τον πυρήνα, μερικά χιλιάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια της Γης, στο ρήγμα δύο τμημάτων του φλοιού, ολισθαίνοντας το ένα πάνω στο άλλο.

Οι σεισμοί χαρακτηρίζονται από το μέγεθος (η σεισμική ενέργεια μετριέται στην κλίμακα Richter), ο πυρήνας ή υπόκεντρο (την υπόγεια θέση, όπου δημιουργήθηκε ο σεισμός) και το επίκεντρο (η κατακόρυφη προβολή του πυρήνα στην επιφάνεια της γης).

Ένα πρηνές διατρέχει μεγαλύτερο κίνδυνο να κατολισθήσει κατά τη διάρκεια ενός σεισμού λόγω της σεισμικής επιτάχυνσης που αναπτύσσεται στη μάζα του.

Ειδικά στον τόπο μας, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων, διατρέχουμε ιδιαίτερα συχνή περίοδο εκδήλωσης σεισμών που προκαλούν μεγάλες ανθρώπινες και υλικές καταστροφές. Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένας χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης από το Global Earthquake Model (2013). Αξίζει να αναφερθεί ότι η Ελλάδα κατέχει την **πρώτη** θέση στην Ευρώπη από πλευράς σεισμικότητας και την έκτη παγκοσμίως.

Earthquake Hazard Zones



Εικόνα 2.3 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (Πηγή: Global Earthquake Model, 2013)

Τα δεδομένα σεισμικού κινδύνου που συλλέχθηκαν για αυτό το μοντέλο αποτελούνταν από αρχεία με περισσότερους από 30.000 σεισμούς με μέγεθος 3,5 και άνω στην κλίμακα Ρίχτερ που σημειώθηκαν από το έτος 1000, όπως φαίνεται στον μικρότερο χάρτη. Επίσης για τη καλύτερη εκτίμηση του κινδύνου κατά τη δημιουργία του χάρτη έχουν ληφθεί υπόψη και οι καταστροφικές επιπτώσεις κάθε σεισμού. Αυτό έγινε διότι οι μεγαλύτερες καταστροφές δεν συμβαίνουν μόνο εκεί που γίνονται οι μεγαλύτεροι σεισμοί.

Για παράδειγμα, αν ένας μέτριος σεισμός προκληθεί σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις, ενώ αν το επίκεντρο του είναι σε θαλάσσια περιοχή μακριά από στεριά ίσως να μην έχει κανένα αντίκτυπο. Ένα χειροπιαστό παράδειγμα είναι ότι ένας από του ισχυρότερους σεισμούς στη σεισμική ζώνη της Ισλανδίας που συνέβη το 1784 εκτιμώμενου μεγέθους 7.2 της κλίμακας Ρίχτερ προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε αγροτικές κατοικίες και σκότωσε τρεις ανθρώπους. Σε αντίθεση με πρόσφατο σεισμό στην κεντρική Ιταλία το 2016 μεγέθους 6.2 Ρίχτερ που οδήγησε σε 299 θανάτους και αφήνοντας 4,500 άστεγους πολίτες.



Εικόνα 2.4 -Αεροφωτογραφία νησιών Ιονίου 1953. Οι σεισμοί προκάλεσαν εκτεταμένες καταστροφές σε Ζάκυνθο, Ιθάκη και Κεφαλονιά. Ο αριθμός των θυμάτων ανήλθε σε 455 νεκρούς, 2.412 τραυματίες και 21 αγνοούμενους, ενώ μεγάλο μέρος του πληθυσμού των νησιών τα εγκατέλειψε εξαιτίας των σεισμών.

Η διεπιστημονική και διεθνική έρευνα για τους σεισμικούς κινδύνους και η βαθύτερη κατανόηση των δεσμών μεταξύ κινδύνου (risk) και επικινδυνότητας (hazard) αποτελούν σημαντικά στοιχεία για τον μετριασμό των ζημιών από σεισμούς και τη μείωση του κινδύνου για τους πληγέντες πληθυσμούς που ζουν στις πιο επικίνδυνες περιοχές.

Ο *σεισμικός κίνδυνος* είναι η εκτίμηση της πιθανότητας να συμβούν σεισμοί δεδομένης καταστροφικότητας σε ένα τόπο.

Η *σεισμική επικινδυνότητα* περιγράφει το δυναμικό μιας περιοχής για την εκδήλωση επικίνδυνων φυσικών παραγόντων (εδafική κίνηση, εδαφικές διαρρήξεις, ρευστοποίηση εδάφους, κατολισθήσεις) που σχετίζονται με τη γένεση σεισμών.

Η προσπάθεια μείωσης του σεισμικού κινδύνου αντικατοπτρίζει τη γενικότερη προσπάθεια του ανθρώπου να αντιμετωπίσει τα φυσικά φαινόμενα. Η έλλειψη προβλεψιμότητας, η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της πολιτικής, και η δυσκολία αξιολόγησης της επιτυχίας ή μη ενός προγράμματος αντιμετώπισης αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της διαχείρισης φυσικών καταστροφών.

Επιπρόσθετα ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα **Ρευστοποίησης Εδάφους**.

Η ρευστοποίηση εμφανίζεται συνήθως σε κορεσμένα χαλαρά αμμώδη εδάφη στα οποία η αντοχή και δυσκαμψία μειώνεται σημαντικά κατά την διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης άλλης απότομης φόρτισης. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται σε αύξηση της πίεσης των πόρων που έχει ως συνέπεια τη σημαντική ακόμη και εξολοκλήρου μείωση της αντοχής του εδάφους. Το ρευστοποιημένο έδαφος οδηγείται διαφορική καθίζηση, ολίσθηση και στροφή. Αυτή η μετακίνηση μπορεί να προκαλέσει καθίζηση και πιθανόν καταστροφή των υποστηριζόμενων κατασκευών. Η αναπτυσσόμενη υπερπίεση μπορεί επίσης να προκαλέσει καθιζήσεις εδάφους και την κατάρρευση φραγμάτων.

2.3 Ρήγματα

Με τον όρο **ρήγμα** (αγγλ. fault) ονομάζεται στη γεωλογία η διακοπή της συνέχειας μιας ομάδας στρωμάτων πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης, η οποία συμβαίνει κατά επίπεδη επιφάνεια και σε μεγάλη έκταση και εκτετέρωθεν της οποίας πραγματοποιείται ή πραγματοποιήθηκε στο παρελθόν σχετική κίνηση των στρωμάτων. Ετυμολογικά, ο όρος παράγεται από το αρχαίο ελληνικό ρήμα *ρήγνυμι*, που σημαίνει «ραγίζω», «σπάζω», «θραύω», «διασπώ».

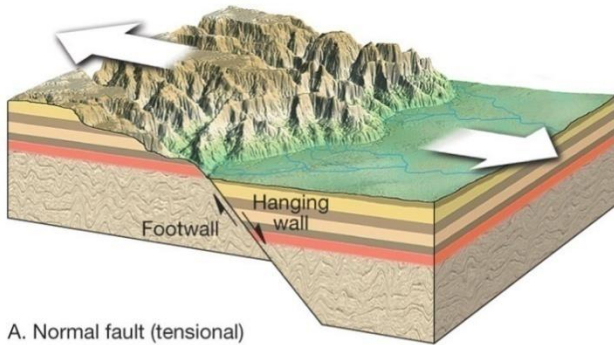
Τα ρήγματα δημιουργούνται από τις ενεργές **τάσεις** σε μια περιοχή, που οφείλονται σε γεωτεκτονικά αίτια, δηλαδή στις σημαντικές και εκτεταμένες κινήσεις και παραμορφώσεις του φλοιού της Γης όπως αυτές περιγράφονται από τη Θεωρία των Λιθοσφαιρικών Πλακών και την Γεωδυναμική (Γήινα ενδογενή φαινόμενα).

Τα ρήγματα, αποτελούν θραυσιγενείς δομές παραμόρφωσης που σχηματίζονται στα 10-15 πρώτα km του γήινου φλοιού, ως αντίδραση στις επιβαλλόμενες διατμητικές τάσεις και στη διατμητική κίνηση που λαμβάνει χώρα κατά μήκος του ρήγματος (Λόζιος, 2012).

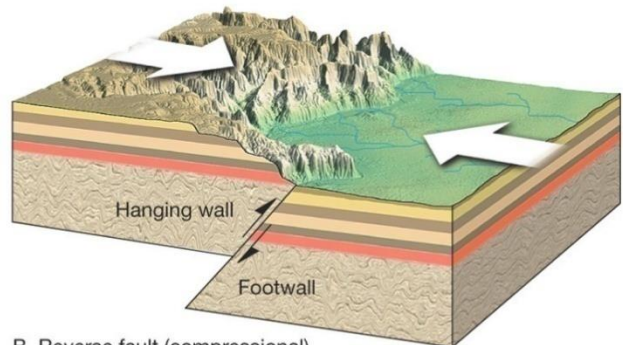
Τα δύο τμήματα εκατέρωθεν του επιπέδου του ρήγματος ονομάζονται **τεμάχη** ή **μπλοκ** ή **σκέλη** του ρήγματος. Η επιφάνεια που προκύπτει από τις σχετικές μετακινήσεις των δύο σκελών ονομάζεται **κάτοπτρο** του ρήγματος. Το κάτοπτρο του ρήγματος δεν είναι πάντα ορατό: είτε γιατί έχει διαβρωθεί από την τελευταία ολίσθηση των τεμαχών, είτε διότι είναι ενδεχομένως καλυμμένο με κάποιο υπερκείμενο ίζημα, είτε γιατί το ρήγμα δεν έχει επιφανειακή εμφάνιση. Στην περίπτωση που είναι ορατό και δεν έχει υποστεί έντονη διάβρωση παρατηρούνται σχεδόν πάντα οι **γραμμές ολίσθησης**, οι οποίες αποτυπώνουν την κίνηση των τεμαχών.

Ανάλογα με την κίνηση των τεμαχών τους, τα ρήγματα διακρίνονται σε:

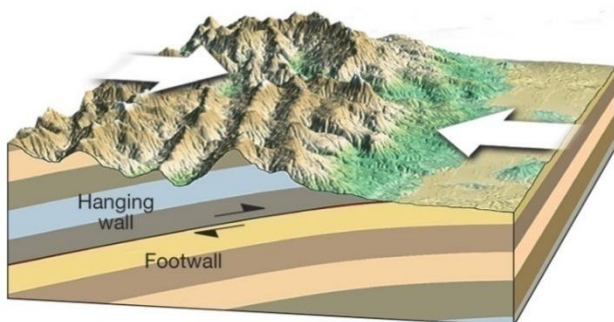
1. Ρήγμα Μετάπτωσης ή Κανονικό (Normal fault)
2. Ρήγμα Επώθησης ή Ανάστροφο (Reverse fault)
3. Ρήγμα Οριζόντιας Μετατόπισης (Strike-slip fault)
4. Ρήγμα Πλάγιας Ολίσθησης (Oblique-slip fault)



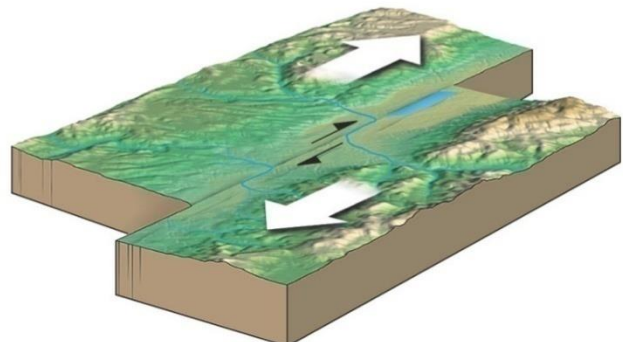
A. Normal fault (tensional)



B. Reverse fault (compressional)



C. Thrust fault (compressional)



D. Strike-slip fault (shear)

Copyright © 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.

Εικόνα 2.5 Κατηγορίες ρηγμάτων ανάλογα με τις μετακινήσεις τεκτονικών πλακών

2.4 Ηφαιστειακές Εκρήξεις

Τα ηφαίστεια μπορεί να χαρακτηριστούν ως ανοίγματα του φλοιού της γης, μέσα από τα οποία γίνεται εκροή ρευστών πετρωμάτων, στάχτης και αερίων.

Τα ηφαίστεια χωρίζονται σε **ενεργά** και **ανενεργά**.

Ενεργό είναι ένα ηφαίστειο αν έχει καταγραφεί κάποια δραστηριότητα του σε ιστορικά κείμενα ή αν επιστημονικές μελέτες έδειξαν ότι υπήρξε δραστηριότητα τα τελευταία 10,000 χρόνια.

Τα ενεργά ηφαίστεια μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κύρια είδη:

- **Εκρηκτικά ηφαίστεια**, που μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες εκρήξεις οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν εν μέρει το ηφαίστειο, να προβάλουν υψηλούς κώνους βραχώδους υλικού (βραχώδεις αποθέσεις, στάχτη, ατμό κ.λπ.) το οποίο

εκσφενδονίζεται στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια πέφτει κάτω κατά μήκος των πλευρών του ηφαιστείου, καθώς και να δημιουργήσει ροές λάβας, λάσπης και κατακρημνισμάτων κατά μήκος των πλευρών του ηφαιστείου, σεισμούς, εκπομπές επιβλαβών αερίων. Η ηφαιστειακή εκρηκτικότητα προέρχεται συνήθως από αέρια, που διογκώνονται μέσα σε παχύρρευστη λάβα ή από νερό, που εισέρχεται σε κάποιο μαγματικό θάλαμο ή κανάλι.

- **Εκχυτικά ηφαιστεια**, στα οποία παρατηρείται μεταξύ άλλων αργή ροή λάβας, μικρές εκρήξεις, εδαφικές παραμορφώσεις, πίδακες λάβας, εκπομπές ατμών και αερίων.

Τα ηφαιστεια δημιουργούνται λόγω της εσωτερικής δυναμικής της γης. Όταν υπόγειο πυρακτωμένα πετρώματα (μάγμα) μετακινούνται μέσα από τις ρωγμές του εξωτερικού στρώματος της γης (λιθόσφαιρα) και φτάνουν στην επιφάνεια του φλοιού της γης, δημιουργείται ένα ηφαιστειο.

Το μάγμα έχει πολύ ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Όταν φτάσει στην επιφάνεια, η θερμοκρασία του κυμαίνεται μεταξύ 700 – 1200°C και η πυκνότητά του μεταξύ 2300 και 2700 kg/m³. Το ιξώδες είναι η ικανότητα ροής και εξαρτάται από την χημική σύνθεση του μάγματος. Το μάγμα με υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου και χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και μαγνήσιο παράγει λάβα με υψηλό ιξώδες (ρυσολίτες). Μάγμα με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο (Mg), ασβέστιο (Ca) και σίδηρο (Fe) παράγει λάβα με χαμηλό ιξώδες (βασάλτες).



Εικόνα 2.5 Έκρηξη ηφαιστείου

Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι μία ηφαιστειακή έκρηξη μπορεί να προκαλέσει και άλλους κινδύνους όπως σεισμούς, εκρηκτικό κύμα πίεσεως, πυροκλαστικές ροές και μεγακυματισμούς, τέφρα, ηφαιστειακή στάχτη και αέρια, ροές λάβας, (lahars), κατολισθήσεις κατακρημνισμάτων, κατολισθήσεις, μεγάλες πυρκαγιές και τσουνάμι.

Κεφάλαιο 3 Ευστάθεια Πρανών

3.1 Εισαγωγή

Τα πρανή ορίζονται ως κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- A. Τα **φυσικά** πρανή, όπου η δημιουργία τους οφείλεται στις φυσικές διεργασίες, κυρίως της διάβρωσης, ως αποτέλεσμα ο σχηματισμός τους να προκύπτει σταδιακά και σε μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στον γεωλογικό χρόνο.
- B. Τα **τεχνητά** πρανή, όπως είναι λογικό, έχουν προέλθει από την επίδραση του ανθρώπου και διαμορφώνονται κατά την κατασκευή διάφορων τεχνικών έργων. Έχουν προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ανάλογα με τη χρήση τους και προκύπτουν από την εκσκαφή του εδάφους (πρανή ορυγμάτων) ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού (πρανή επιχωμάτων).

Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος, δημιουργούν με τη σειρά τους διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν την μάζα τους ούτως ώστε να εξομαλύνουν το έδαφος. Στις τάσεις αυτές αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους και στην περίπτωση που αυτές την υπερβούν, τότε οδηγούν σε θραύση του πρανού και σε κατολίσθηση (Turner & Schuster, 1996).

Ένα φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, ο παγετός, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα και οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία, δηλαδή την κατάρρευση εδαφικής μάζας, ενός φυσικού πρανού. Αστοχία μπορεί να προκληθεί και λόγω επέμβασης του ανθρώπου στην φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (ορύγματα, υποσκαφές, κ.α.).

3.2 Ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες

Σύμφωνα με τους Χαραλάμπους & Σακελλαρίου (2005), η ευστάθεια ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

- Από την βαρύτητα η οποία είναι και η κύρια δύναμη η οποία δρα ως παράγοντας αστάθειας του πρανούς. Οι δυνάμεις βαρύτητας του πρανούς δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό με αποτέλεσμα να μετακινηθεί ορισμένη μάζα του εδάφους προς τα κάτω και προς τα έξω.
- Από την δύναμη συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές και αντισταθμίζουν τις βαρυτικές δυνάμεις, επειδή διατηρούν σταθερή τη συνοχή του υλικού του.
- Από τη στρώση και την κατατμητικότητα του εδάφους, την αποστράγγιση του πρανούς, την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, καθώς και τις χρονικές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Σύμφωνα με τον Σακελλαρίου (2005), η ευστάθεια ενός πρανούς προσδιορίζεται με βάση τον συντελεστή ασφάλειας (Factor of Safety). Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τον λόγο των δυνάμεων που αντιστέκονται στην αστοχία του πρανούς, προς τις δυνάμεις που τείνουν να το ολισθήσουν. Διαιρείται η διατμητική αντοχή με τη διατμητική τάση.

$$FS = \frac{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Αντιδρώσες}}{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Δρώσες}} \quad (1)$$

Με βάση την αρχή οριακής ισορροπίας, σε περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας το πρανές θα αστοχήσει. Αυτό σημαίνει ότι ένα τμήμα του πρανούς θα ολισθήσει πάνω στην επιφάνεια αστοχίας λόγω των μεγάλων διατμητικών τάσεων που ασκούνται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν κατολισθητικά φαινόμενα στο πρανές και το φαινόμενο αυτό σταματάει στην περίπτωση που το πρανές έρθει στη θέση όπου οι νέες τάσεις που αναπτύσσονται, εξαιτίας της αλλαγής της γεωμετρίας και των εδαφικών χαρακτηριστικών του, δεν υπερβαίνουν τη διαθέσιμη αντοχή. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας μικρότερος της μονάδας δεν γίνεται αποδεκτός υπό στατικές συνθήκες, ενώ σε περίπτωση που η τιμή του συντελεστή ασφαλείας ισούται με τη μονάδα τότε υπάρχει οριακή ισορροπία σχετικά με την ευστάθεια του πρανούς. Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας δεν υπάρχει κίνδυνος να ολισθήσει το πρανές, διότι η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τις τάσεις που ασκούνται εξαιτίας των βαρυτικών δυνάμεων. Ο ιδανικός συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,4-1,5 υπό στατικές συνθήκες, ενώ σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης ο ιδανικός συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1-1,1 και πάνω.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος με την ανάλυση των ολικών τάσεων εφαρμόζεται σε κορεσμένα και σε μη στραγγισμένα εδάφη ή σε περιπτώσεις που οι πιέσεις των πόρων των εδαφών δεν είναι γνωστές. Ο δεύτερος τρόπος πραγματοποιείται με την ανάλυση των ενεργών τάσεων και χρησιμοποιείται συνήθως σε στραγγισμένα εδάφη ή σε περιπτώσεις που είναι γνωστές οι πιέσεις των πόρων με ακρίβεια.

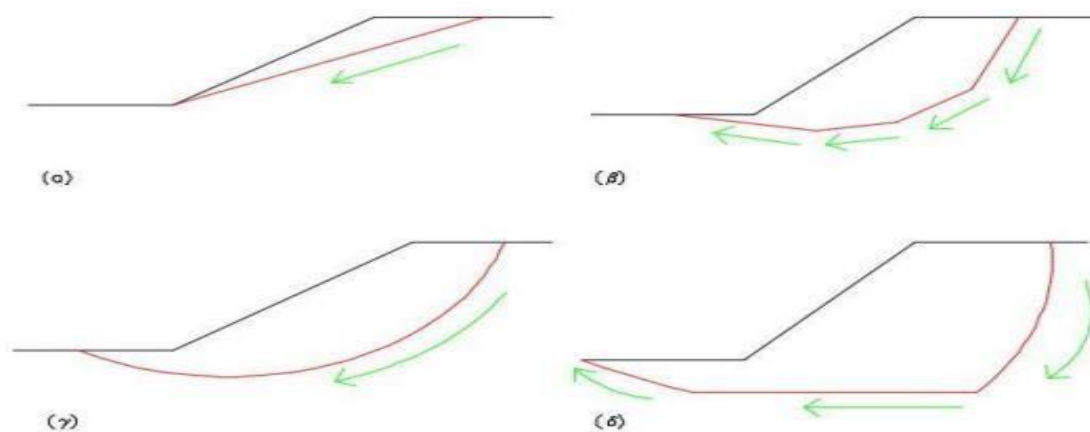
3.2.1 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών υπό στατικές συνθήκες

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό της ευστάθειας πρανών είναι αυτοί που στηρίζονται στην ανάλυση οριακής ισορροπίας και στην ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων.

Στην μέθοδο ευστάθειας πρανών υπό στατικές συνθήκες τα βήματα τα οποία ακολουθούνται με την χρήση της μεθόδου οριακής ισορροπίας είναι:

- Ο καθορισμός των μηχανισμών αστοχίας. Πρέπει να καθοριστεί λοιπόν, η γεωμετρία της επιφάνειας του πρανού. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι επίπεδη, πολυγωνική, κυκλική ή μη κυκλική
- Ύστερα θα πρέπει να καθοριστούν οι δυνάμεις οι οποίες εφαρμόζονται στην επιφάνεια αστοχίας του πρανού. Το έδαφος που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας θεωρείται άκαμπτο και έτσι η διάτμηση, με βάση το κριτήριο Mohr-Coulomb, συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια αστοχίας και εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια αστοχίας είναι τόσο διατμητικές (τ), όσο και ορθές (σ) και είναι ανομοιόμορφα κατανομημένες σε όλο το μήκος της επιφάνειας αστοχίας, καθώς και η μέγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους λίγο πριν την αστοχία
- Έπειτα αφού όλες οι δυνάμεις έχουν προσδιοριστεί πραγματοποιείται η χρήση των εξισώσεων ισορροπίας ($\Sigma F=0$ ή $\Sigma M=0$)

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου ανάλυσης οριακής ισορροπίας, είναι ότι η ευστάθεια του πρανού δίνει ένα συντελεστή ασφαλείας (factor of safety).



Εικόνα 3.1 Γεωμετρίες επιφανειών αστοχίας (Πηγή: Μίχα, 2017)

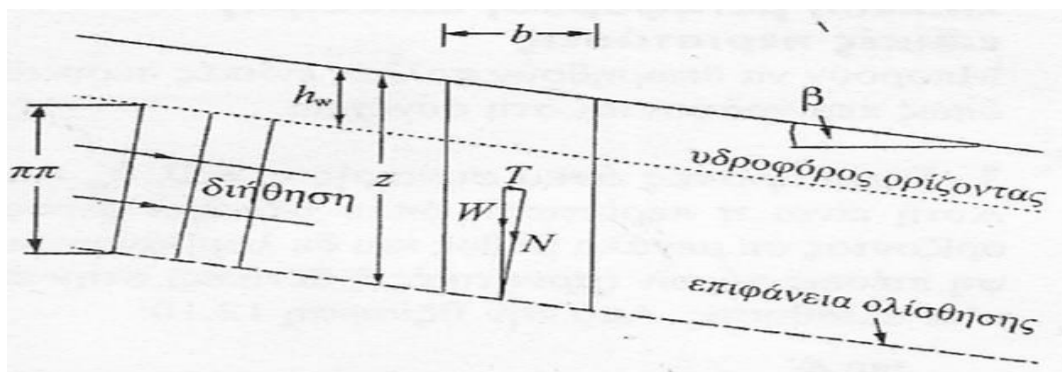
Ο συντελεστής ασφαλείας της ευστάθειας του πρανούς προσδιορίζεται με διάφορους τρόπους με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι πιο σημαντικοί:

- **Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση:** στην επίπεδη μεταφορική ολίσθηση γίνεται η παραδοχή ότι η μάζα του εδάφους κινείται επάνω από μια μόνο επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης παράλληλη στην επιφάνεια του εδάφους αγνοώντας τα φαινόμενα στα άκρα και τις πλευρές. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται περισσότερο σε κοκκώδη, συνεκτικά ($c=0$), διαστρωματωμένα εδάφη, εδάφη με διαβρωμένες διατομές που δημιουργούν ανώτερους ασθενέστερους οριζόντες και πρανή τα οποία έχουν μια αβαθή πλάκα ολίσθησης ώστε η διατμητική αντοχή στην επιφάνεια ολίσθησης να έχει μειωθεί στην παραμένουσα τιμή της. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος h_w , με σταθερή δ . Σε περίπτωση που το ειδικό βάρος του εδάφους επάνω και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα έχει την ίδια τιμή γ , τότε ο γενικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας για συνθήκες ενεργών τάσεων είναι:

$$FS = \frac{c + \tan\phi \cos^2\beta (\gamma z - \gamma_w z + \gamma_w h_w)}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \quad (2)$$

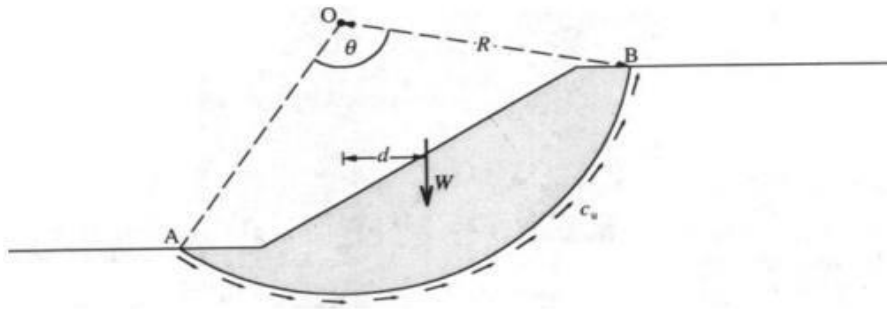
Σε περίπτωση που δεν υπάρχει στο πρανές νερό και η συνοχή είναι μηδενική τότε ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με:

$$FS = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad (3)$$



Εικόνα 3.2 Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση (Πηγή: Barnes, 2005)

- **Ανάλυση κυκλικού τόξου για αστράγγιστες συνθήκες ή ανάλυση ϕ_u :** σε αυτή τη μέθοδο πραγματοποιείται η ανάλυση ολικών τάσεων και γίνεται η παραδοχή ότι το έδαφος αποτελείται από πλήρως κορεσμένο αργιλικό υλικό. Πραγματοποιείται η εξέταση ενός τμήματος του πρανούς, με μοναδιαίο πάχος, το οποίο ορίζεται από ένα κυκλικό τόξο. Οι δυνάμεις βαρύτητας τείνουν να στρέψουν το κυκλικό τμήμα γύρω από το κέντρο του κύκλου, η διατμητική αντοχή η οποία αντιστέκεται στην παραπάνω περιστροφή και ενεργοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, άρα γίνεται η εφαρμογή της ισορροπίας των ροπών.



Εικόνα 3.3 Ανάλυση κυκλικού τόξου-αστράγγιστες συνθήκες
(Πηγή: Barnes, 2005)

Ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τον λόγο της ροπής των διατμητικών δυνάμεων που αντιστέκονται στην ροπή ανατροπής προς τις βαρυτικές δυνάμεις που προκαλούν την ανατροπή.

$$FS = \frac{c_u R^2 \theta}{Wd} \quad (4)$$

όπου:

c_u : είναι η συνοχή του υλικού του πρανούς

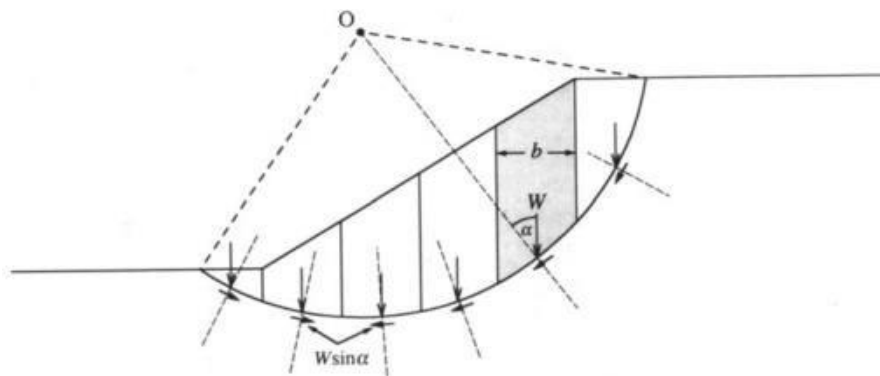
R : είναι η ακτίνα του κυκλικού τόξου

θ : είναι η γωνία του κυκλικού τόξου σε ακτίνα

W : είναι το ολικό βάρος του τμήματος

d : είναι η οριζόντια απόσταση από το κέντρο βάρους του τμήματος.

Στην περίπτωση μεγάλου αριθμού υπολογισμών, το τμήμα του κυκλικού τόξου το οποίο αστοχεί χωρίζεται ένα αριθμό λωρίδων ώστε να προσδιοριστεί το W και το d κάθε λωρίδας.



Εικόνα 3.4 Ανάλυση κυκλικού τόξου-αστράγγιστες συνθήκες με τη χρήση των λωρίδων
(Πηγή: Barnes, 2005)

Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{\sum c_u b \sec \alpha}{\sum W \sin \alpha} \quad (5)$$

- **Μέθοδος Taylor:** Ο Taylor, το 1937, πρότεινε τη χρήση ενός αριθμού ευστάθειας N_s ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_s = \frac{c_u}{F \gamma H} \quad (6)$$

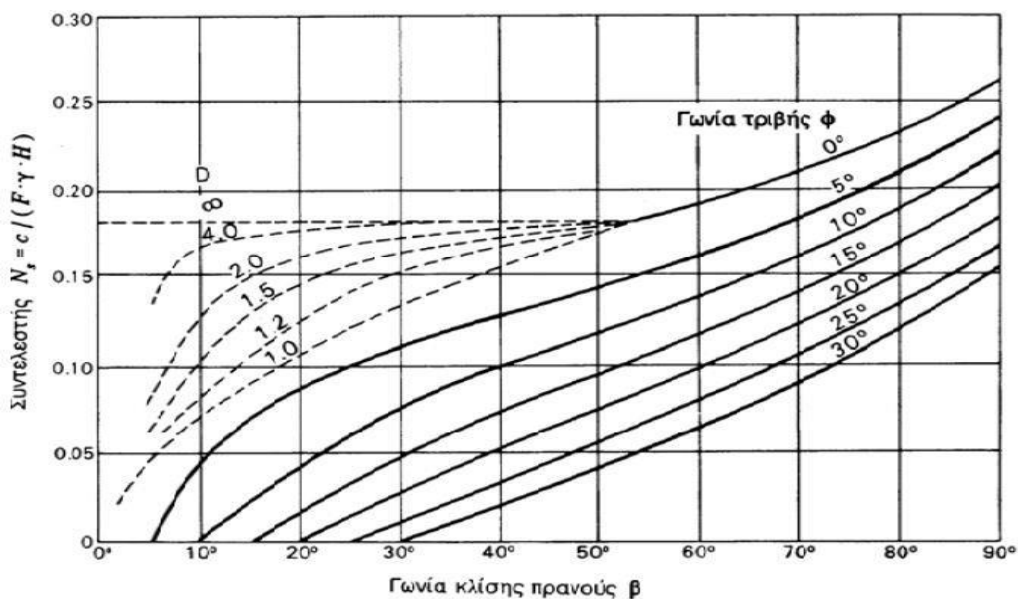
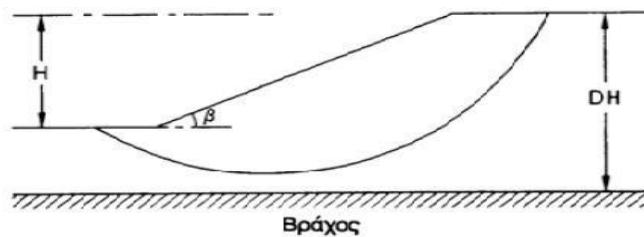
όπου:

FS: είναι ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνεται από μια ανάλυση κυκλικού τόξου για ομοιογενές υλικό πρανούς υπό αστράγγιστες συνθήκες

γ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού του πρανούς που ολισθαίνει

H: το ύψος του πρανούς

Ο αριθμός N_s της ευστάθειας του πρανούς επηρεάζεται από τη γωνία του πρανούς β και το συντελεστή βάθους D, όπου DH είναι το βάθος μέχρι ένα στερεό στρώμα. Το νομογράφημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ελέγχους ευστάθειας τύπου $\phi=0^\circ$.

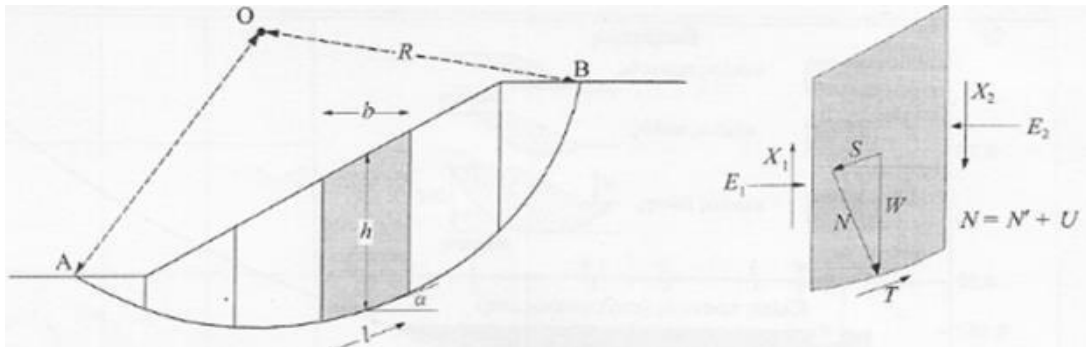


Εικόνα 3.5 Καμπύλες Taylor

(Πηγή: Καββαδάς, 2005)

- **Μέθοδος Fellenious:** η μέθοδος θεωρεί ότι οι πλευρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων είναι ίσες και αντίθετες μεταξύ τους, άρα οι συνισταμένες τους είναι μηδέν. Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FS = \frac{cL_{AB} + \tan\phi \Sigma(W \cos\alpha - ul)}{\Sigma W \sin\alpha} \quad (7)$$



Εικόνα 3.6 Μέθοδος Fellenious με τη χρήση λωρίδων

(Πηγή: Barnes, 2005)

- **Μέθοδος Bishop:** η μέθοδος αναπτύχθηκε το 1955 και για την επίλυσή της απαιτείται λογισμικό. Η μέθοδος θεωρεί ότι οι εφαπτομενικές πλευρικές δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες, αλλά οι κάθετες πλευρικές δυνάμεις δεν θεωρούνται ίσες.
- **Μέθοδος Hoek and Bray:** ο συντελεστής ασφαλείας με βάση αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται μέσω νομογραφημάτων. Ως δεδομένο λαμβάνεται η ασταθής μάζα του πρηνούς ως ένα άκαμπτο σώμα. Η μέθοδος αυτή περιορίζεται σε ομογενή εδάφη και σε 5 συγκεκριμένες συνθήκες υπογείου νερού
- **Μέθοδος Janbu-Μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης:** πρόκειται για μία μέθοδο λωρίδων η οποία δέχεται μη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και χρησιμοποιείται όταν το έδαφος δεν είναι ομογενές, όπως σε στρωσιγενή εδάφη. Ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με

$$FS = \frac{\Sigma[cb + (W + dX - ub)\tan\phi]m_a}{\Sigma(W + dX) \tan\alpha} \quad (8)$$

όπου:

$$m_a = \frac{\sec^2}{1 + \frac{\tan\phi + \tan\alpha}{F}} \quad (9)$$

$dX = X_1 - X_2$, η συνισταμένη των κατακόρυφων πλευρικών δυνάμεων των λωρίδων.

➤ **Μέθοδος της σφήνας:** η μέθοδος αυτή αποτελεί μια εκτίμηση της ευστάθειας μιας διατομής με διακεκριμένα επίπεδα όρια, όπως πρηνή επιχώματωμένα και επιχώματα σε στρώσεις. Για μια επίπεδη σφήνα, υπολογίζονται οι δυνάμεις οι οποίες δρουν κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης για να δώσουν τον συντελεστή ασφαλείας με βάση τον τύπο:

$$FS = \frac{cL + (W \cos \alpha - U) \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (10)$$

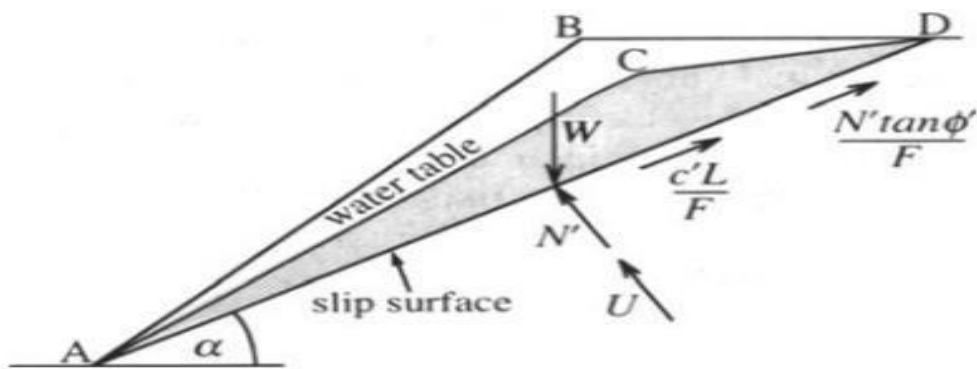
όπου:

L: είναι το μήκος του επιπέδου ολίσθησης μεταξύ A και D

W: είναι η συνολική δύναμη, η οποία προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό ABD με το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους

U: είναι η δύναμη της πίεσης των πόρων η οποία προκύπτει από το εμβαδόν της επιφάνειας ACD πολλαπλασιασμένο με το ειδικό βάρος του νερού γ_w

Η ενεργός δύναμη ισούται με $N = W \cos \alpha - U$.



Εικόνα 3.7 Μέθοδος της σφήνας (Πηγή: Barnes)

3.3 Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων

Βασικό κομμάτι στη μελέτη ενός πρανού, φυσικού ή τεχνητού, αποτελεί η διασφάλιση της φυσικής ευστάθειας του. Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από σεισμικότητα δεν αρκεί να μελετάται η ευστάθεια των πρανών υπό στατικές συνθήκες, αλλά απαιτείται η διερεύνηση της ευστάθειάς τους και υπό σεισμικές συνθήκες λόγω του αυξημένου κινδύνου αστοχιών. Με τη διασφάλιση της σεισμικής ευστάθειας ενός πρανού ή επιχώματος, επιτυγχάνεται η ασφάλεια των περιοχών από πρόκληση μιας πιθανής κατολίσθησης, πράγμα που μπορεί να είναι καταστροφικό.



Εικόνα 3.8 Κατολίσθηση στην Ιαπωνία που προκλήθηκε από σεισμό.

(Πηγή: American Geophysical Union, 2016)

Η σεισμική ευστάθεια των πρανών επηρεάζεται από τις κυκλικές τάσεις που θα προκληθούν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού και από τη κυκλική συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών. Πιθανή αστοχία ενός εδαφικού πρανού, μπορεί να οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις ή την ανακυκλική απομείωση της διατμητικής αντοχής των υλικών. Υπάρχουν τεχνικές που κυμαίνονται από πολύ προσεγγιστικές, έως πολύ λεπτομερείς για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας. Με σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας, αυτές οι μέθοδοι είναι οι εξής:

- ❖ Ψευδοστατική μέθοδος
- ❖ Μέθοδος μόνιμης παραμόρφωσης
- ❖ Αριθμητική μέθοδος

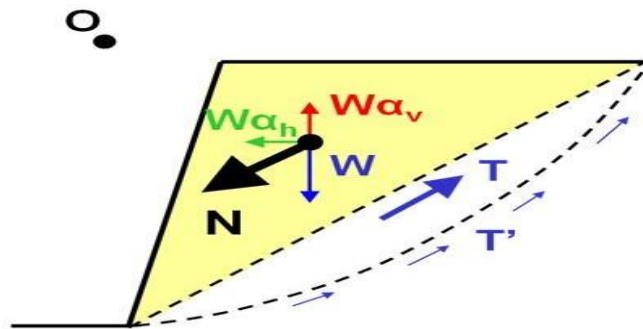
Ένα πρανές συνήθως θεωρείται ασφαλές αν βρεθεί ασφαλές από τη ψευδοστατική μέθοδο ή τη μέθοδο μόνιμης παραμόρφωσης και δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πιο πολύπλοκες μεθόδους.

Στη παρούσα εργασία για την σεισμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε μόνο η Ψευδοστατική Μέθοδος με οριζόντιες επιταχύνσεις.

3.3.1 Ψευδοστατική Μέθοδος

Η ψευδοστατική ανάλυση θεωρείται η πιο γνωστή μέθοδος σεισμικής ανάλυσης η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τον σεισμικό σχεδιασμό γεωτεχνικών κατασκευών εξαιτίας της απλοϊκότητάς της. Η επίδραση του σεισμού αντικαθίσταται από μια οριζόντια σταθερή επιτάχυνση που εφαρμόζεται σε όλο το πρανές και το πρόβλημα της σεισμικής αστάθειας αντιμετωπίζεται ως ισοδύναμο στατικό. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις αναλύσεις οριακής ισορροπίας. Εφαρμόζεται μία επιπλέον στατική φόρτιση στο κέντρο της επιφάνειας του πρανούς. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι στατικές και οι ψευδοστατικές-αδραμειακές δυνάμεις οι οποίες τείνουν να συγκρατήσουν το πρανές ώστε να μην προκληθεί κατολίσθηση. Οι αδραμειακές δυνάμεις που ασκούνται στην μάζα του πρανούς που ολισθαίνει αναλύονται σε μία οριζόντια και σε μία κατακόρυφη συνιστώσα, Wa_h και Wa_v αντίστοιχα, όπου W είναι το βάρος της μάζας του πρανούς που ολισθαίνει και a_h και a_v είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη σεισμική επιτάχυνση αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η οριζόντια συνιστώσα και δεν λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς η κατακόρυφη συνιστώσα της αδραμειακής δύναμης. Η κατακόρυφη συνιστώσα έχει πολύ μικρή επιρροή στο συντελεστή ασφαλείας λόγω του χαμηλότερου πλάτους, της υψηλότερης συχνότητας και την αυξομείωση των δυνάμεων ανάλογα με την κατεύθυνσή της.

Σε γενικές γραμμές αν η τιμή του ψευδοστατικού συντελεστή ισούται ή ξεπερνά το 1 τότε το πρανές θεωρείται σταθερό και δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πιο περίπλοκοι μηχανισμοί για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας του πρανούς. Σε περίπτωση όμως που ο ψευδοστατικός συντελεστής βρεθεί μικρότερος από 1 τότε κρίνεται σκόπιμο οι αναλύσεις της ευστάθειας να διεξαχθούν με την μέθοδο της μόνιμης παραμόρφωσης ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης του πρανούς.



Εικόνα 3.9 Οι βασικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες

(Πηγή: Psarropoulos & Antoniou, 2015)

Ο συντελεστής ασφαλείας για ψευδοστατική συνθήκες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FS_{ps} = \frac{FS_{ST} - \tan\phi \left(a_h - \frac{a_v}{\tan\theta} \right)}{\frac{a_h}{\tan\theta} + a_v + 1} \quad (11)$$

όπου FS_{ST} είναι η τιμή του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες.

Σε περίπτωση που αγνοηθεί η κατακόρυφη επιτάχυνση ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FS_{ps} = \frac{FS_{ST} - \tan\varphi (a_h)}{\frac{a_h}{\tan\theta}} \quad (12)$$

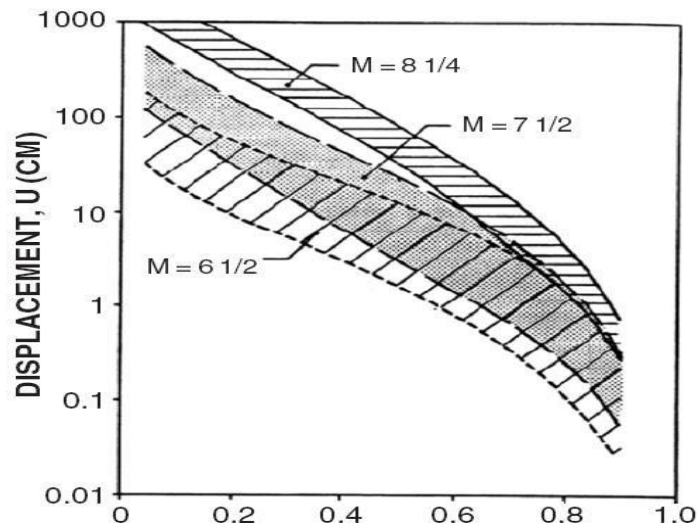
Το πιο σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει με αυτή τη μέθοδο με βάση τις δύο εξισώσεις είναι η επιλογή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης. Γίνεται η παραδοχή ότι η σεισμική δύναμη που ασκείται στο πρανές είναι σταθερή, έτσι όμως δημιουργούνται δύο προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα σχετίζεται με την επίδραση της τοπογραφίας, που σημαίνει ότι το μέγεθος και η συχνότητα χρονοσειράς της επιτάχυνσης είναι διαφορετική σε κάθε σημείο της επιφάνειας αστοχίας. Το δεύτερο πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι η δυναμική απόκριση εφαρμόζεται ακαριαία. Έτσι στην συνέχεια προτάθηκαν βαθμονομημένοι σεισμικοί συντελεστές σε αποδεκτό επίπεδο μετατοπίσεων για την προσδιορισμό της ευστάθειας πρανών.

3.3.2 Μέθοδος της μόνιμης παραμόρφωσης

Η μέθοδος της μόνιμης παραμόρφωσης βασίζεται στην προσέγγιση Newmark (1965). Στη προσέγγιση αυτή γίνεται η παραδοχή ότι η ευστάθεια είναι δυνατό να αποδειχθεί με ένα απλό μοντέλο το οποίο απαρτίζεται από μια δύσκαμπτη μάζα υλικού ενός κεκλιμένου πρανούς και επομένως οι μετατοπίσεις προκύπτουν από τη διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης. Η σχετική επιτάχυνση υπολογίζεται από την διαφορά της παραγόμενης και της κρίσιμης επιτάχυνσης. Η κρίσιμη επιτάχυνση είναι η επιτάχυνση που απαιτείται για να αρχίσει να ολισθαίνει το πρανές ($FS=1$). Αυτή η μέθοδος δεν λαμβάνεται υπόψιν η ευκαμψία της μάζας που ολισθαίνει. Για αυτό τον λόγο λαμβάνονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ώστε να παραλειφθεί ο περιορισμός της ευκαμψίας της ολισθαίνουσας μάζας:

- Η ξεχωριστή διαδικασία με την οποία η δυναμική απόκριση της επιφάνειας αστοχίας που εξετάζεται υπολογίζεται χωρία από τις μετατοπίσεις που προκαλούνται από το σεισμό.
- Η ενιαία διαδικασία, στην οποία η δυναμική απόκριση θεωρείται ταυτόχρονη με την ανάπτυξη των μόνιμων παραμορφώσεων από τη λύση των διαφορικών εξισώσεων που τη διέπουν. Οι εδαφικές παραμορφώσεις μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από διαγράμματα ή από εμπειρικές εξισώσεις της βιβλιογραφίας που είναι πολύ χρήσιμες για μία γρήγορη εκτίμηση των σεισμικών παραμορφώσεων του πρανούς (Psarropoulos & Antoniou, 2015).

Με βάση τα διαγράμματα παρακάτω από τους Makdisi & Seed (1978) παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της σεισμικής μετατόπισης και τον λόγο A_c/A_{max} για διάφορα σεισμικά μεγέθη M . A_c είναι η κρίσιμη επιτάχυνση που αντιστοιχεί σε $FS_{ST}=1$, ενώ η A_{max} είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.



Εικόνα 3.10 Σεισμική μετατόπιση (cm) σε σχέση με τον λόγο A_c/A_{max} για διάφορα μεγέθη σεισμού (Makdisi & Seed (1978))

Ο Ambraseys & Menu (1988) πρότειναν μια εμπειρική σχέση:

$$\text{Log}(d_1) = 0,90 + \text{Log}\left[\left(1 - \frac{A_c}{A_{max}}\right)^{2,53} \left(\frac{A_c}{A_{max}}\right)^{-1,09}\right] + 0,30p \quad (13)$$

Όπου d_1 είναι η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση σε εκατοστά και $p=0$ για πιθανότητα υπέρβασης 50% και $p=2,32$ για πιθανότητα υπέρβασης 1%

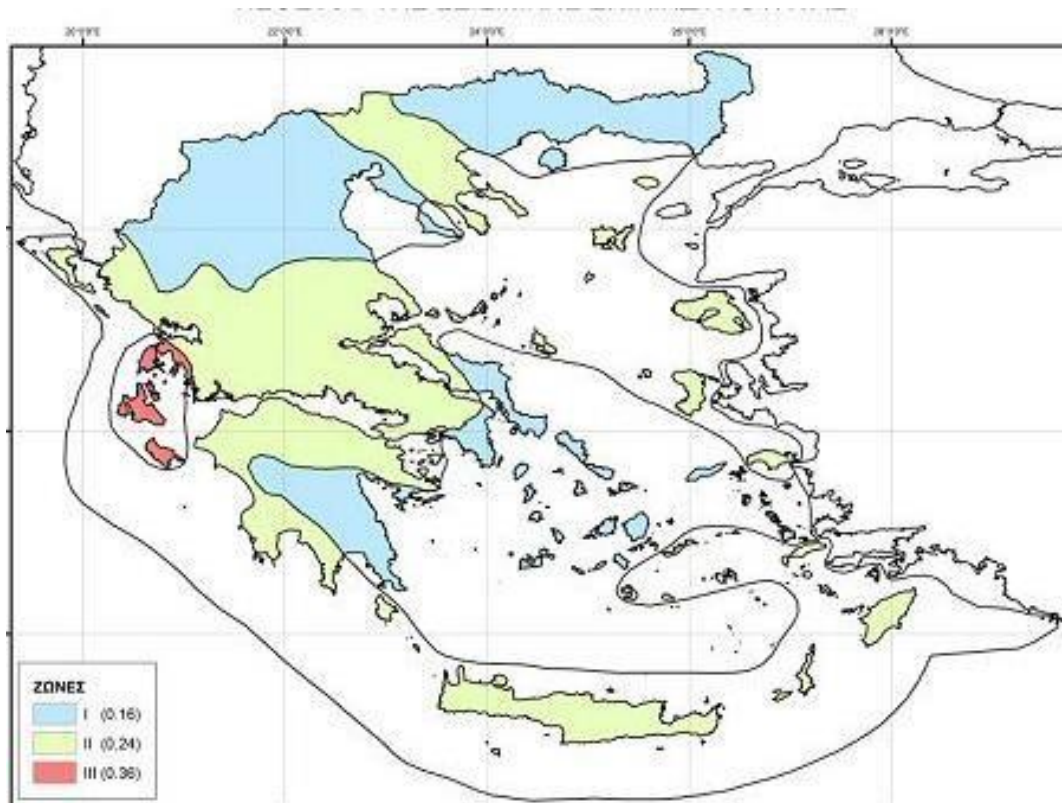
Άρα, στην περίπτωση ενός σεισμού όπου η παραγόμενη σεισμική επιτάχυνση, ξεπεράσει την κρίσιμη επιτάχυνση, η μέγιστη εδαφική παραμόρφωση θα εξαρτηθεί, όχι μόνο από το πλάτος της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, αλλά και από τη διάρκεια και τη συχνότητα της εδαφικής κίνησης. Πιο σύνθετες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψιν τους τη μέγιστη ταχύτητα εδάφους και το μέγεθος του σεισμού.

Με βάση τον Terzaghi(1934) προτάθηκαν τιμές για τον συντελεστή επιτάχυνσης ανάλογα με την ένταση και τις συνέπειες του σεισμού. Έτσι έχουμε $a_h=0,1$ για ισχυρούς σεισμούς, $a_h=0,2$ για βίαιους σεισμούς και $a_h=0,5$ για καταστροφικούς σεισμούς.

Με βάση τον Ελληνικό αντισεισμικό σχεδιασμό, ο ελληνικός χώρος κατανέμεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, με αντίστοιχες τιμές εδαφικών επιταχύνσεων.

Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
a	0,16	0,24	0,36

Πίνακας 3.1-Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας



Εικόνα 3.11 Ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, διακρίνονται τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (Πηγή: ΟΑΣΠ, 2003)

3.3.3 Αριθμητική Μέθοδος

Η βασικότερη αριθμητική μέθοδος είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και τα διαθέσιμα δεδομένα, η ανάλυση μπορεί να είναι είτε δυναμική με σεισμική διέγερση, που εφαρμόζεται ως χρονοϊστορία επιταχύνσεων ή ψευδοστατική με τις αδρανειακές δυνάμεις να εφαρμόζονται ξεχωριστά σε κάθε στοιχείο.

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του CGS (California Geological Survey, 2006), στις μετατοπίσεις των πρανών αναφέρονται τα εξής:

- Μόνιμες παραμορφώσεις εδάφους μικρότερες από 0,15 m δεν αντιστοιχούν σε σοβαρές μετατοπίσεις πρανών
- Για εύρος από 0,15m έως 1m παραμόρφωσης ίσως να προκληθούν μεγάλες ρωγμές στο έδαφος ή σημαντική απώλεια αντοχής, με αποτέλεσμα να προκληθεί αστοχία του πρανούς
- Οι μετατοπίσεις μεγαλύτερες από 1m συνήθως αντιστοιχούν σε καταστροφική μετατόπιση του πρανούς, μαζί με την εμφάνιση πιθανής καταστροφικής αστοχίας, ως αποτέλεσμα τα πρανά αυτά να θεωρούνται ασταθή.

Κεφάλαιο 4 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS

4.1 Ιστορικά

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων προήλθε από την ανάγκη επίλυσης σύνθετων προβλημάτων ελαστικότητας και δομικής ανάλυσης στην πολιτική και αεροναυτική μηχανική. Η ανάπτυξη της ξεκίνησε από τη δουλειά των Hrennikoff (1941) και Courant (1942). Ενώ οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από αυτούς τους πρωτοπόρους είναι δραματικά διαφορετικές, μοιράζονται ένα βασικό χαρακτηριστικό: δικτυωτή διακριτοποίηση ενός συνεχούς τομέα σε ένα σύνολο διακριτών υποτομών, που συνήθως ονομάζονται στοιχεία (elements).

Η δουλειά του Hrennikoff διακρίνει τον τομέα χρησιμοποιώντας μια αναλογία πλέγματος, ενώ η προσέγγιση του Courant χωρίζει τον τομέα σε πεπερασμένες τριγωνικές υποπεριοχές για λύση των ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων δεύτερης τάξης (PDEs) που προκύπτουν από το πρόβλημα της στρέψης ενός κυλίνδρου. Η συμβολή του Courant ήταν εξελικτική, αντλώντας από ένα μεγάλο αριθμό προηγούμενων αποτελεσμάτων για PDE που αναπτύχθηκαν από τους Rayleigh, Ritz και Galerkin.

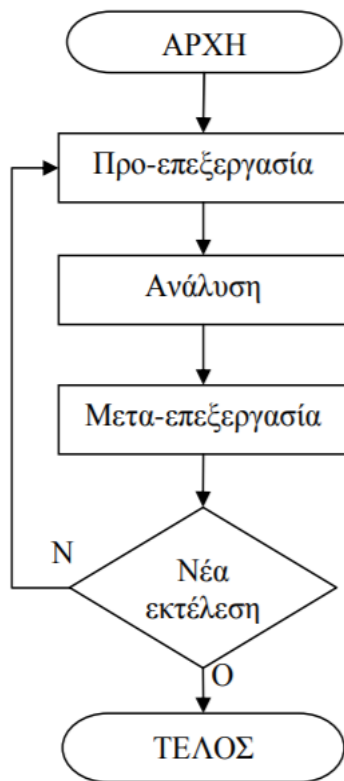
Η ανάπτυξη της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων πρακτικά ξεκίνησε στα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1950 για σχεδιασμό ατράκτων και στατική ανάλυση και εδρεύθηκε στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης μέσω του έργου του John Argyris (Ιωάννης Χατζηαργύρης) και στο Berkeley μέσω του έργου του Ray W. Clough τη δεκαετία του 1960. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, οι βασικές έννοιες του πίνακα ακαμψίας και της συνάθροισης στοιχείων υπήρχαν ουσιαστικά στη μορφή που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η NASA εξέδωσε αίτημα για προτάσεις για την ανάπτυξη του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων NASTRAN το 1965. Η μέθοδος έλαβε μία αυστηρά μαθηματική βάση το 1973 με τη δημοσίευση των Strang and Fix.

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ, Finite Element Method - FEM) έκτοτε έχει γενικευτεί σε εύρος εφαρμοσμένων μαθηματικών μοντέλων που αντικατοπτρίζουν φυσικά προβλήματα πλήθους επιστημονικών κλάδων.

Η προσομοίωση της πραγματικότητας στο πρόγραμμα δεν παύει να είναι προσεγγιστική, η οποία περιλαμβάνει αναπόφευκτα αριθμητικά και σχεδιαστικά σφάλματα. Όσο υψηλότερης ακρίβειας και μικρότερα είναι τα δεδομένα που εισάγουμε στο πρόγραμμα, τόσο καλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα αλλά θα χρειάζεται να καταναλωθεί περισσότερη υπολογιστική ισχύ.

4.2 Περί λογισμικού

Ένα πλήρες υπολογιστικό περιβάλλον για την ανάλυση μιας κατασκευής με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) εμφανίζει τρία διακριτά μέρη (βλ. Σχήμα 1).



Σχήμα 1

‘Προ-επεξεργασία’ (pre-processing)

Αφορά στην εισαγωγή όλων εκείνων των δεδομένων που απαιτούνται για τη μελέτη της κατασκευής, δηλαδή:

- ❖ Γεωμετρική περιγραφή της κατασκευής
- ❖ Διακριτοποίηση της κατασκευής
- ❖ Δήλωση ιδιοτήτων υλικού της κατασκευής
- ❖ Δήλωση στηρίξεων
- ❖ Δήλωση φορτίσεων

Η γεωμετρική περιγραφή της κατασκευής επιτυγχάνεται μέσω της σχεδίασης αυτής. Με τον όρο ‘διακριτοποίηση της κατασκευής’, ισοδύναμά με τον όρο ‘δημιουργία πλέγματος’, εννοούμε τη διαίρεση της κατασκευής σε πλήθος στοιχείων με πεπερασμένες γεωμετρικές διαστάσεις (Πεπερασμένα Στοιχεία - ΠΣ). Ο τύπος των ΠΣ αποτελεί επιλογή του χρήστη. Επομένως, η προ-επεξεργασία είναι ουσιαστικά ένα σχεδιαστικό περιβάλλον, στο οποίο προσομοιώνεται η προς μελέτη κατασκευή. Το προϊόν αυτής της προσομοίωσης καλείται ‘μοντέλο’ ‘Ανάλυση’ (Analysis). Σε αυτό το τμήμα λαμβάνει χώρα ο υπολογισμός όλων των ποσοτήτων ενδιαφέροντος, όπως κομβικές μετατοπίσεις, τάσεις, παραμορφώσεις, ιδιοσυχνότητες, κοκ.

‘Μετά-επεξεργασία’ (post-processing)

Σε αυτό το τμήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ο πλέον συνήθης τρόπος παρουσίασης είναι μέσω χρωματικής απεικόνισης. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή της ποσότητας ενδιαφέροντος, π.χ. τάση, εμφανίζεται ως κατανομή χρωμάτων σε όλη της έκταση της κατασκευής σύμφωνα με μία χρωματική κλίμακα. Επιπροσθέτως, είναι δυνατή η παρουσίαση αποτελεσμάτων είτε με τη μορφή γραφημάτων, είτε με τη μορφή πινάκων είτε ως περιεχόμενο κάποιου αρχείου δεδομένων. Διευκρινίζεται ότι η χρωματική απεικόνιση, αν και δίδει μία γρήγορη και εποπτική εικόνα της κατανομής ενός μεγέθους, είναι δυνατόν να παραπλανήσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κατασκευή μίας χρωματικής κατανομής στηρίζεται σε διαδικασίες παρεμβολής (interpolation) μεταξύ αριθμητικών τιμών σε συγκεκριμένα σημεία, οπότε υπάρχει ο κίνδυνος αυτό που απεικονίζεται χρωματικά να διαφέρει σημαντικά από αυτό που περιγράφεται αριθμητικά.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, είναι το Plaxis Version 8.2. Το Plaxis είναι ένα λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για ειδικές γεωτεχνικές εφαρμογές, κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων

παραμορφώσεων και συνθηκών ευστάθειας σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ). Να αναφερθεί επίσης ότι η συγκεκριμένη έκδοση είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα.

Το πρόγραμμα αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα, τα οποία είναι τα εξής:

- Input program: υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων
- Calculation program: υποπρόγραμμα όπου γίνονται οι υπολογισμοί
- Output program: υποπρόγραμμα όπου προκύπτουν τα αποτελέσματα, βάση των προηγούμενων υπολογισμών
- Curves program: όπου υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας καμπυλών βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν

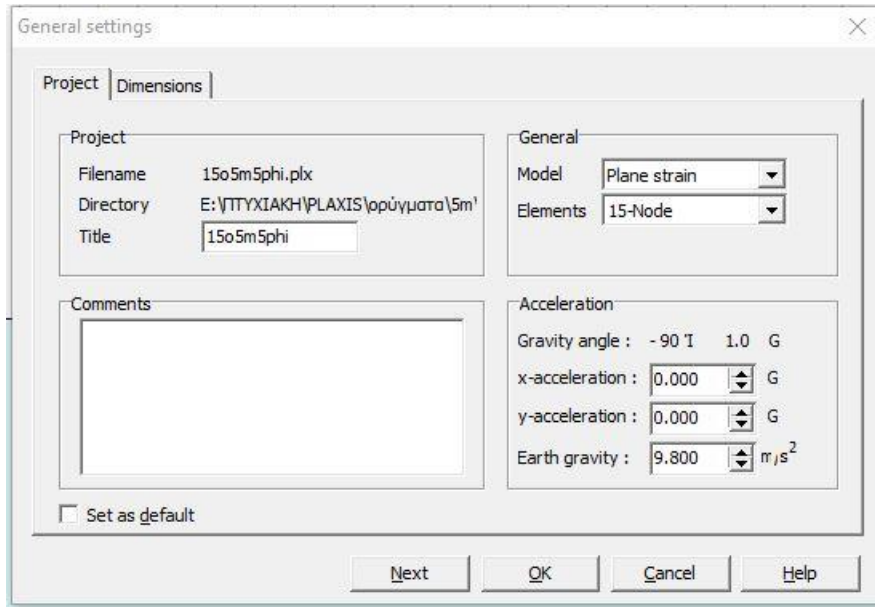
4.3 Πρόγραμμα Input-Program

Για την εκτέλεση των αναλύσεων στο λογισμικό Plaxisθα πρέπει να δημιουργηθεί ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις και ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών, καθώς και των ιδιοτήτων των υλικών. Όλες οι προαναφερθείσες διαδικασίες πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα Input (εισαγωγής δεδομένων)

Το πρότυπο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις ορίζεται από κλειστά γεωμετρικά σχήματα αποτελούμενα από σημεία και γραμμές. Στη συνέχεια στα γεωμετρικά σχήματα που δημιουργούνται ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και ύστερα πραγματοποιείται η εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών. Μετά καθορίζεται ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να εκτελεστούν οι υπολογισμοί. Τέλος το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής του επιπέδου της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ώστε να υπολογιστούν αυτομάτως οι πιέσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις.

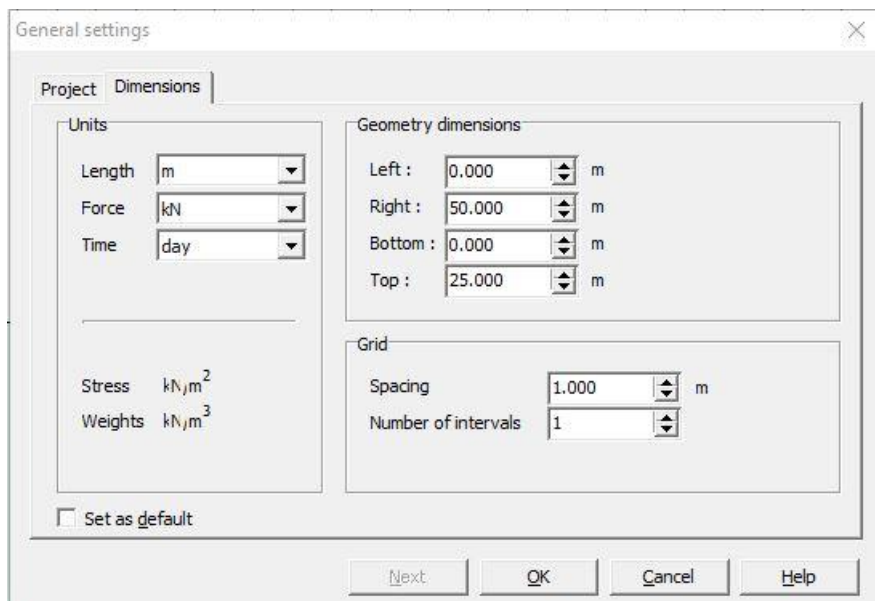
4.3.1 Γενικές Ρυθμίσεις

Αρχικά για την επίλυση ενός προβλήματος μέσω του λογισμικού Plaxis γίνεται η εισαγωγή των γενικών ρυθμίσεων του προσομοιώματος. Κάθε φορά που ανοίγουμε ένα νέο αρχείο στο λογισμικό εμφανίζεται το παράθυρο General Settings. Το παράθυρο εμφανίζει δύο καρτέλες, την καρτέλα Project και την καρτέλα Dimension. Η πρώτη καρτέλα (Project) περιλαμβάνει τον όνομα της εργασίας που επιθυμούμε να ορίσουμε και μια προαιρετική περιγραφή, τον τύπο του μοντέλου, τον αριθμό των κόμβων (6 ή 15), τις επιταχύνσεις κατά x και y (για την χρήση της ψευδοστατικής μεθόδου) και την επιτάχυνση της βαρύτητας που έχει οριστεί από το πρόγραμμα ίση με 9,8g.



Εικόνα 4.1 Εισαγωγή γενικών ρυθμίσεων στο Plaxis

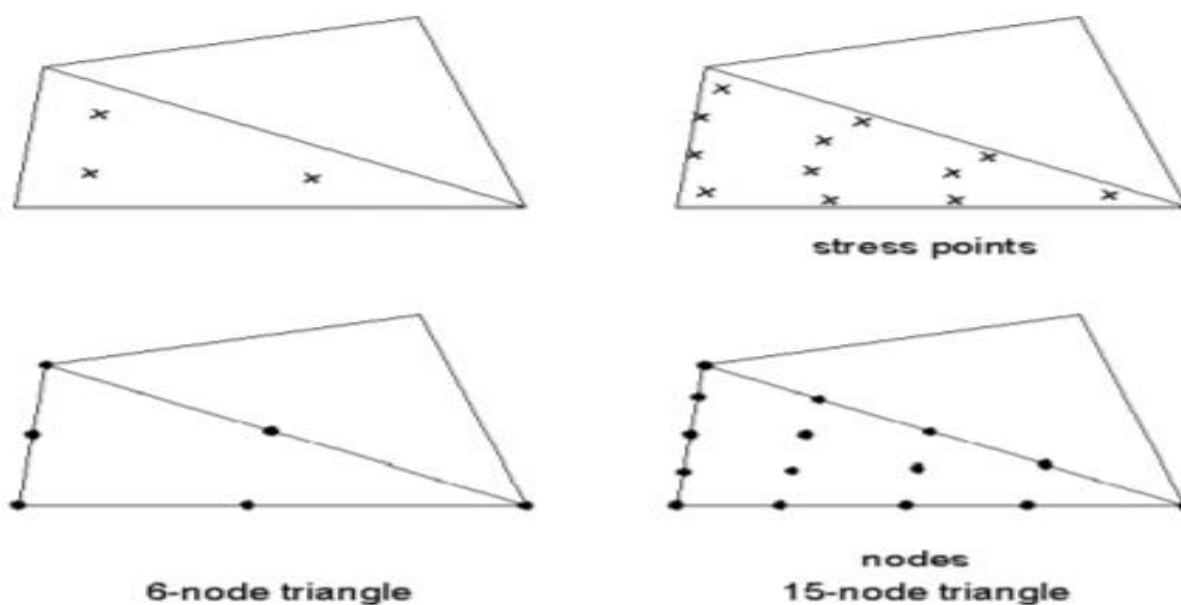
Στην καρτέλα Dimensions καθορίζονται οι μονάδες μήκους (m), δύναμης (kN) και χρόνου (S), όπως και οι διαστάσεις της περιοχής όπου σχεδιάζεται το μοντέλο.



Εικόνα 4.2 Εισαγωγή γενικών ρυθμίσεων στο Plaxis

Η έκδοση v8.2 του Plaxis μπορεί να εξαγει δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, είτε με μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain), είτε με αξονοσυμμετρία (axisymmetric). Η επίπεδη παραμόρφωση χρησιμοποιείται σε γεωμετρίες με όσο γίνεται ομοιόμορφη διατομή και τασική κατάσταση. Είναι αρκετά συνήθης στην Εδαφομηχανική και περιγράφει περιπτώσεις, κατά τις οποίες οι συνιστώσες των τάσεων δεν μεταβάλλονται κατά τη διεύθυνση ενός άξονα (π.χ. του z). Συνεπώς, οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις σε αυτόν τον άξονα θεωρούνται μηδενικές, όπως σε περιπτώσεις φραγμάτων, επιχωμάτων και άλλων κατασκευών. Η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση χρησιμοποιείται σε κυκλικές κατασκευές.

Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα ώστε να κανναβοποιηθεί το εδαφικό προσομοίωμα σε μικρότερα τριγωνικά στοιχεία των 6 ή 15 κόμβων (nodes). Το 15-κομβο προσομοίωμα περιέχει 12 σημεία τάσεων (ή αλλιώς σημεία τάσεων Gauss) και το 6-κομβο περιέχει 3 σημεία τάσεων. Στις γεωτεχνικές μελέτες συνήθως χρησιμοποιούνται 15-κομβικά προσομοιώματα εξαιτίας της μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων τους. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερος χρόνος για την επίλυση του προβλήματος από ότι απαιτείται στις περιπτώσεις των 6-κομβικών προσομοιωμάτων.



Εικόνα 4.3 15-κομβο και 6-κομβο τριγωνικό στοιχείο με τα αντίστοιχα σημεία τάσης

4.3.2 Δημιουργία γεωμετρίας προσομοιώματος

Για την παραγωγή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει πρώτα να κατασκευαστεί η γεωμετρία του μοντέλου. Το γεωμετρικό προσομοίωμα αποτελείται από σημεία και γραμμές, για τον σχεδιασμό της γραμμής απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία. Ένα κλειστό γεωμετρικό προσομοίωμα αποτελείται από τουλάχιστον 3 γραμμές, με την δημιουργία ενός κλειστού προσομοιώματος εισάγεται αυτομάτως ένα πλέγμα από το πρόγραμμα. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την αλλαγή του χρώματος, αλλιώς θα πρέπει να γίνει εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (Standard fixities) ώστε να εισαχθεί το πλέγμα (cluster) στο προσομοίωμα. Παρακάτω παρουσιάζονται βασικές χρήσεις λειτουργιών για την γεωμετρία του μοντέλου.

Με το εικονίδιο Geometry line (μαύρη γραμμή διαγώνια), σχεδιάζεται αρχικά το περίγραμμα του προσομοιώματος, είτε αυτό προσομοιάζει εδαφική στρώση, πρανές ή φράγμα. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται αυτόματα εισαγωγή σημείων και ευθειών.

Με το εικονίδιο Plate το οποίο απεικονίζεται με μια μπλε γραμμή κάθετη, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση λεπτών κατασκευών στο έδαφος με σημαντική καμπτική αντοχή.

Με το εικονίδιο Geogrid το οποίο απεικονίζεται με οριζόντια κίτρινη γραμμή, μπορεί να γίνει εισαγωγή του γεωπλέγματος στο μοντέλο.

Με το εικονίδιο Interfaces, το οποίο απεικονίζεται με δύο κάθετους μεταξύ τους άξονες με βελόνια, προστίθεται μια διεπιφάνεια. Ορίζεται ένα εικονικό πάχος, το οποίο εκφράζει τις εδαφικές ιδιότητες της διεπιφάνειας. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος αυτό, τόσες περισσότερες ελαστικές παραμορφώσεις δημιουργούνται.

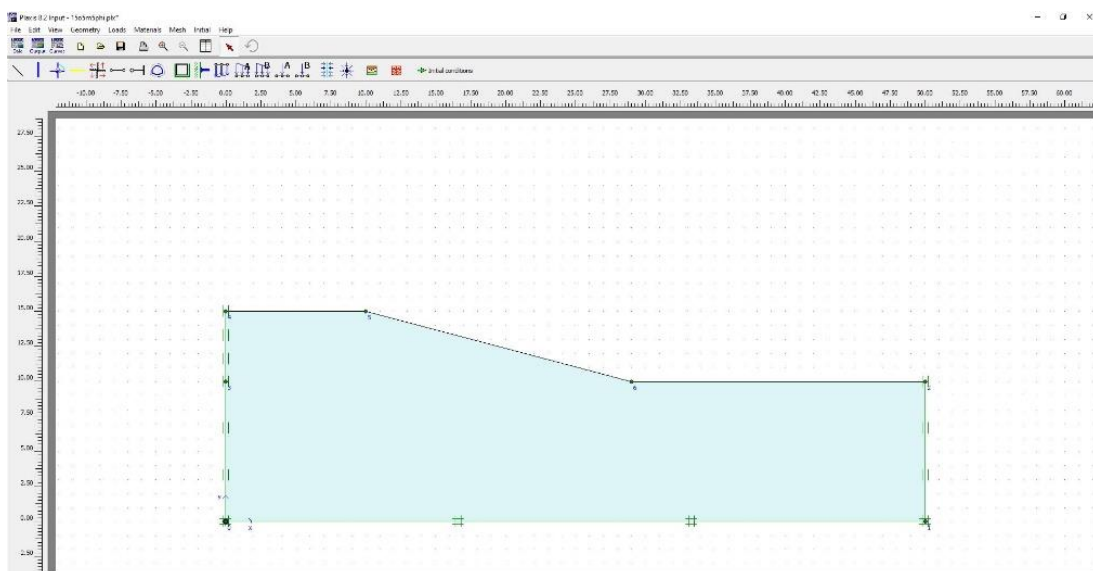
Με το εικονίδιο Distribute loads (A&B) και Point Load (A&B), εισάγεται ένα κατανεμημένο επιφανειακό φορτίο ή ένα σημειακό φορτίο αντίστοιχα στο προσομοίωμα. Στην περίπτωση του επιφανειακού φορτίου οι μονάδες μέτρησης είναι σε kN/m^2 ενώ στην περίπτωση του σημειακού φορτίου οι μονάδες μέτρησης είναι σε kN/m .

Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιούνται, εκτός από το πάτημα των εικονιδίων, μέσω των εντολών που ξεκινούν από το μενού επιλέγοντας το Geometry.

4.3.3 Συνοριακές συνθήκες

Ύστερα από την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες. Από το μενού επιλέγεται η εντολή Loads→Standard Fixities ή από το εικονίδιο το πρόγραμμα τοποθετεί αυτομάτως τις συνοριακές συνθήκες στο γεωμετρικό μοντέλο.

- Στα κατακόρυφα όρια του μοντέλου η οριζόντια μετατόπιση ισούται με μηδέν ($u_x=0$). Οπότε τα σημεία των γραμμών αυτών κινούνται στον άξονα y . Συμβολίζεται με 2 παράλληλες ευθείες κάθετες στον άξονα x .
- Στα οριζόντια όρια του μοντέλου, εφαρμόζεται μηδενική μετατόπιση και ως προς τον άξονα x και ως προς τον άξονα y ($u_x=u_y=0$). Αυτό σημαίνει ότι το κάτω όριο είναι πακτωμένο. Συμβολίζεται με 4 ευθείες, που τέμνονται κάθετα ανά ζεύγη.



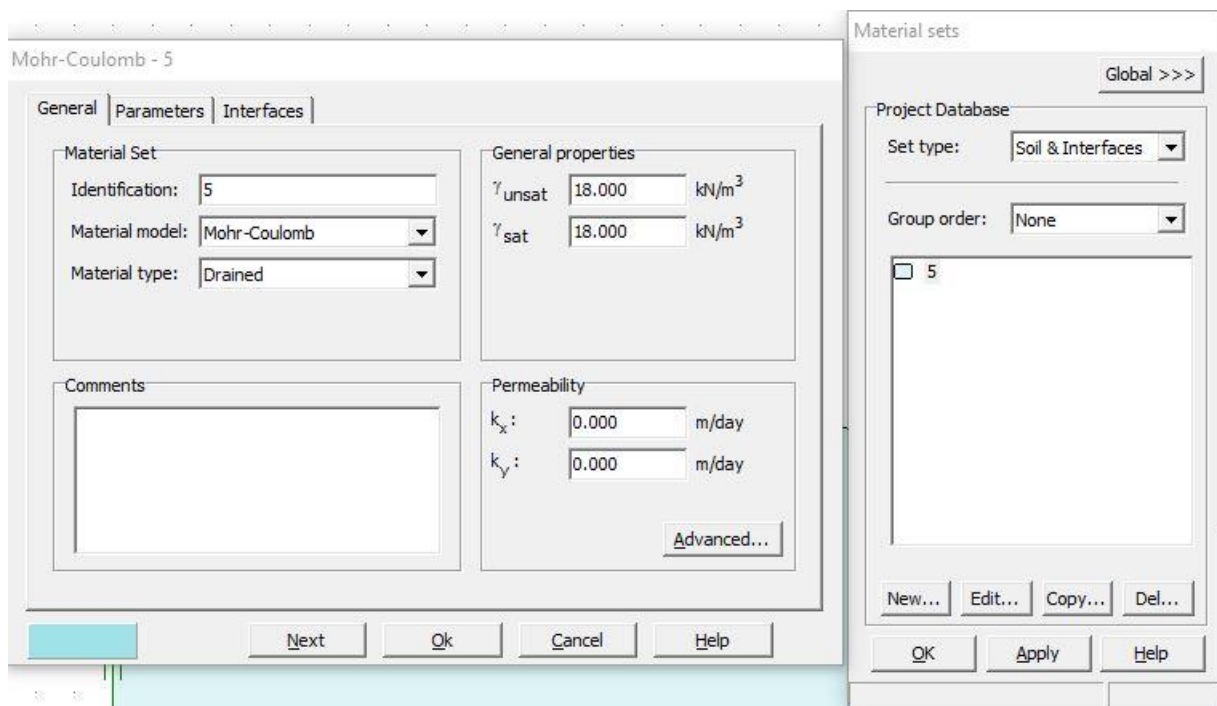
Εικόνα 4.4 Κίνηση κατά y και πάκτωση κατά x σε γεωμετρικό προσομοίωμα

4.3.4 Ιδιότητες υλικών (Material Sets)

Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνεται προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών του προσομοιώματος. Η εντολή ενεργοποιείται από το μενού Materials, είτε από το εικονίδιο Material Sets. Εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο δηλώνεται ένα νέο υλικό (new) ή μπορεί να χρησιμοποιηθούν έτοιμα υλικά από αυτά που παρέχει το Plaxis μέσω της επιλογής Global. Στην παρούσα διπλωματική εισήχθησαν νέα υλικά οπότε επιλέχθηκε το κουμπι New.

Με το πάτημα του κουμπιού (New) εμφανίζεται η καρτέλα General. Σε αυτήν την καρτέλα είναι δυνατό να δοθεί το όνομα του σχηματισμού, να επιλεγεί το μοντέλο με το θα προσομοιάζεται η μηχανική συμπεριφορά του υλικού από το οποίο αποτελείται το προσομοίωμα. Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται συχνότερα είναι το Mohr-Coulomb, επειδή δίνει μια καλή προσέγγιση της πραγματικότητας, χρησιμοποιεί τις εξής πέντε παραμέτρους:

- Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E)
- Ο λόγος του Poisson (ν)
- Η συνοχή (c)
- Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)
- Η γωνία διασταλτικότητας (ψ)



Εικόνα 4.5 Εισαγωγή νέου υλικού

Επίσης, είναι εφικτό να καθοριστούν οι συνθήκες της πίεσης των πόρων στο έδαφος (Drained, Undrained, Non-Porous). Επιπλέον, μπορεί να προσδιοριστεί και το ειδικό βάρος του υλικού σε περίπτωση που είναι ακόρεστο γ_{unsat} (πάνω από τη ζώνη κορεσμού) ή κορεσμένο γ_{sat} (κάτω από τη ζώνη κορεσμού). Το ακόρεστο ειδικό βάρος είναι μικρότερο από το κορεσμένο ($\gamma_{unsat} < \gamma_{sat}$).

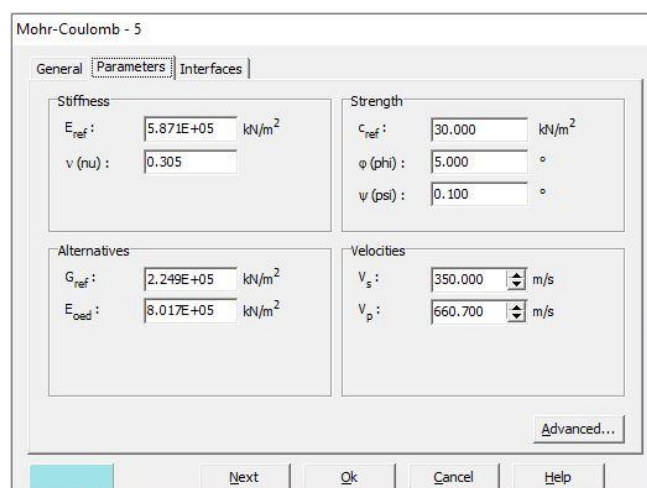
Στο πεδίο Permeability, εισάγονται οι τιμές της διαπερατότητας του υλικού του προσομοιώματος και χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις στερεοποίησης και τους υπολογισμούς της υπόγειας ροής του νερού. Η υδατοπερατότητα αναλύεται σε οριζόντια k_x και κατακόρυφη k_y , συνιστώσα στην παρούσα διπλωματική θεωρήθηκε ($k_x=k_y$).

Στην καρτέλα Parameters, εισάγονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο Mohr-Coulomb. Στο Plaxis εισάγονται αυτόματα κάποιοι συντελεστές οι οποίοι σχετίζονται με το μέτρο ελαστικότητας του Young και τον λόγο Poisson. Το G είναι το μέτρο διάτμησης και το E είναι ο συντελεστής του odometer test και υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (15)$$

Επιπλέον στο Plaxis εισάγονται και οι ταχύτητες των επιμήκων (V_p) και εγκάρσιων (V_s) σεισμικών κυμάτων. Στην καρτέλα αυτή υπάρχει και η εντολή Advanced, η οποία δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, και εμφανίζει παραμέτρους που συνδυάζουν την αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής του υλικού με το βάθος, ενώ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η επιλογή του ορίου αποκοπής των εφελκυστικών τάσεων που προκαλούν αστοχία.



Εικόνα 4.6 Εισαγωγή παραμέτρων νέου υλικού

Στην καρτέλα Interface, η οποία δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ορίζονται οι ιδιότητες των στοιχείων της διεπιφάνειας.

4.3.5 Δημιουργία Δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην συνέχεια ακολούθησε η δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για να οριστεί ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων. Το στάδιο αυτό ήταν απαραίτητο ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσουν οι παρακάτω υπολογισμοί. Έτσι στο πρόγραμμα Plaxis μέσω της εντολής Mesh Generation, είτε μέσω του μενού γραμμής εντολών: Mesh→Global Coarseness→Generate Mesh διαιρέθηκαν τα γεωμετρικά προσομοιώματα σε τριγωνικά σχήματα δύο διαστάσεων. Το κάθε τριγωνικό σχήμα αποτελεί το βασικό στοιχείο του γεωμετρικού μοντέλου μας. Η διαδικασία της παραγωγής δικτύου πεπερασμένων στοιχείων είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία στο Plaxis βασιζόμενη στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του μοντέλου μας. Στο πρόγραμμα είναι δυνατή η πύκνωση του δικτύου της επιφάνειας του μοντέλου μας σε πέντε στάδια τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

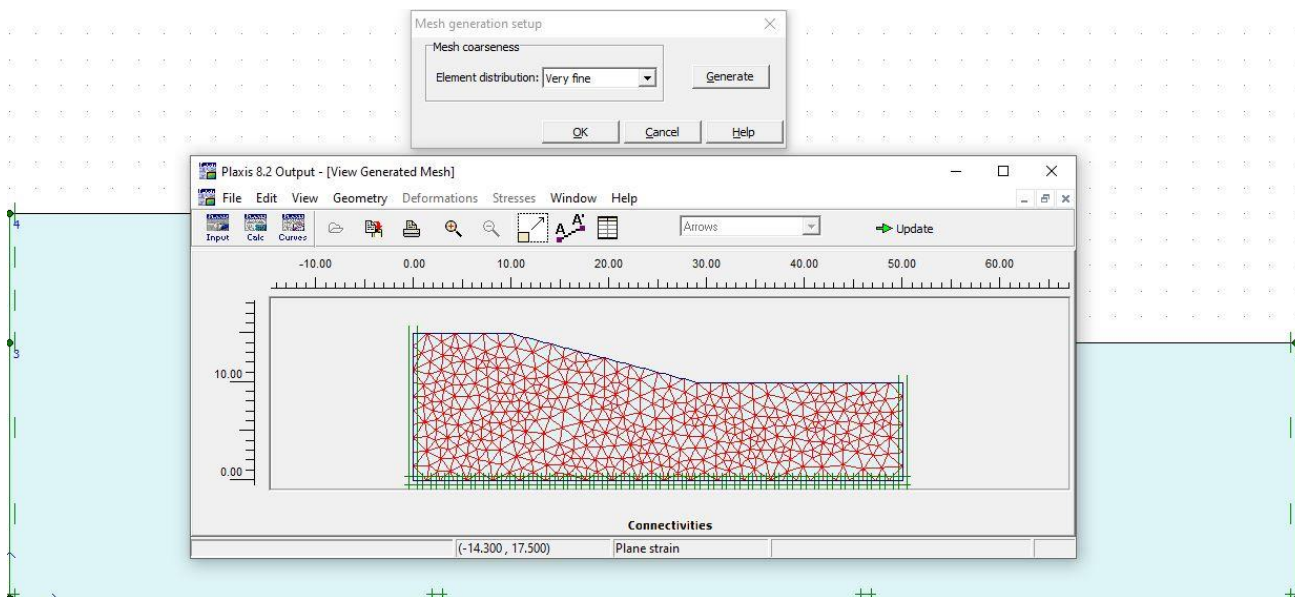
- Πολύ αραιό δίκτυο
- Αραιό δίκτυο
- Μέσης πυκνότητας δικτύου
- Πυκνό δίκτυο
- Πολύ πυκνό δίκτυο

Η πυκνότητα του δικτύου καθορίζεται από τον τύπο:

$$I = \sqrt{\frac{(x_{max}-x_{min})(y_{max}-y_{min})}{n_c}} \quad (16),$$
 όπου $x_{max}, x_{min}, y_{max}, y_{min}$ είναι οι διαστάσεις του γεωμετρικού μας μοντέλου κατά x και κατά y με τις αντίστοιχες μέγιστες και ελάχιστες τιμές συντεταγμένων τους και n_c είναι ο αριθμός που καθορίζει την πυκνότητα του δικτύου μας για δεδομένες τιμές που λαμβάνονται από το πρόγραμμα με βάση τις παρακάτω επιλογές:

- Για $n_c=25$ το δίκτυο είναι πολύ αραιό
- Για $n_c=50$ το δίκτυο είναι αραιό
- Για $n_c=100$ το δίκτυο είναι μέσης πυκνότητας
- Για $n_c=200$ το δίκτυο είναι πυκνό
- Για $n_c=400$ το δίκτυο είναι πολύ πυκνό

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το πολύ πυκνό δίκτυο και για τα δύο γεωμετρικά μοντέλα όπως απεικονίζονται παρακάτω.

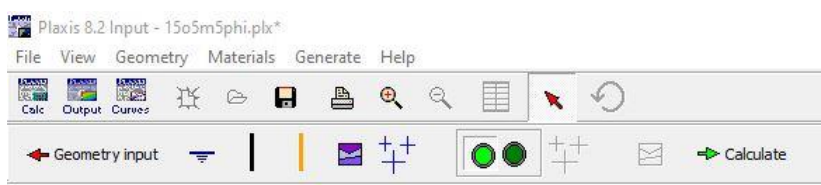


Εικόνα 4.7 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων με επιλογή πολύ μεγάλης πυκνότητας

4.3.6 Υπολογισμός αρχικών συνθηκών (Initial Conditions)

Μετά την δημιουργία γεωμετρικού μοντέλου και κατάλληλου δικτύου προσδιορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες (Initial Conditions). Στις αρχικές συνθήκες, υπολογίζονται οι πιέσεις πόρων του νερού αλλά και οι ενεργές τάσεις.

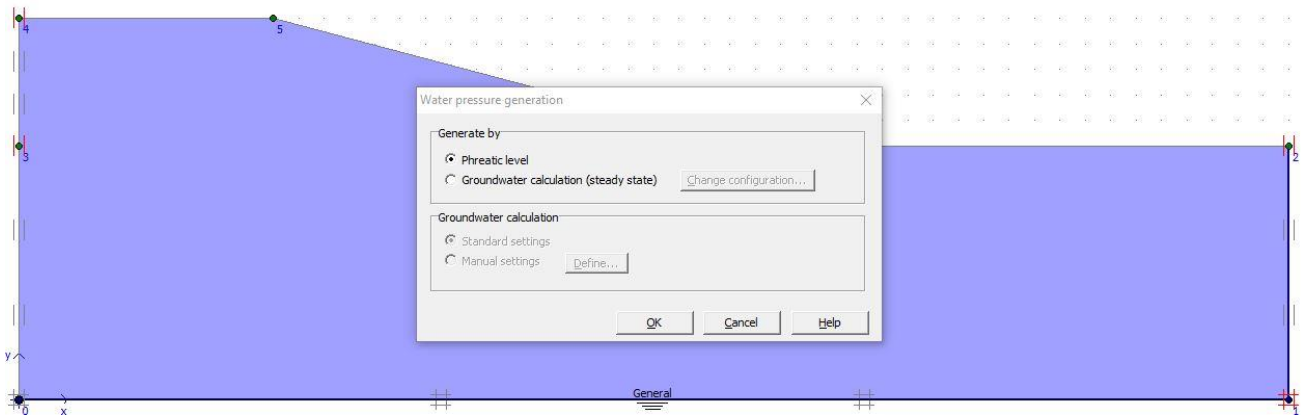
Με τον αριστερό ανοιχτό πράσινο κύκλο υπολογίζονται οι αρχικές πιέσεις πόρων (Initial Pore Pressures) και με τον δεξιό σκούρο πράσινο κύκλο οι ενεργές τάσεις (Initial Stresses and geometry configuration).



Εικόνα 4.8 Παράθυρο υπολογισμού αρχικών συνθηκών

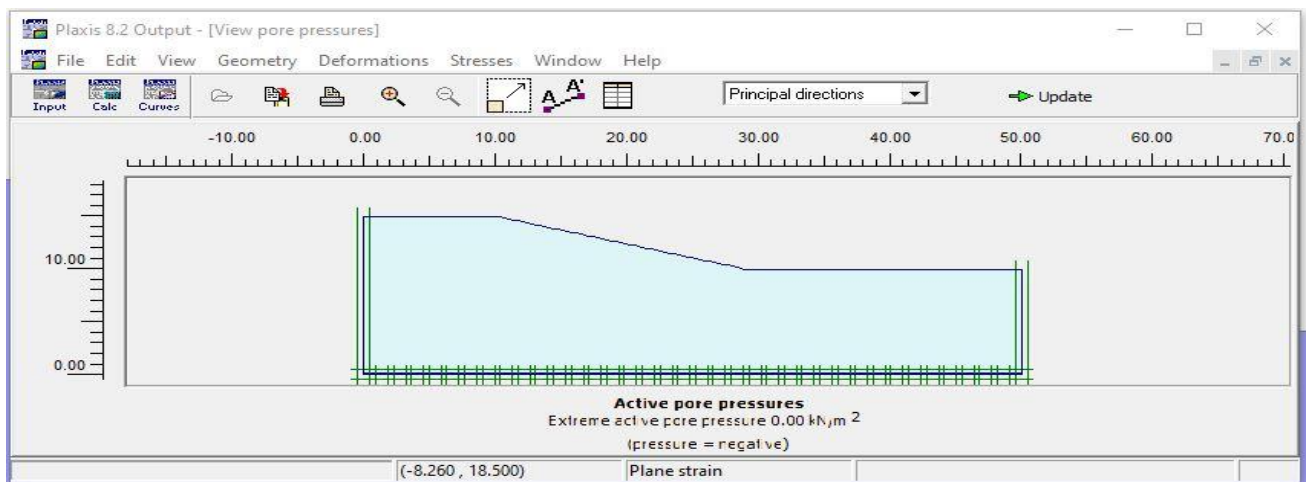
Σε περιπτώσεις που υπάρχει νερό στο προσομοίωμα ενεργοποιείται η εντολή Initial Pore Pressures, αλλιώς όχι. Έπειτα από την ενεργοποίηση της προηγούμενης εντολής εμφανίζεται ένα παράθυρο με το ειδικό βάρος του νερού και έχει την προεπιλογή 10 kN/m^3 , την οποία και αποδεχόμαστε.

Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα εισαγωγής της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια της εντολής από το μενού Geometry→Phreatic level, ή με το πάτημα του αντίστοιχου εικονιδίου, το οποίο απεικονίζεται με γνωστό σύμβολο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 4.9 Προσδιορισμός της φρεατικής στάθμης του προσομοιώματος

Επίσης η πίεση των πόρων είναι δυνατό να υπολογιστεί με την εντολή Generate→Water Pressures. Η εντολή Phreatic Level που ακολουθεί σχετίζεται με τη στάθμη που καθορίστηκε προηγουμένως και προσδιορίζει την πίεση των πόρων. Το Ground water calculation (steady state), λαμβάνει υπόψιν την υδατοπερατότητα του εδαφικού υλικού η οποία ορίστηκε στα προηγούμενα στάδια.

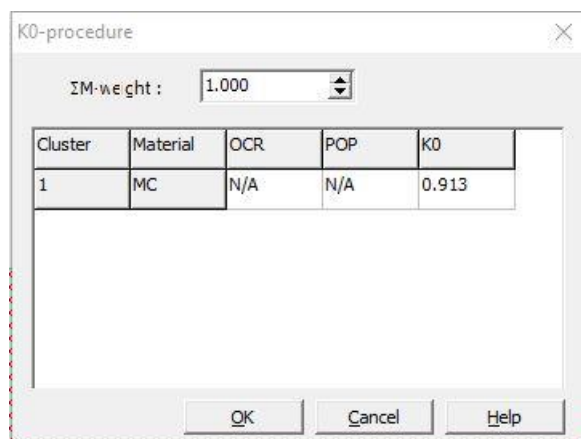


Εικόνα 4.10 Ενεργές τάσεις που ασκούνται στους πόρους του υλικού

Επειδή μελετάμε όρυγμα υπό στραγγισμένες συνθήκες και έχουμε τη στάθμη του ύδατος στη βάση του σώματος του πρανού, άρα το υλικό μας είναι στεγνό, το νερό δεν δημιουργεί περαιτέρω πιέσεις στους πόρους.

Οι ενεργές τάσεις σε μια εδαφική στρώση εξαρτώνται από το βάρος του υλικού και τον σχηματισμό του. Σε αυτό το σημείο πραγματοποιούνται οι αρχικές κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις ($\sigma_{v,0}$ και $\sigma_{h,0}$), αντίστοιχα. Η κατακόρυφη τάση σχετίζεται με το βάρος του υλικού και η οριζόντια σχετίζεται από τον συντελεστή πλευρικής βαρυτικής πίεσης, γνωστό και ως K_0 .

Οι ενεργές τάσεις προσδιορίζονται μέσω της εντολής από το μενού Generate→Initial Stresses. Εμφανίζεται το παράθυρο K_0 -Procedure. Ο συντελεστής ΣM_{weight} , αντιπροσωπεύει την αναλογία της βαρύτητας που ασκείται και έχει την προεπιλεγμένη τιμή 1. Ο συντελεστής υπολογίζεται από τη σχέση του Jaky ($1 - \sin \phi$), και του οποίου η τιμή φαίνεται στην τελευταία στήλη του παραθύρου.



Εικόνα 4.11 Συντελεστής K_0 για συγκεκριμένη γεωμετρία πρανούς

4.4 Πρόγραμμα υπολογισμών-Calculation Program

Η μετάβαση στο πρόγραμμα Calculation Program πραγματοποιείται με το εικονίδιο Calculate. Στο πρόγραμμα αυτό ορίζονται οι τύποι και τα στάδια (ή φάσεις) των υπολογισμών και οι τύποι των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν.

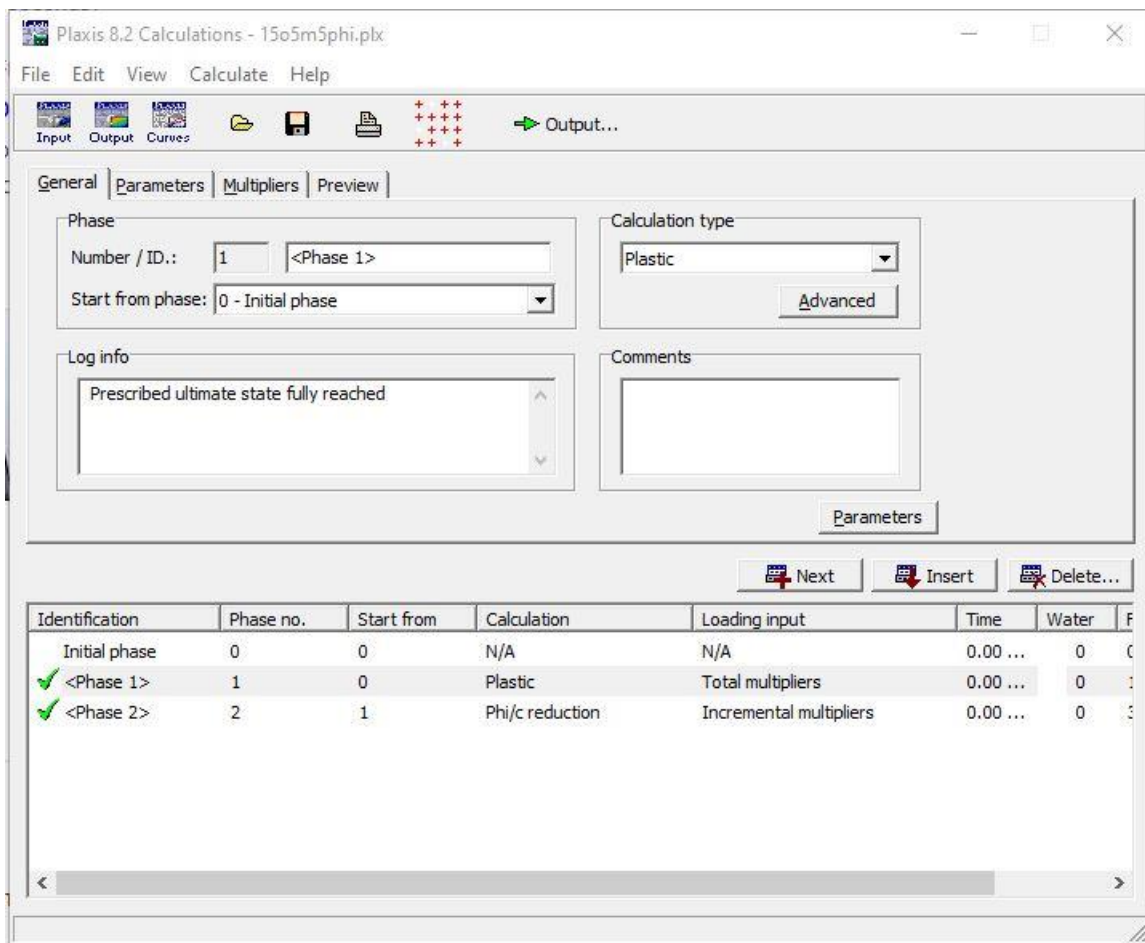
4.4.1 Καθορισμός επιμέρους φάσεων

Με το που εμφανίζεται το παράθυρο του προγράμματος εισάγεται αυτόματα μόνο μια φάση (Phase 0). Αυτή η φάση αντιπροσωπεύει τις αρχικές συνθήκες του έργου, όπως αυτές ορίστηκαν στο Input πρόγραμμα. Η εισαγωγή νέας φάσης υπολογισμού πραγματοποιείται με το την εντολή Next, είτε από το μενού Edit→Next. Ομοίως είναι δυνατόν να διαγραφεί και μία φάση. Ύστερα από την εισαγωγή της κάθε φάσης θα πρέπει να καθοριστούν τα στοιχεία και τις ιδιότητες τα οποία την χαρακτηρίζουν και την προσδιορίζουν. Αυτό πραγματοποιείται με βάση τις καρτέλες General, Parameters, Multipliers που υπάρχουν στο πάνω μέρος του παραθύρου.

Στην καρτέλα General καθορίζεται ο τύπος των υπολογισμών που θα πραγματοποιηθούν. Οι επιλογές που προσφέρει το λογισμικό είναι:

- Plastic: ελαστο-πλαστική ανάλυση η οποία χρησιμοποιείται στις περισσότερες γεωτεχνικές εφαρμογές και δεν λαμβάνει υπόψιν τον χρόνο εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο εδαφικού ερπυσμού μαλακού εδάφους (Soft Soil Creep Model).

- Consolidation Analysis: χρησιμοποιείται σε γεωτεχνικές εφαρμογές όπου πρέπει η πίεση των πόρων να αναλυθεί συναρτήσει με τον χρόνο.
- Phi/c reduction: αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας μέσω της μείωσης των παραμέτρων ϕ και c . Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν οι αναλύσεις Plastic και Phi/c reduction για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων και του συντελεστή ασφαλείας των πρανών. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας FS, γίνεται βαθμιαία μείωση των αρχικών τιμών της συνοχής (c) και της εφαπτόμενης γωνίας εσωτερικής τριβής ($\tan\phi$), μέχρι να αστοχήσει το μοντέλο της κατασκευής.
- Dynamic analysis: χρησιμοποιείται για την δυναμική ανάλυση παραμορφώσεων.

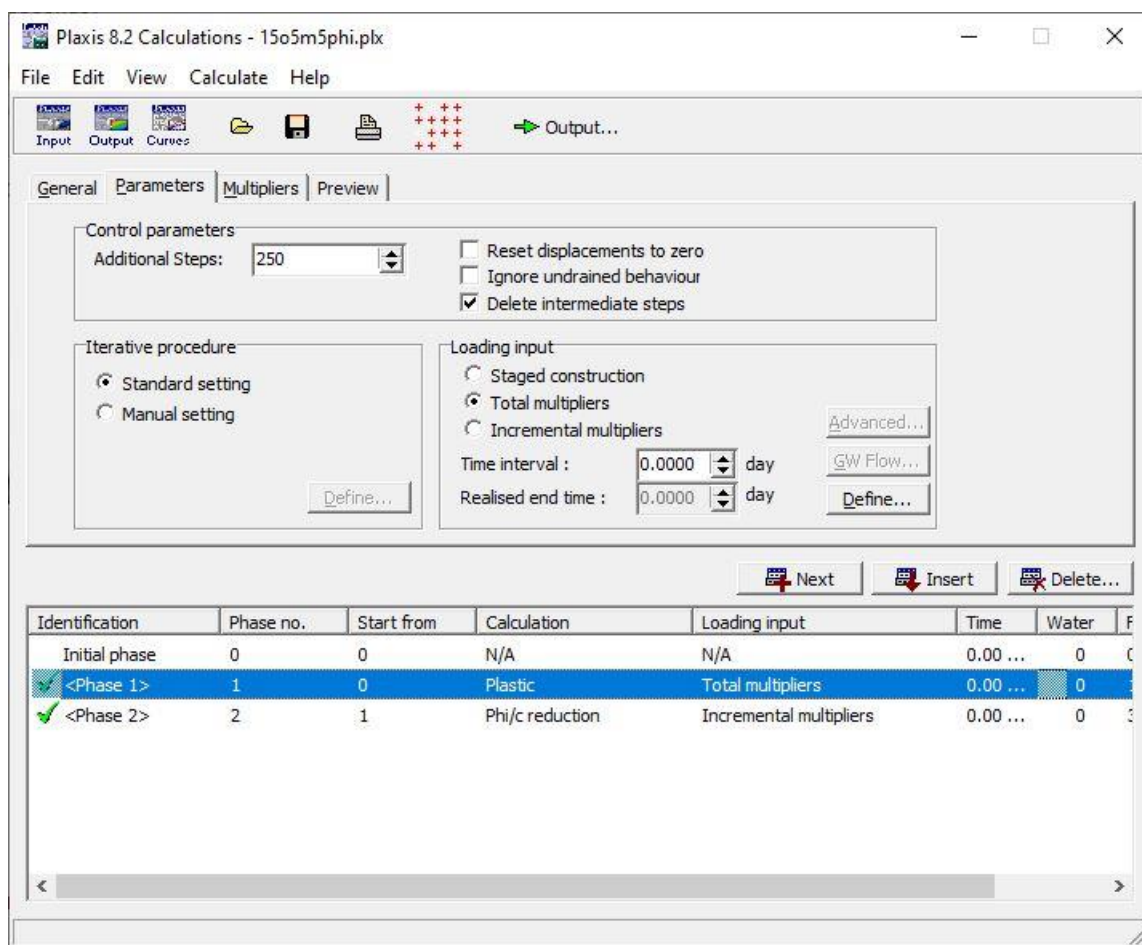


Εικόνα 4.12 Καρτέλα General

Στην καρτέλα Parameters ορίζονται οι παράμετροι της ανάλυσης για κάθε στάδιο. Καθορίζεται ο αριθμός βημάτων που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μια συγκεκριμένη φάση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Additional Steps.

Όσον αφορά την εντολή Reset displacements to zero, χρησιμοποιείται σε περίπτωση που θέλουμε να μηδενίσουμε τις μετακινήσεις της προηγούμενης φάσης ώστε να μην ληφθούν υπόψιν στους μετέπειτα υπολογισμούς. Στην παρούσα διπλωματική στην δεύτερη φάση υπολογισμού αφορούσε το Phi/c reduction, γινόταν υποχρεωτικά η χρήση της εντολής Reset displacements to zero, επειδή θα προστεθούν και οι μετατοπίσεις στη δεύτερη φάση

οι οποίες σχετίζονται με τις βαρυτικές παραμορφώσεις της πρώτης φάσης (Plastic Phase), με αποτέλεσμα να προκύπτουν ανακριβείς υπολογισμοί.



Εικόνα 4.13 Καρτέλα Parameters και επιλογές αυτής, με εκτελεσμένους υπολογισμούς φάσεων

Η εντολή Ignore undrained behavior, χρησιμοποιείται σε περίπτωση που θέλουμε να μην λάβουμε υπόψιν τις αστράγγιστες συνθήκες. Χρησιμοποιείται αφού πρώτα ορίστηκε στο Input program, το εδαφικό υλικό ως Undrained. Άρα τα στραγγισμένα εδαφικά υλικά (Drained), μπορεί να θεωρηθούν αστράγγιστα (Undrained) και οι αρχικές πιέσεις πόρων δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Η εντολή Delete intermediate steps, χρησιμοποιείται ώστε να εξοικονομηθεί χώρος στον σκληρό δίσκο. Όλα τα πρόσθετα βήματα υπολογισμού εκτός από το τελευταίο διαγράφονται.

Στην περιοχή Loading Input, όπου επιλέγεται ο τρόπος της εισαγόμενης φόρτισης.

- Staged construction, όπου ορίζεται η τελική κατάσταση κάθε φάσης μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του μοντέλου ή της πίεσης των πόρων ύστερα από επιβολή κατασκευαστικών έργων ή εκσκαφών.
- Total multipliers, όπου ορίζονται οι πολλαπλασιαστές φόρτισης με τους οποίους ορίζονται οι μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων. Στις αναλύσεις που διεξήχθησαν στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε αυτή η εντολή, για να

μεταβάλλονται οι συντελεστές των στατικών και ψευδοστατικών φορτίσεων (καρτέλα Multipliers).

- Incremental Multipliers, σε κάθε φάση υπολογισμού επιλέγεται τιμή για έναν ορισμένο πολλαπλασιαστή και με αυτόν τον τρόπο ορίζεται σταδιακά η επιβολή εξωτερικών φορτίων. Κατά την επιλογή Phi/c reduction, που είναι αναγκαία για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, αυτομάτως η επιλογή Incremental Multipliers επιλέγεται.

Στην καρτέλα Multipliers, γίνεται η εισαγωγή των τιμών των πολλαπλασιαστών. Διακρίνονται σε Total multipliers και Incremental Multipliers και συμβολίζονται με ΣΜ και Μ αντίστοιχα.

- $M_{disp}, \Sigma M_{disp}$: αυτοί οι πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί το μέγεθος των μετατοπίσεων που εισάγονται στο στάδιο staged construction. Η συνολική τιμή των προβλεπόμενων μετατοπίσεων που προκύπτουν κατά τον υπολογισμό είναι το αποτέλεσμα των αρχικών τιμών στο στάδιο staged construction και της παραμέτρου ΣM_{disp} .
- $M_{loadA}, \Sigma M_{loadB}, M_{loadB}, \Sigma M_{loadB}$: αυτοί οι πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί το μέγεθος των επιφανειακών και σημειακών φορτίων.
- $M_{weight}, \Sigma M_{weight}$: αυτοί οι πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται ώστε να ελεγχθεί η αναλογία της βαρύτητας η οποία εφαρμόζεται στο μοντέλο άρα και η αναλογία των επιμέρους υλικών βαρών που ορίστηκαν στο Input Program (έδαφος, νερό και επιμέρους κατασκευές).
- $M_{accel}, \Sigma M_{accel}$: αυτοί οι πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί το μέγεθος των ψευδοστατικών δυνάμεων, ως αποτέλεσμα της επιτάχυνσης η οποία έχει δηλωθεί στο General Settings. Το συνολικό μέγεθος των επιταχύνσεων το οποίο προκύπτει κατά την διάρκεια των υπολογισμών είναι αποτέλεσμα των αρχικών τιμών επιταχύνσεων που δόθηκαν στο Input Program στο General Settings, όσο και της παραμέτρου ΣM_{accel} . Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις (0,08g, 0,12g και 0,18g) στο μοντέλο, στη συνέχεια στην Plastic Phase (φάση 1), ορίστηκε πολλαπλασιαστής επιτάχυνσης $\Sigma M_{accel}=1$. Θα μπορούσε να εφαρμοστεί και πολλαπλασιαστής $\Sigma M_{accel}=-1$. Στην περίπτωση της ύπαρξης στατικής ευστάθειας πρηνών τοποθετείται η τιμή 0.
- $M_{sf}, \Sigma M_{sf}$: αυτοί οι πολλαπλασιαστές σχετίζονται με την επιλογή Phi-c reduction στο Plaxis για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Επιλέγεται στην περίπτωση που πραγματοποιείται επίλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών, δηλαδή μια φάση πριν την φάση του Phi/c reduction. Ο τύπος της εξίσωσης του ΣM_{sf} για τον προσδιορισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων συνοχής σε μια συγκεκριμένη φάση ανάλυσης ισούται με:

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (17)$$

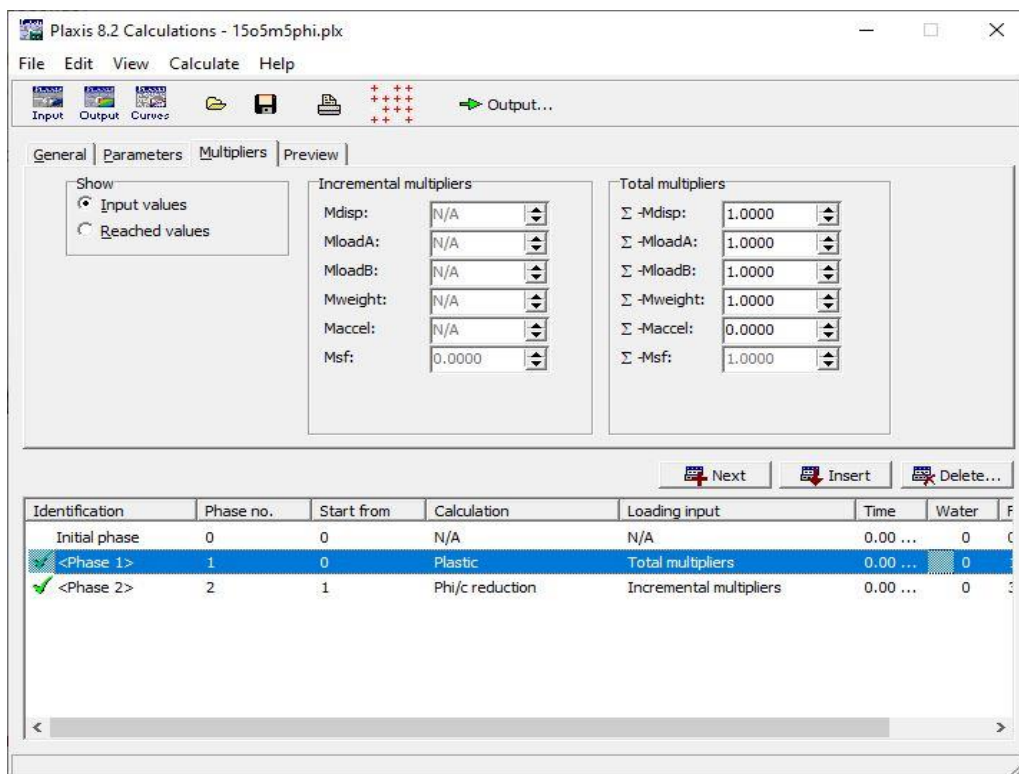
όπου:

- φ_{input} : είναι η αρχική γωνία εσωτερικής τριβής του εκάστοτε εδαφικού υλικού

- $\varphi_{reduced}$: είναι η μειωμένη τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής σε κάθε στάδιο της ανάλυσης
- c_{input} : είναι η αρχική συνοχή των υλικών
- $c_{reduced}$: είναι η μειωμένη συνοχή των υλικών σε κάθε στάδιο της ανάλυσης

Η τιμή του παράγοντα τοποθετείται ίση με 1 σε κάθε στάδιο επίλυσης. Οι παράμετροι συνοχής, μειώνονται μέχρι να αστοχήσει το έδαφος ή η κατασκευή, οπότε και ο τύπος του συντελεστή ασφαλείας σε αυτό το σημείο ισούται με:

$$FS = \frac{\text{available strength}}{\text{strength of failure}} \quad (18) = \text{value of } \Sigma M_{sf} \text{ at failure}$$

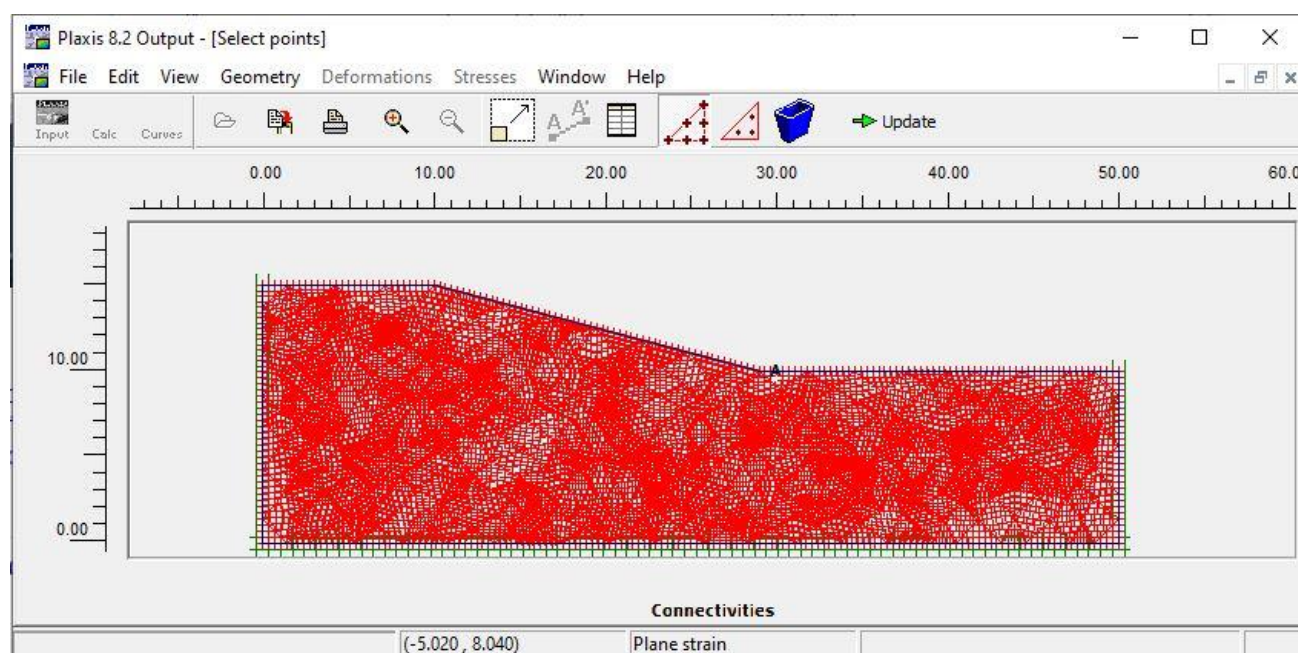


Εικόνα 4.14 Καρτέλα Multipliers, για τον υπολογισμό FS έναντι ψευδοστατικών φορτίσεων

4.4.2 Επιλογή σημείων για τη δημιουργία καμπυλών

Έπειτα από τον καθορισμό των φάσεων υπολογισμών και πριν αρχίσει το λογισμικό την επίλυση, επιλέγονται κάποια χαρακτηριστικά σημεία στο μοντέλο για τη δημιουργία καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης ή μεταβολής τάσεων. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι είτε τασικά σημεία είτε κόμβοι των στοιχείων. Η επιλογή των σημείων είναι απαραίτητη για να σχεδιαστούν καμπύλες στο (Curves Program). Τα σημεία τοποθετούνται συνήθως σε χαρακτηριστικές περιοχές στις οποίες αναμένεται και η μεγαλύτερη εδαφική μετατόπιση, ώστε οι καμπύλες να απεικονίζουν όσο τον δυνατόν πιο πιστά το μέγεθος των μετατοπίσεων. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω το εικονίδιο δίπλα από το εικονίδιο Output, είτε μέσω της εντολής View→Select point for curves. Αμέσως μετά πατάμε την εντολή Updateπροκειμένου να ενημερωθεί το λογισμικό για τις νέες αλλαγές.

Για τη δεδομένη περίπτωση υπολογισμού μόνο του συντελεστή ασφαλείας η επιλογή σημείων δεν είναι απαραίτητη. Όμως επιλέχτηκε για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη των μετατοπίσεων.

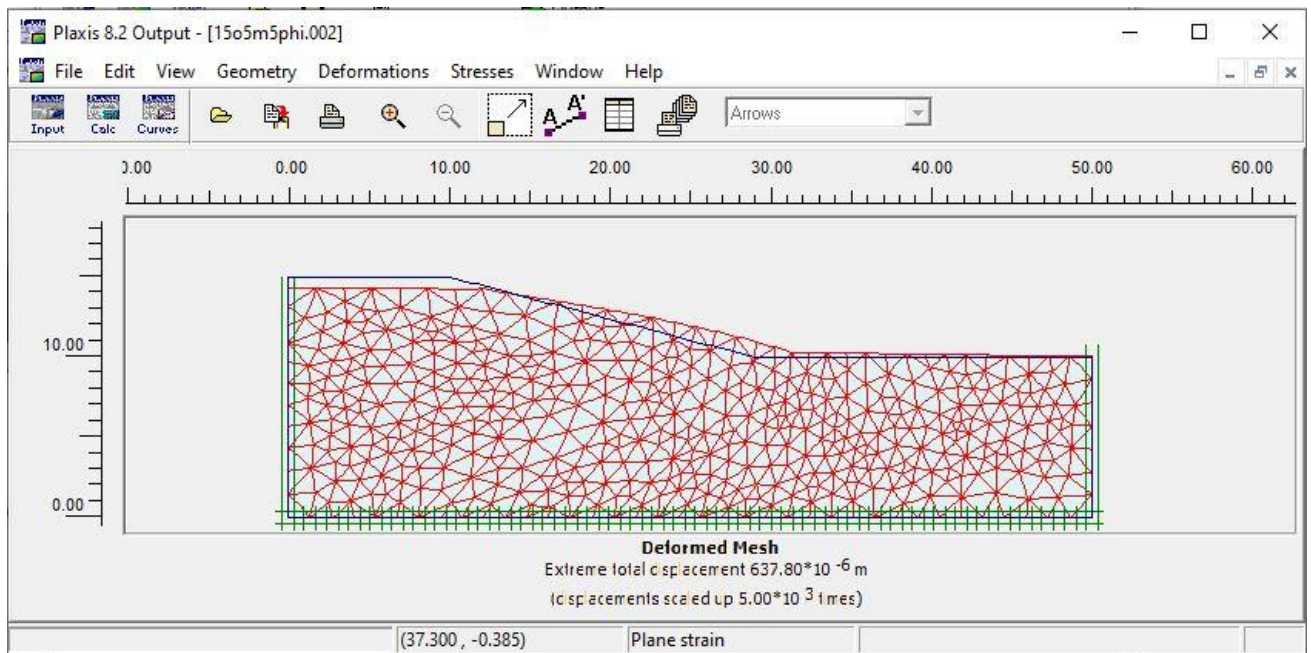


Εικόνα 4.15 Επιλογή σημείου στον πόδα του πρανούς, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του

4.5 Πρόγραμμα Εξαγωγής Αποτελεσμάτων - Output Program

Στο πρόγραμμα Output παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την διαδικασία υπολογισμού στο calculate program. Σε αυτό το πρόγραμμα είναι εφικτό να επιλεγεί το γεωμετρικό μοντέλο και την φάση υπολογισμού την οποία θέλουμε να μελετήσουμε ξεχωριστά. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες επιλογές.

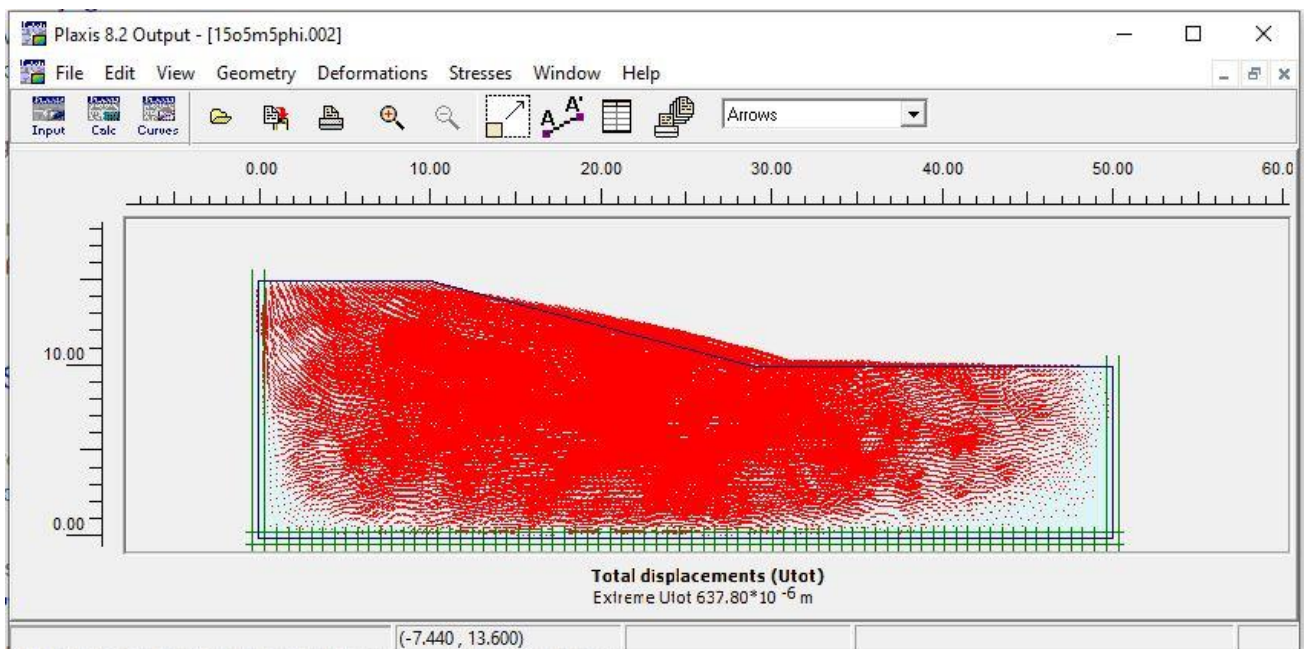
- Το παραμορφωμένο πλέγμα (deformed mesh) απεικονίζει την παραμόρφωση της αρχικής γεωμετρίας του προσομοιώματος ύστερα από διάφορους τύπους φορτίσεων.



Εικόνα 4.16 Παραμορφωμένο δίκτυο

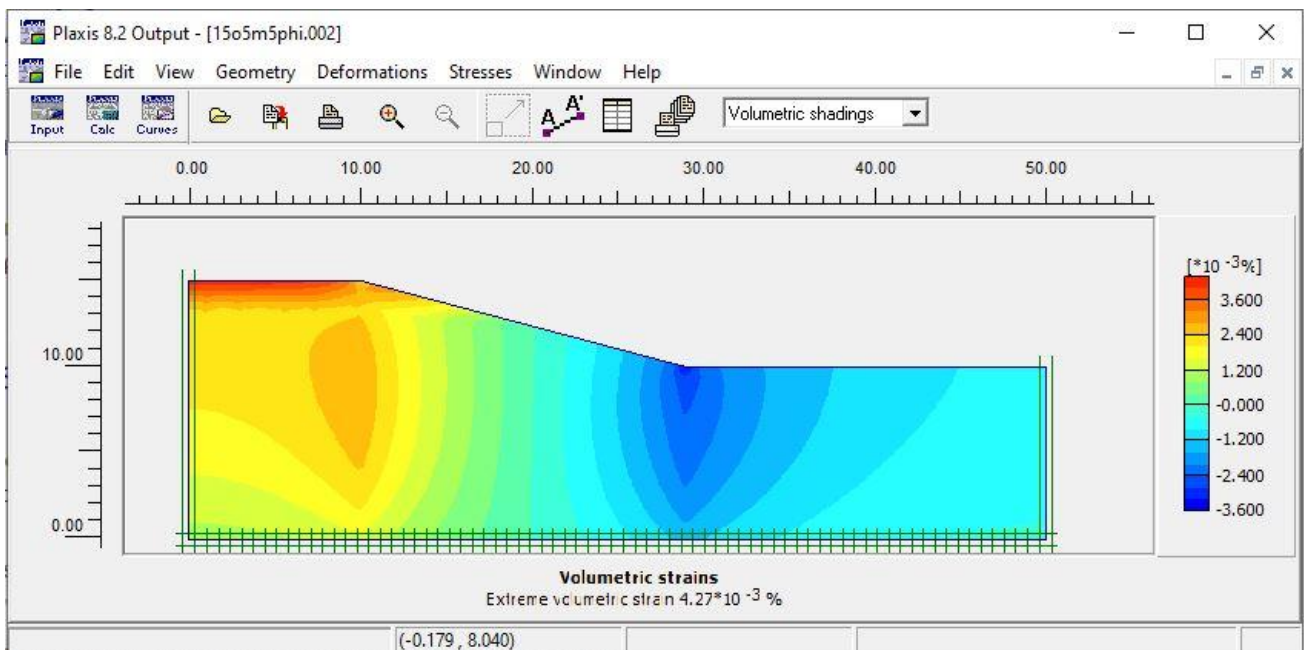
Εδώ παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μια εκπληκτικά μεγάλη μετατόπιση για ένα τόσο ευσταθές πρηνές. Αυτό οφείλεται στο ότι η γεωμετρία του έχει μεγεθυνθεί 5000 φορές.

- Ολικές μετατοπίσεις (total displacements). Είναι οι συνολικές μετατοπίσεις (κάθετα και οριζόντια) που παρουσιάζει το γεωμετρικό μοντέλο σε όλους τους κόμβους στο τέλος κάθε φάσης υπολογισμού. Υπάρχουν διάφορες επιλογές απεικόνισης όπως: χρωματικής κλίμακας (shadings), διαφορετικών μηκών βέλη (arrows) και καμπύλες ίσης μετατόπισης (contour lines). Τα αποτελέσματα των ολικών μετατοπίσεων προβάλλονται μέσω της εντολής Deformations→Total displacements.



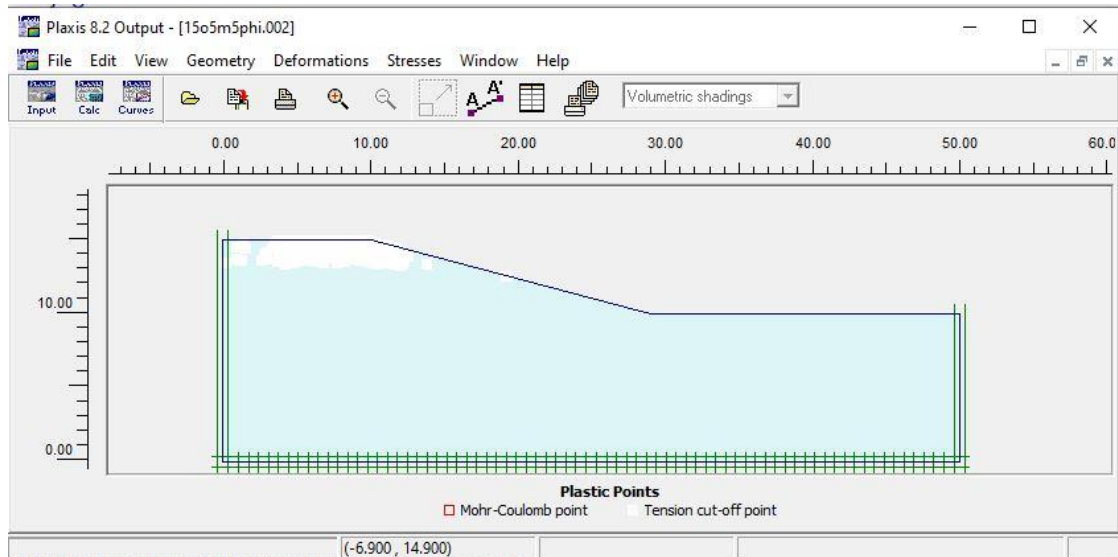
Εικόνα 4.17 Ολικές μετατοπίσεις

- Ολικές παραμορφώσεις (total strains): πρόκειται για την απεικόνιση πάνω στην γεωμετρία του προσομοιώματος των ολικών παραμορφώσεων. Το μήκος αντιστοιχεί στο μέγεθος και η κατεύθυνση του βέλους στην κύρια κατεύθυνση της παραμόρφωσης. Η εντολή που χρησιμοποιείται είναι η εντολή Deformations→Total Strains.



Εικόνα 4.18 Ολικές πιέσεις

Σημεία αστοχίας (Plastic points): τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στα τασικά σημεία τα οποία βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση. Απεικονίζονται είτε με ένα κόκκινο τετράγωνο, που σημαίνει ότι η τάση αγγίζει το όριο αστοχίας του Coulomb, είτε με ένα λευκό τετράγωνο που σημαίνει ότι η εφελκυστική τάση σε ένα σημείο ξεπερνά το όριο αποκοπής. Τα σημεία αστοχίας του Coulomb χρησιμεύουν, για τον έλεγχο της επάρκειας του μεγέθους. Έτσι σε περίπτωση συσσώρευσης στα όρια η επίλυση πρέπει να επαναληφθεί σε μεγαλύτερες διαστάσεις. Υπολογίζονται μέσω της εντολής Stresses → Plastic points.



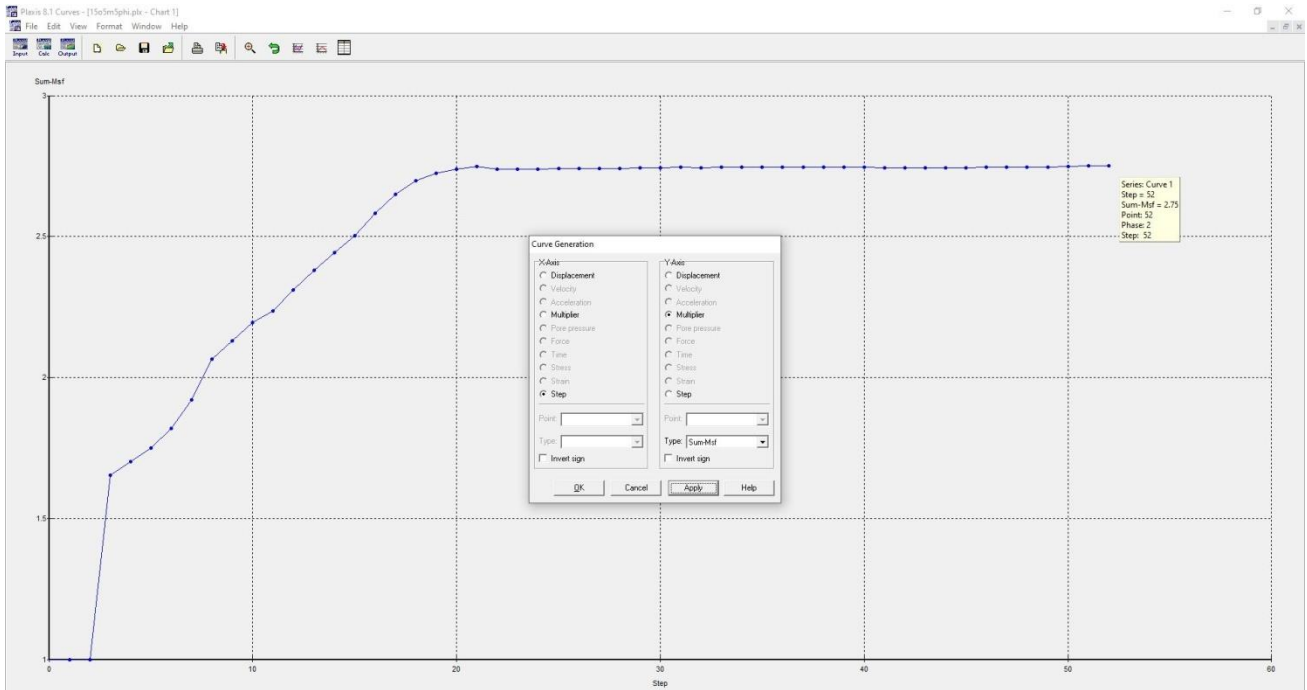
Εικόνα 4.19 Σημεία αστοχίας

- Ενεργή πίεση πόρων (active pore pressures): Αναφέρεται στην συνολική πίεση νερού των πόρων που αντιστοιχεί στο άθροισμα της πίεσης των πόρων σε σταθερή κατάσταση και της επιπρόσθετης πίεσης των πόρων που προκαλείται από την φόρτιση, στο τέλος κάθε φάσης. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της εντολής Stresses→Active pore pressures.

4.6 Πρόγραμμα δημιουργίας καμπυλών - Curves Program

Κατά την έναρξη του προγράμματος Curves Program ζητείται να επιλεγεί από το χρήστη το αρχείο στο οποίο επιθυμεί να δουλέψει. Στο πρόγραμμα εμφανίζονται κάποιες επιλογές για τον οριζόντιο (x) και κάθετο άξονα (y). Κάποιες βασικές καμπύλες που είναι εφικτό να παραχθούν μέσω του προγράμματος είναι:

- Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης οι οποίες απεικονίζουν την σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου φορτίου στο γεωμετρικό μοντέλο και της μετατόπισής του. Συνήθως η μετατόπιση απεικονίζεται από τον οριζόντιο άξονα x, ενώ το φορτίο από τον κατακόρυφο άξονα y.
- Καμπύλες χρόνου-μετατόπισης οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθεί η επίδραση του χρόνου στην μετατόπιση των χαρακτηριστικών σημείων σε περιπτώσεις αναλύσεων στερεοποίησης, ερπυσμού και δυναμικών αναλύσεων. Ο χρόνος συνήθως τοποθετείται στον οριζόντιο άξονα x ενώ η μετατόπιση του επιλεγμένου σημείου στον κατακόρυφο άξονα y.
- Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης οι οποίες χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της τοπικής συμπεριφοράς της τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους. Οι παράμετροι των τάσεων εκφράζονται σε μονάδες τάσεων, ενώ των παραμορφώσεων είναι αδιάστατες.



Εικόνα 4.20 Παράθυρο δημιουργίας καμπυλών και εύρεση του συντελεστή ασφαλείας για τη δεδομένη περίπτωση $Sum-Msf = 2.75$

Κεφάλαιο 5: Μελέτη κατολισθητικών φαινομένων και ευστάθεια πρηνών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες.

5.1 Εισαγωγή

Στην πρώτη φάση της εργασίας υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας και ευστάθειας εκατοντάδων ορυγμάτων στο πρόγραμμα Plaxis με την μέθοδο phi-c reduction και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με τις τιμές που προκύπτουν από τα διαγράμματα των Taylor και Hoek & Bray. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκαν νέα διαγράμματα και εξισώσεις όχι μόνο υπό στατικές συνθήκες, αλλά και σε καταστάσεις σεισμού με τη βοήθεια της ψευδοστατικής μεθόδου. Στην δεύτερη φάση της εργασίας εξετάστηκε κατά πόσο επηρεάζεται ο συντελεστής ασφαλείας δύο γεωμετρικά συμμετρικών επιχωμάτων από την μεταξύ τους απόσταση, με την προϋπόθεση ότι και τα δύο επιχώματα αποτελούνται από το ίδιο εδαφικό υλικό. Στην τρίτη φάση υπολογισμού υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες σε ένα πραγματικό όρυγμα σε μια περιοχή της Ικαρίας.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, για όλες τις περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι παράμετροι σχετικά με το εδαφικό υλικό από το οποίο αποτελούνται τα πρηνή που μελετήθηκαν. Οι παράμετροι αυτοί είχαν σχέση με το ύψος του πρηνούς, τη γωνία κλίσης του, τη δύναμη συνοχής και τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδαφικού υλικού.

5.2: Προσδιορισμός και σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή ασφαλείας και ευστάθειας πρανών και δημιουργία εξισώσεων

Το πρώτο πράγμα που πραγματοποιήθηκε στην πρώτη φάση της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας μέσω του λογισμικού Plaxis υπό στατικές συνθήκες. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι εξισώσεις των συντελεστών ασφαλείας που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο. Ύστερα υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας και η ευστάθεια των πρανών υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, ενώ συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας και ευστάθειας που προέκυψαν υπό στατικές συνθήκες μέσω του διαγράμματος Taylor. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας που προέκυψαν από το λογισμικό του Plaxis με τα διαγράμματα Hoek & Bray υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες.

5.2.1: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

5.2.1 Σχεδιασμός Γεωμετρίας Προσομοιώματος και Εισαγωγή Δεδομένων

Όσον αφορά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του πρανούς, δύο είναι οι κύριες παράμετροι που μας απασχόλησαν:

- Η γωνία κλίσης του πρανούς (β). Οι τιμές της γωνίας κλίσης των πρανών οι οποίες επιλέχθηκαν ήταν οι $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ και 90° . Οι παραπάνω τιμές της γωνίας κλίσης των πρανών επιλέχθηκαν ώστε να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται καλύτερα ο συντελεστής ασφάλειας σε ένα φάσμα γωνιών με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.), καθώς και ο συνυπολογισμός τους με το διάγραμμα Taylor υπό στατικές συνθήκες.
- Το ύψος του πρανούς (H). Οι αναλύσεις του συντελεστή ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν για τα ύψη 5m, 10m, 20m και 40m.

Σε όλες τις περιπτώσεις η μάζα του υλικού με το οποίο προσομοιώθηκε το πρανές είχε δύναμη συνοχής ίση με $c=30 \text{ kN/m}^2$.

Έπειτα αφού κατασκευάστηκε η γεωμετρία του προσομοιώματος ορίστηκαν σε αυτό οι συνοριακές συνθήκες (Standard Fixities), όπου στα κατακόρυφα όρια δεξιά και αριστερά του προσομοιώματος έχουμε κύλιση κατά τον άξονα y ($u_x=0$) και πάκτωση στα κάτω όρια του προσομοιώματος ($u_x=u_y=0$) με μηδενική μετατόπιση στους άξονες x και y .

Ύστερα εισήχθησαν οι ιδιότητες των υλικών στο Plaxis (μέσω της εντολής Material Sets). Η προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους από το οποίο αποτελείται το πρανές

πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο Mohr-Coulomb. Το ελαστικοπλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb, χρησιμοποιεί τις παρακάτω πέντε παραμέτρους:

- Μέτρο ελαστικότητας του Young (E_{ref})
- Λόγος Poisson (ν)
- Συνοχή (c)
- Γωνία εσωτερικής τριβής (φ)
- Γωνία διασταλτικότητας (ψ)

Στο υλικό από το οποίο αποτελείται η μάζα του πρανούς χρησιμοποιήθηκαν πέντε γωνίες εσωτερικής τριβής (φ) των 5°, 10°, 20°, 30° και 40°, ώστε να προσδιοριστεί η ευστάθεια και ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς και να συγκριθεί με το διάγραμμα του Taylor.

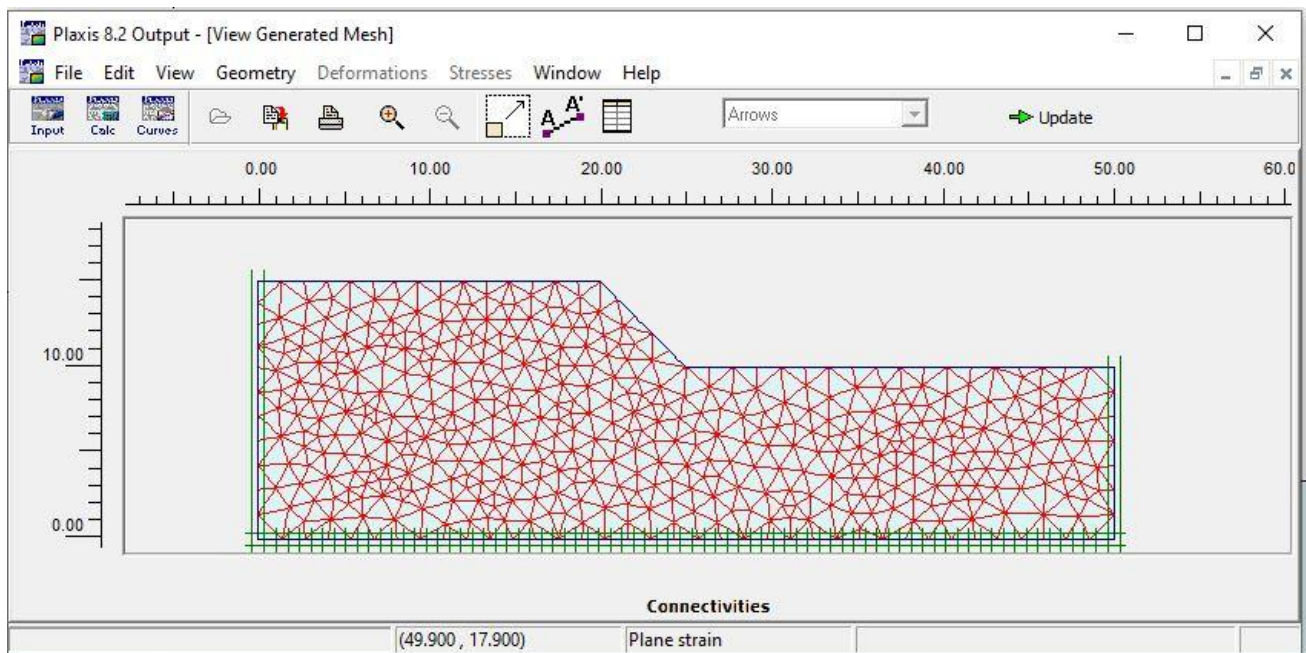
Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει τις παραμέτρους του εδαφικού υλικού:

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες εδαφικού υλικού ορύγματος

Παράμετροι	Υλικό	Μονάδες Μέτρησης
Μοντέλο υλικού (Model)	Mohr Coulomb	-
Ειδικό βάρος του υλικού (γ)	18	kN/m^3
Μέτρο ελαστικότητας Young (E_{ref})	587100	kN/m^2
Λόγος Poisson (ν)	0.305	-
Συνοχή (c)	30	kN/m^2
Εσωτερική γωνία τριβής (φ)	5°, 10°, 20°, 30° & 40°	°
Γωνία Διασταλτικότητας (ψ)	0.1	°

Στην επιλογή της υδραυλικής συμπεριφοράς του υλικού χρησιμοποιήθηκε η επιλογή (Drained) για αποστραγγισμένες συνθήκες. Το ειδικό βάρος του υλικού όταν είναι κορεσμένο (εμποτισμένο) είναι το ίδιο και στην περίπτωση που είναι ακόρεστο. Αυτό συμβαίνει επειδή έχει αγνοηθεί το νερό σε όλες αναλύσεις με αποτέλεσμα να μηδενίζεται και η υδατοπερατότητά του για όλες τις περιπτώσεις. Ο υδροφόρος ορίζοντας δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψιν στο προσομοίωμα.

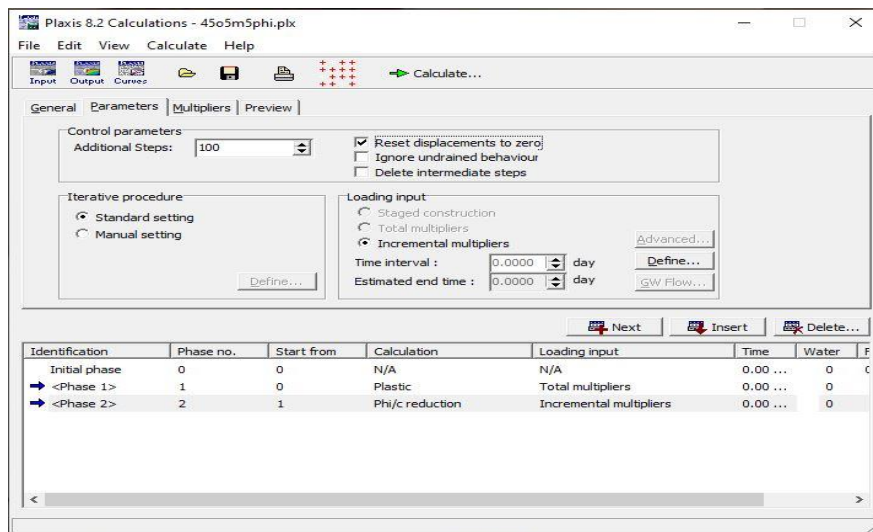
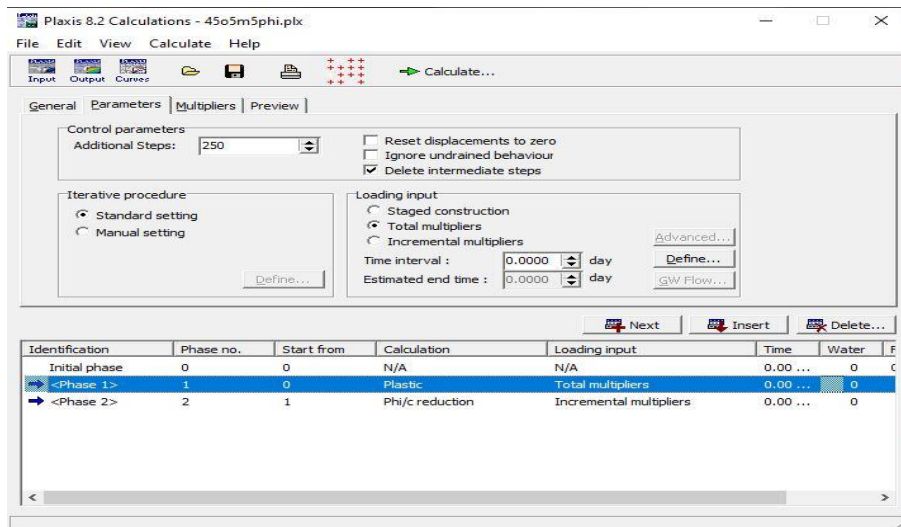
Στη συνέχεια στο προσομοίωμα που κατασκευάστηκε στο λογισμικό δημιουργήθηκε ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (Generate Mesh). Επιλέχθηκε η ρύθμιση Very fine, για πιο πυκνό δίκτυο ώστε να εξαχθούν πιο λεπτομερείς αναλύσεις.



Εικόνα 5.1 Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (δίκτυο σχεδιασμού προσομοιώματος)

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί στο λογισμικό. Έτσι στα πλαίσια του καθορισμού των τύπων των υπολογισμών και των τύπων των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν κατά την διάρκειά τους, ορίστηκαν δύο φάσεις υπολογισμών:

- Στην πρώτη φάση προσδιορίστηκαν οι παραμορφώσεις οι οποίες προκύπτουν από το ίδιο το βάρος του πρανούς. Στην καρτέλα των γενικών ρυθμίσεων επιλέχθηκε ο τύπος υπολογισμού (Calculation Type) Plastic. Άρα το μοντέλο θα συμπεριφερθεί ελαστοπλαστικά. Όσον αφορά το καθορισμό των παραμέτρων (Parameters) επιλέχθηκε η εντολή Delete Intermediate Steps, για την εξοικονόμηση χώρου στο σκληρό δίσκο από τα ενδιάμεσα βήματα. Για στατική φόρτιση στην καρτέλα Multiplierso πολλαπλασιαστής Σ - M_{accel} ισούται με 0, ενώ στην περίπτωση της ψευδοστατικής ανάλυσης ο Σ - M_{accel} ισούται με 1.
- Στη δεύτερη φάση προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Στην καρτέλα γενικών ρυθμίσεων επιλέχθηκε ο τύπος υπολογισμού (Calculation Type) Phi/c reduction. Η εντολή Phi/c reduction μειώνει σταδιακά τις παραμέτρους αντοχής του εδαφικού υλικού του πρανούς μέχρι αυτό να αστοχήσει ώστε να προσδιοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας του. Στην καρτέλα Parameters για την δεύτερη φάση υπολογισμού επιλέχθηκε η εντολή Reset displacements to zero, ώστε να μηδενιστούν οι παραμορφώσεις από την πρώτη φάση υπολογισμού κατά την οποία προσδιορίστηκαν οι παραμορφώσεις του πρανούς εξαιτίας του βάρους των εδαφικών υλικών του. Άρα οι αναλύσεις για την δεύτερη φάση υπολογισμού ξεκινούν από μια κατάσταση μηδενικών παραμορφώσεων. Η επιλογή Incremental Multipliers, επιλέγονταν αυτόματα, όταν ο τύπος υπολογισμού είχε θεωρηθεί η επιλογή Phi/c reduction.



Εικόνα 5.2 παράθυρο υποπρογράμματος υπολογισμού: α) τύπος υπολογισμού (plastic calculation), β) υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας (phi/c reduction)

5.2.2:Εξαγωγή αποτελεσμάτων και δημιουργία νέων εξισώσεων υπό στατικές συνθήκες

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκαν όλα εκείνα τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ύστερα από μοντελοποίηση των γεωμετρικών εδαφικών στρωμάτων και από την εισαγωγή διαφόρων παραμέτρων στην καρτέλα των ιδιοτήτων των υλικών.

Στο σύνολο προέκυψαν 480 παραμετρικές αναλύσεις, από τις οποίες οι 120 σχετίζονταν με στατικές φορτίσεις και οι 360 σχετίζονταν με ψευδοστατικές φορτίσεις. Σε όλες τις αναλύσεις η συνοχή ισούται με $c=30\text{kN/m}^2$ και το ειδικό βάρος του υλικού 18kN/m^3 .

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν οι στραγγισμένες συνθήκες (Drained). Στις αναλύσεις δεν ελήφθη υπόψιν ο υδροφόρος ορίζοντας στο προσομοίωμα του πρανούς.

Οι συντελεστές ασφαλείας (FS) για κάθε περίπτωση διαφορετικής γεωμετρίας του πρανούς και διαφορετικές παραμέτρους εδαφικών υλικών υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού Plaxis.

Παρακάτω θα δούμε τους συντελεστές ασφαλείας (FS από το Plaxis) για διαφορετικής γεωμετρίας πρανών και μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής τους. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις γωνίες κλίσης των πρανών (β°) ίσες με 15, 30, 45, 60, 75, 90 μοίρες και στους κατακόρυφους το ύψος πρανών (H) σε μέτρα και τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) να μεταβάλλονται. Για κάθε ένα συνδυασμό παρατηρούμε τη τιμή του συντελεστή ασφαλείας του. Με κόκκινες τιμές έχουν απεικονιστεί τα ασταθή ή οριακά ευσταθή πρανή.

<i>Parameters</i>				<i>FS (Plaxis)</i>					
γ	c	H	phi	15	30	45	60	75	90
18	30	5	5	2.75	2.32	2.03	1.76	1.31	0.93
18	30	10	5	1.67	1.33	1.12	0.95	0.76	0.48
18	30	20	5	1.10	0.79	0.65	0.53	0.41	0.28
18	30	40	5	0.77	0.52	0.41	0.32	0.26	0.17
18	30	5	10	3.36	2.66	2.24	1.92	1.42	1.03
18	30	10	10	2.21	1.62	1.30	1.09	0.87	0.55
18	30	20	10	1.55	1.03	0.81	0.65	0.50	0.35
18	30	40	10	1.20	0.73	0.55	0.43	0.33	0.22
18	30	5	20	4.48	3.29	2.64	2.22	1.63	1.13
18	30	10	20	3.20	2.15	1.64	1.34	1.05	0.69
18	30	20	20	2.42	1.46	1.11	0.86	0.65	0.44
18	30	40	20	2.01	1.14	0.81	0.62	0.46	0.30
18	30	5	30	5.60	3.92	3.06	2.56	1.87	1.31
18	30	10	30	4.20	2.69	1.99	1.57	1.21	0.77
18	30	20	30	3.37	1.93	1.40	1.05	0.79	0.50
18	30	40	30	2.88	1.57	1.11	0.81	0.58	0.37
18	30	5	40	6.94	4.62	3.51	2.91	2.12	1.54
18	30	10	40	5.41	3.32	2.39	1.82	1.41	0.95
18	30	20	40	4.44	2.46	1.74	1.27	0.96	0.59
18	30	40	40	3.92	2.09	1.42	0.99	0.70	0.40

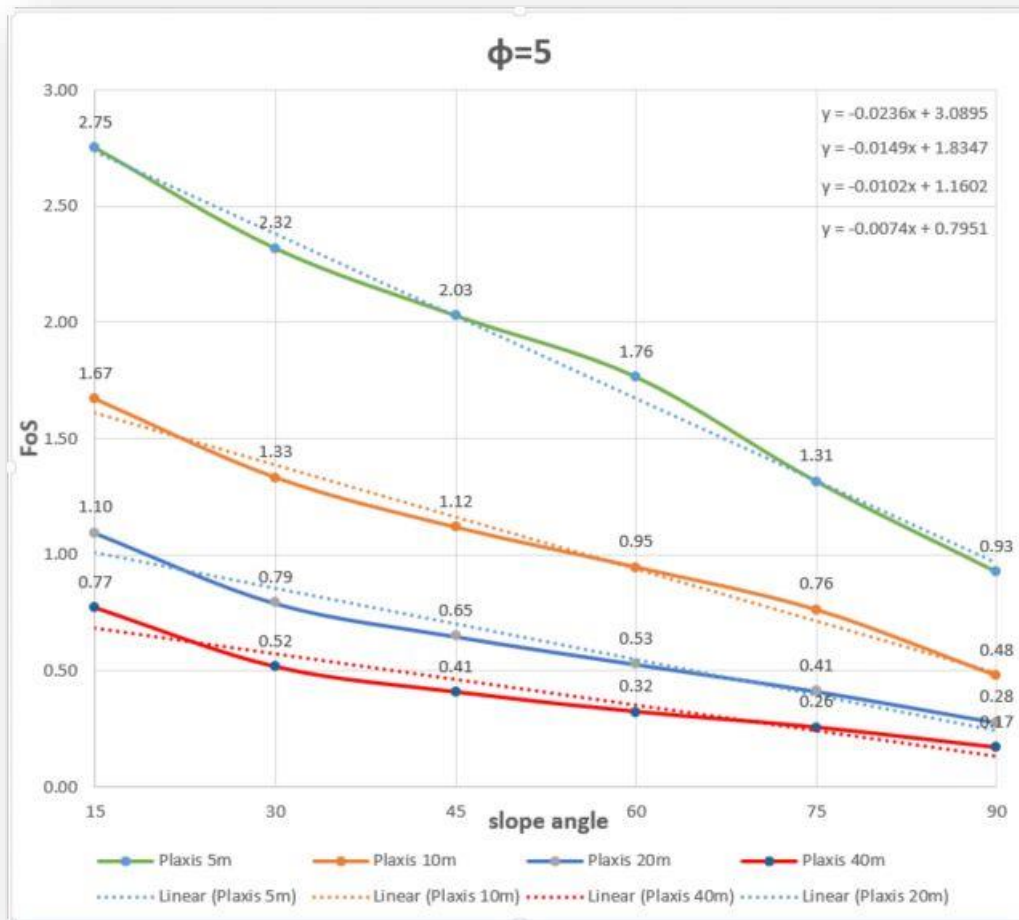
Πίνακας 5.2 Προσδιορισμός συντελεστή ασφαλείας (FS) υπό στατικές συνθήκες με το λογισμικό Plaxis

Διαβάζοντας τον πίνακα με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει μια πρώτη αξιολόγησή του καθώς οι τιμές έχουν μια κλιμακωτή μορφή και εύκολα θα μπορούσε να επανεξεταστεί μία τιμή που δεν ακολουθεί αυτή τη μείωση.

Έχοντας τις τιμές, το επόμενο βήμα και ο στόχος μας ήταν η δημιουργία εύχρηστων διαγραμμάτων και επειδή η λύση ενός τρισδιάστατου διαγράμματος δεν ήταν ρεαλιστική μείναμε στις δύο διατάσεις κρατώντας σταθερή μια παράμετρο κάθε φορά. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα έχοντας σταθερό πρώτα τις γωνίες (φ°) και μετά τα ύψη (H_m) για στατικές συνθήκες.

Επιπρόσθετα, προέκυψαν κάποιες εξισώσεις βάση τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων τόσο υπό στατικές συνθήκες. Με βάση τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις η σχέση η οποία συνδέει τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς (FS) με τη γωνία κλίσης του (β), για όλες τις περιπτώσεις, είναι ευθεία γραμμή της μορφής $y=ax+\beta$. Ο αριθμός a είναι η τιμή της κλίσης της ευθείας (αλλιώς η εφαπτόμενη της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία με τον άξονα x' και αριθμός β φανερώνει το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα y' . Οι εξισώσεις προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος του Excel.

Αυτά τα διαγράμματα κατασκευάστηκαν για κάθε μια περίπτωση σταθερής εσωτερικής γωνίας τριβής και παρατηρούμε τη μείωση του συντελεστή ασφαλείας όσο αυξάνεται το ύψος του πρανούς.



Εικόνα 5.3 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=5^\circ$

Βάση του συντελεστή ασφαλείας (FS) που εξάχθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(ϕ) σταθερό ίσο με 5°** :

Για ύψος πρανούς $H=5$ m

$$y = -0.0236\beta + 3.0895, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=10$ m

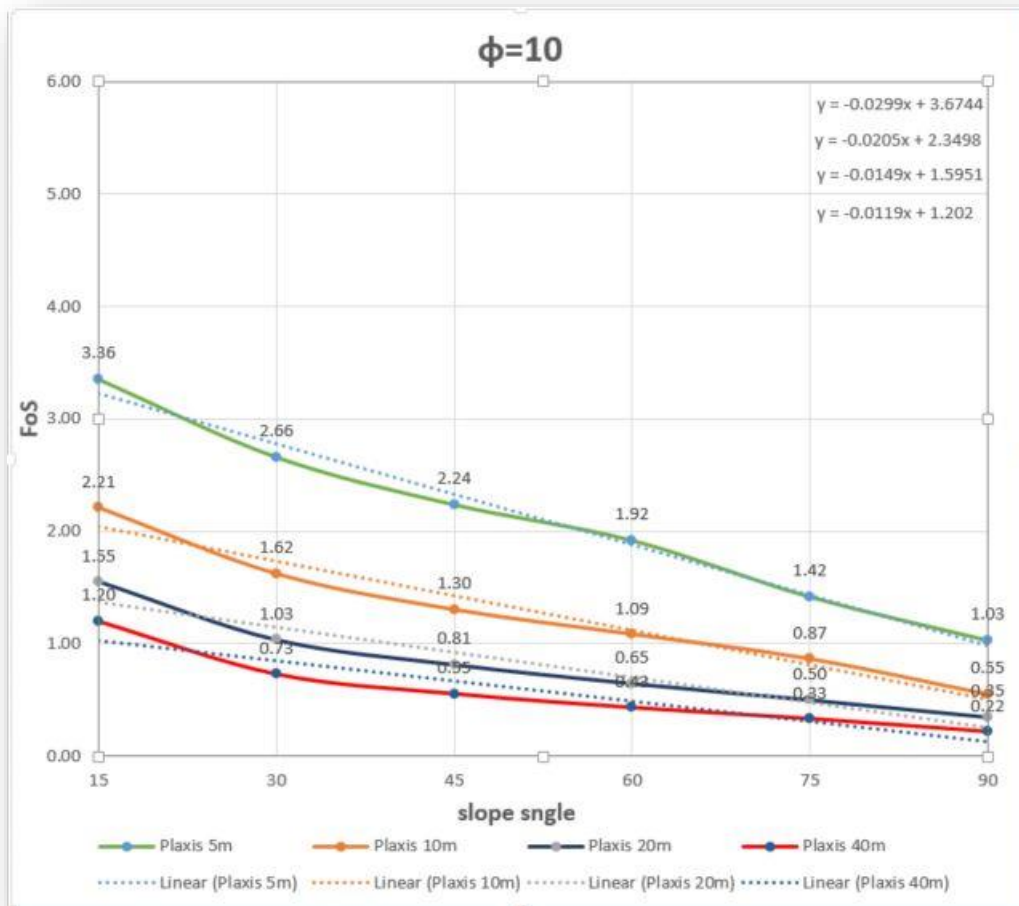
$$y = -0.0149\beta + 1.8347, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=20$ m

$$y = -0.0101\beta + 1.1728, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=40$ m

$$y = -0.0074\beta + 0.7951, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.4 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=10^\circ$

Βάση του συντελεστή ασφαλείας (FS) που εξάχθηκε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(ϕ) σταθερό ίσο με 10°** :

Για ύψος πρανούς $H=5$ m

$$y = -0.0299\beta + 3.6744, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=10$ m

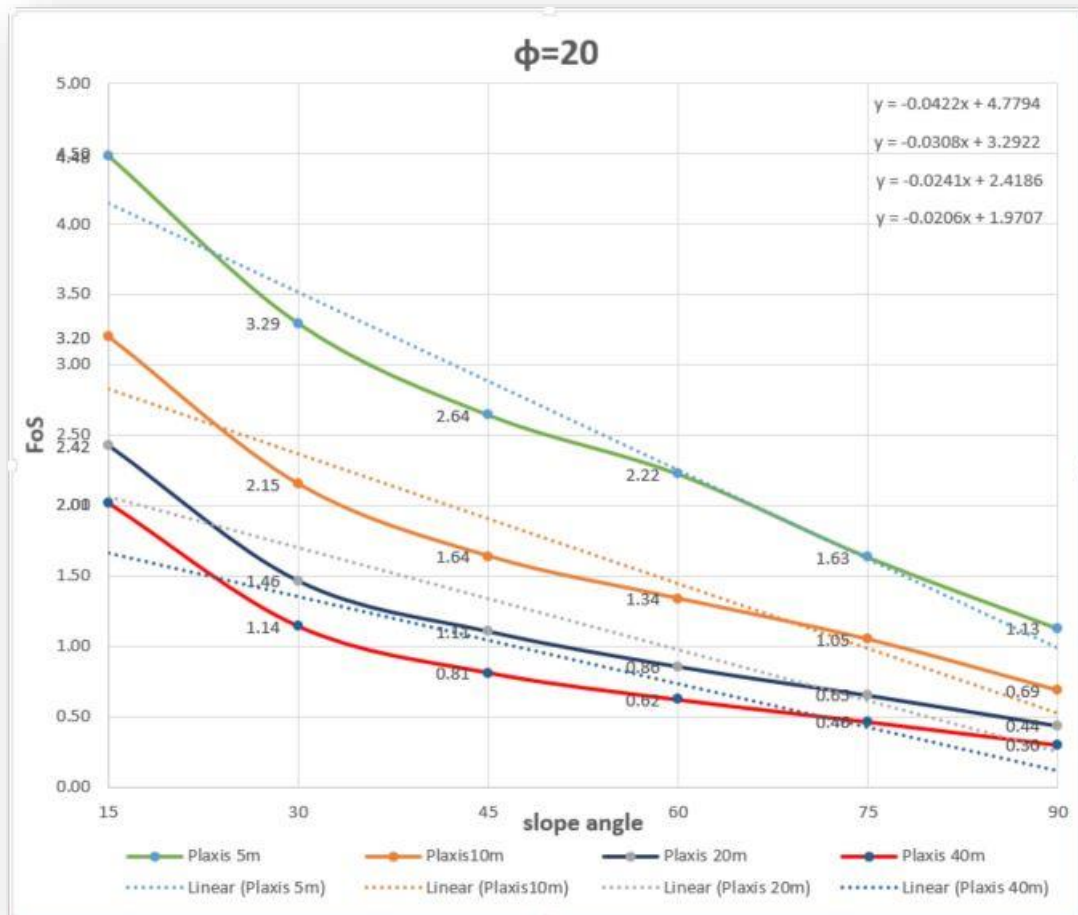
$$y = -0.0205\beta + 1.5951, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=20$ m

$$y = -0.0149\beta + 1.5951, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=40$ m

$$y = -0.0119\beta + 1.202, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.5 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$

Βάση του συντελεστή ασφαλείας (FS) που εξάχθηκε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(ϕ) σταθερό ίσο με 20°** :

Για ύψος πρανούς $H=5$ m

$$y = -0.0422\beta + 4.7794, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=10$ m

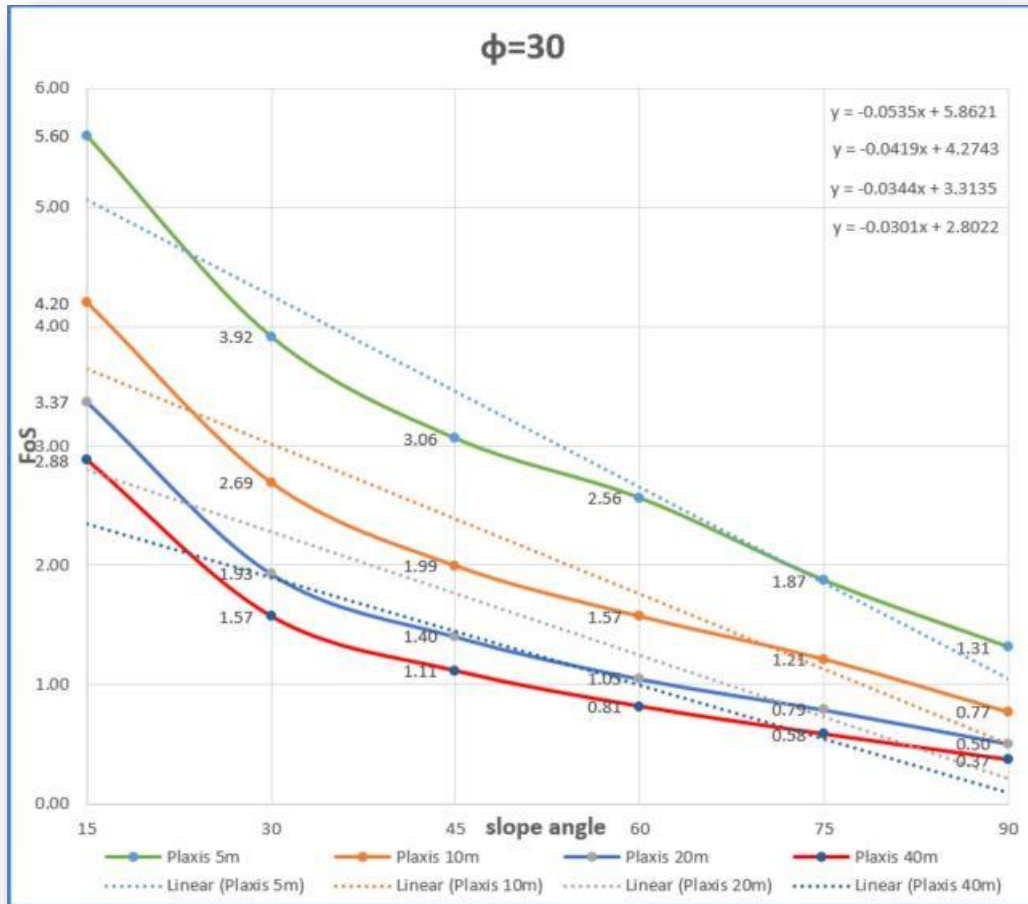
$$y = -0.0308\beta + 3.2922, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=20$ m

$$y = -0.02441\beta + 2.4186, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=40$ m

$$y = -0.0206\beta + 1.9707, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.6 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$

Βάση του συντελεστή ασφαλείας (FS) που εξάχθηκε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(φ) σταθερό ίσο με 30°**:

Για ύψος πρανούς $H=5\text{ m}$

$$y = -0.0535\beta + 5.8621, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=10\text{ m}$

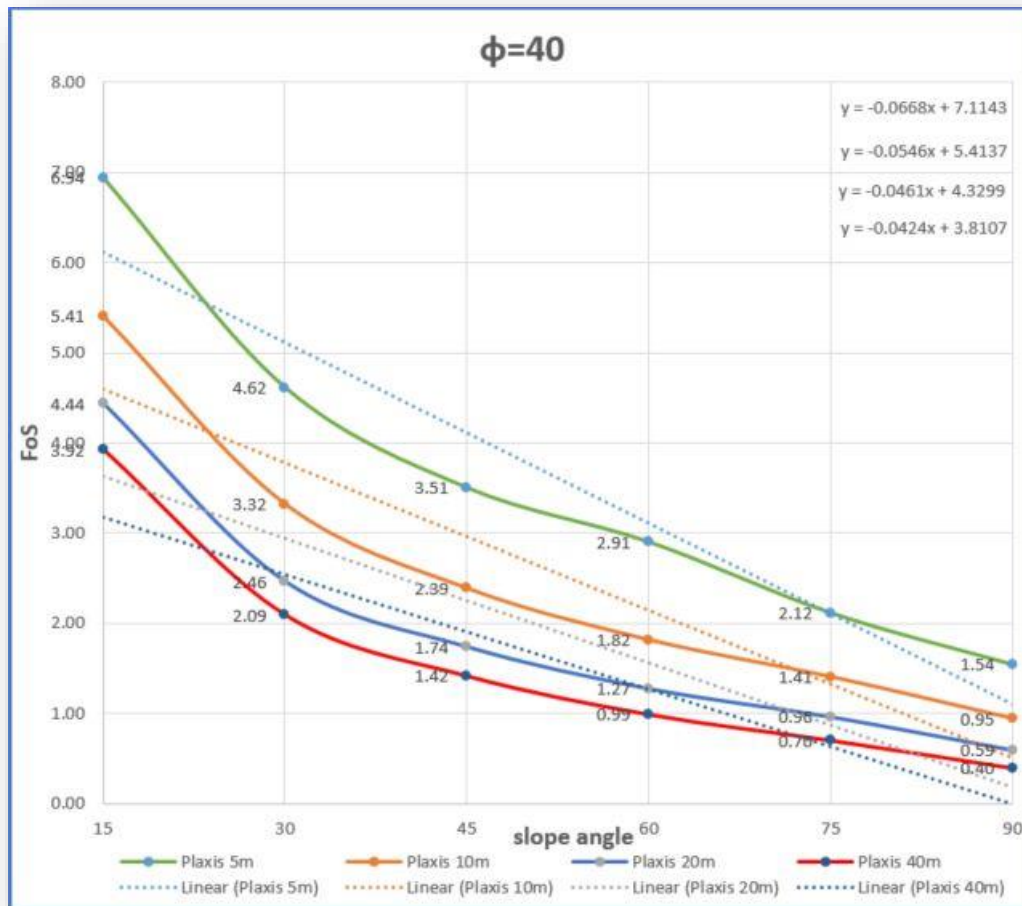
$$y = -0.0419\beta + 4.2743, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=20\text{ m}$

$$y = -0.0344\beta + 3.3155, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=40\text{ m}$

$$y = -0.0301\beta + 2.8022, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.7 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$

Με βάση το προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας (FS) με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(ϕ) σταθερό ίσο με 40°** :

Για ύψος πρανούς $H=5$ m

$$y = -0.0668\beta + 7.1143, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=10$ m

$$y = -0.0546\beta + 5.4137, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

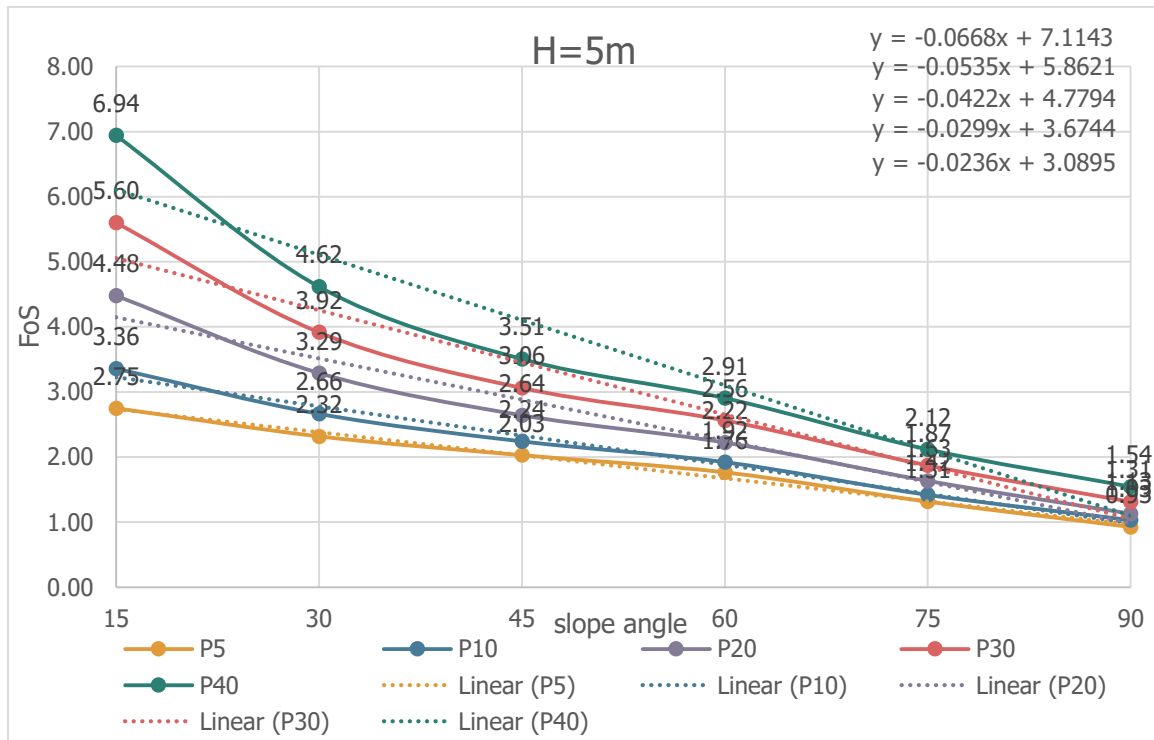
Για ύψος πρανούς $H=20$ m

$$y = -0.0461\beta + 4.3299, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $H=40$ m

$$y = -0.0424\beta + 3.8107, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Με τον ίδιο τρόπο δημιουργήθηκαν διαγράμματα κρατώντας σταθερό το ύψος, μεταβάλλοντας την εσωτερική γωνία τριβής ϕ° . Έχουμε πέντε περιπτώσεις διαφορετικής γωνίας (ϕ) άρα θα έχουμε και πέντε καμπύλες. Επιπρόσθετα στα διαγράμματα έγινε προσπάθεια γραμμικοποίησης των γραμμών μέσω εξισώσεων πρώτου βαθμού όπου εμφανίζονται στα διαγράμματα και αναπαριστούν ευθείες διακεκομμένες γραμμές.



Εικόνα 5.8 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με το λογισμικό του Plaxis για ύψος πρανούς $H=5m$

Βάση του συντελεστή ασφαλείας (FS) που εξαχθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Plaxis προέκυψαν οι εξής γραμμικές εξισώσεις για **(H) σταθερό ίσο με 5m:**

Για ύψος πρανούς $\phi=5^\circ$

$$y = -0.0236\beta + 3.0895, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=10^\circ$

$$y = -0.0299\beta + 3.6744, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=20^\circ$

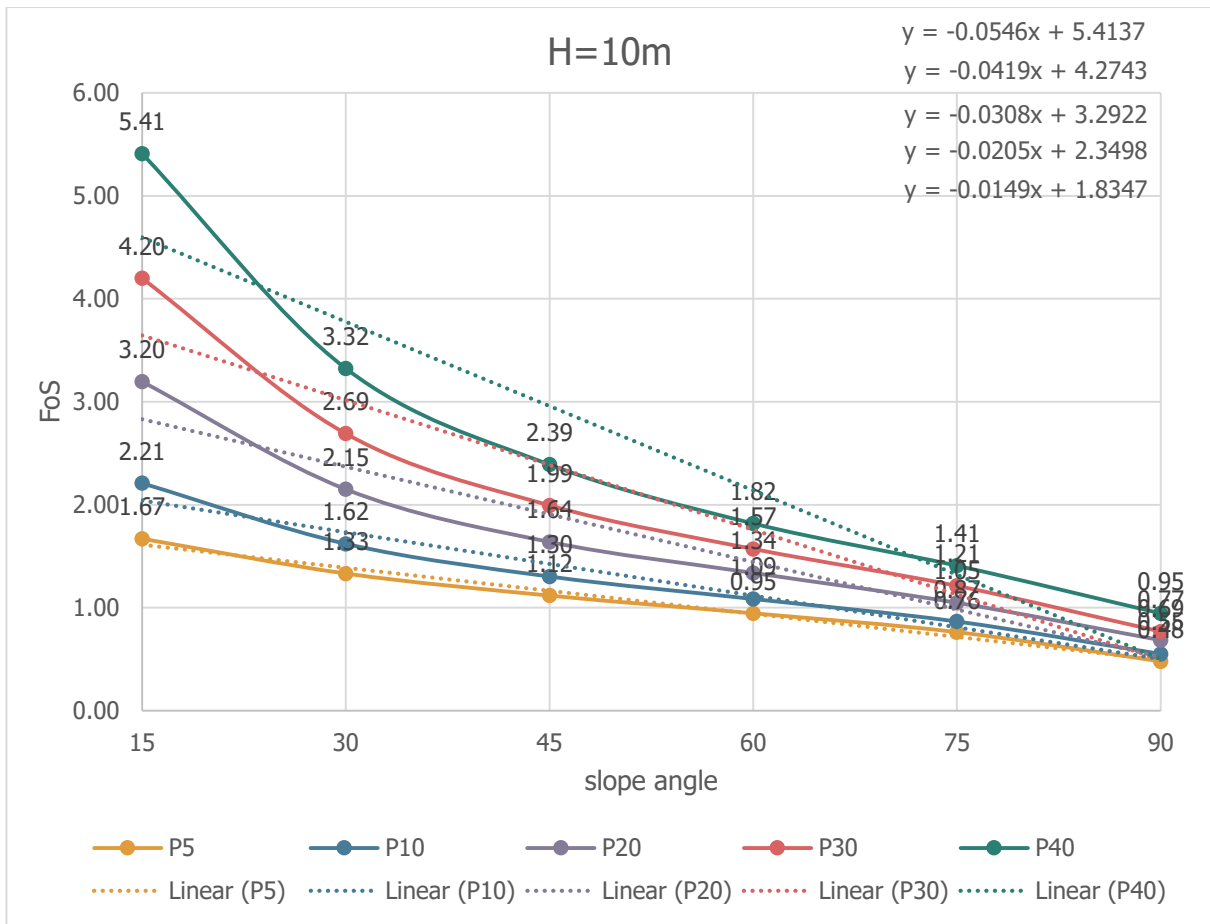
$$y = -0.0422\beta + 4.7794, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=30^\circ$

$$y = -0.0535\beta + 5.8621, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=40^\circ$

$$y = -0.0668\beta + 7.1143, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.9 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με το λογισμικό Plaxis για ύψος πρανούς H=10m

Για (H) σταθερό ίσο με 10m:

Για ύψος πρανούς $\phi=5^\circ$

$$y = -0.0149\beta + 1.8347, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=10^\circ$

$$y = -0.0205\beta + 1.5951, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=20^\circ$

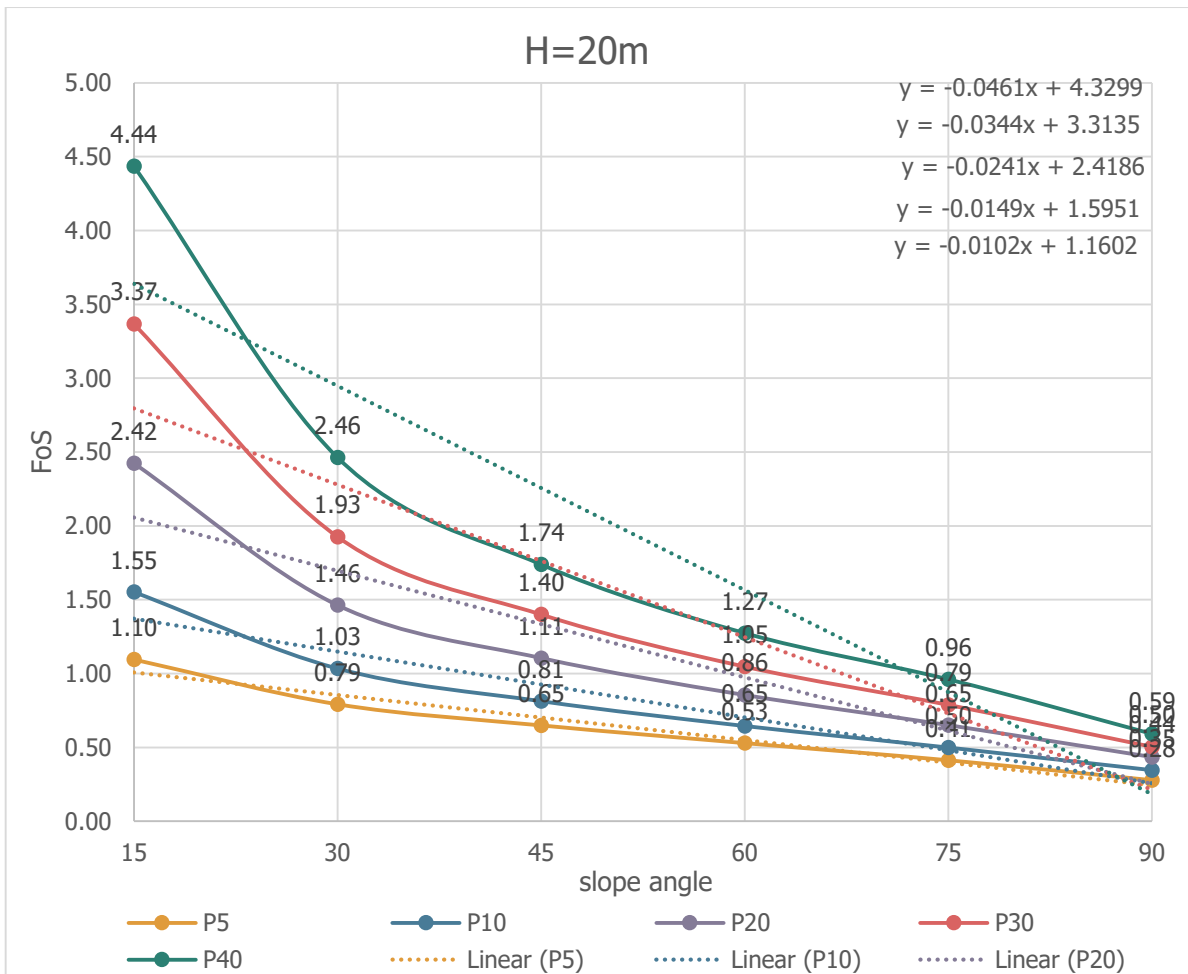
$$y = -0.0308\beta + 3.2922, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=30^\circ$

$$y = -0.0419\beta + 4.2743, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=40^\circ$

$$y = -0.0546\beta + 5.4137, \beta \text{ είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.10 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με το λογισμικό Plaxis για ύψος πρανούς H=20m

Για (H) σταθερό ίσο με 20m:

Για ύψος πρανούς $\phi=5^\circ$

$$y = -0.0101\beta + 1.1728, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=10^\circ$

$$y = -0.0149\beta + 1.5951, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=20^\circ$

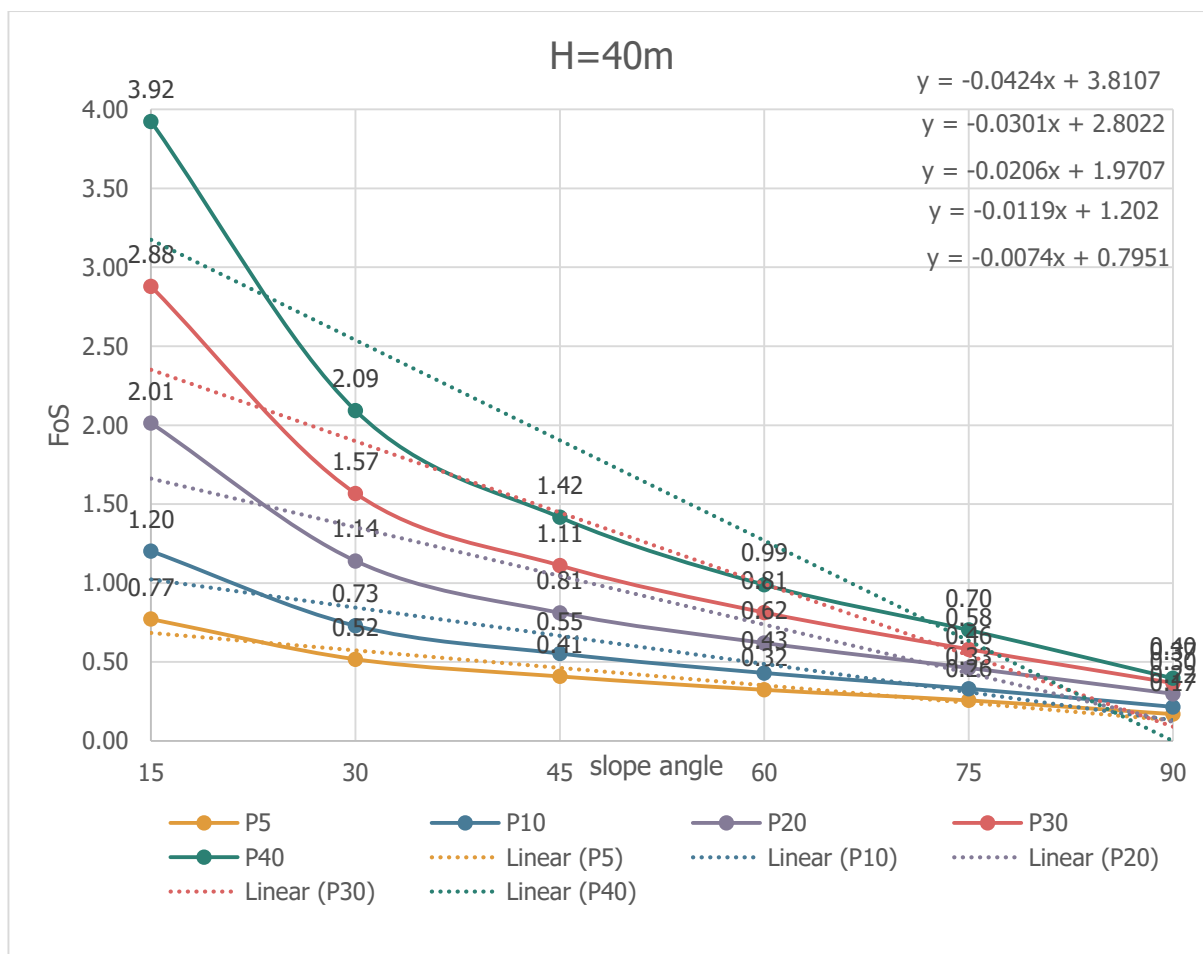
$$y = -0.02441\beta + 2.4186, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=30^\circ$

$$y = -0.0344\beta + 3.3135, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς $\phi=40^\circ$

$$y = -0.0461\beta + 4.3299, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$



Εικόνα 5.11 Συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με το λογισμικό Plaxis για ύψος πρανούς H=40m

Για **(H) σταθερό ίσο με 40m:**

Για ύψος πρανούς φ=5°

$$y = -0.0074\beta + 0.7951, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς φ=10°

$$y = -0.0119\beta + 1.202, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς φ=20°

$$y = -0.0206\beta + 1.9707, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς φ=30°

$$y = -0.0301\beta + 2.8022, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Για ύψος πρανούς φ=40°

$$y = -0.0424\beta + 3.8107, \beta = \text{είναι η γωνία κλίσης του πρανούς}$$

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ύψος ενός πρανούς τόσο πιο απότομη είναι η μείωση του συντελεστή ασφαλείας με την αύξηση της γωνίας κλίσης του (β). Και κατά συνέπεια τόσο πιο δύσκολη η αναπαράσταση τους με ευθεία γραμμή.

Αυτά τα διαγράμματα κατασκευάστηκαν για κάθε μια περίπτωση σταθερής εσωτερικής γωνίας τριβής και παρατηρούμε τη μείωση του συντελεστή ασφαλείας όσο αυξάνεται το ύψος του πρανούς.

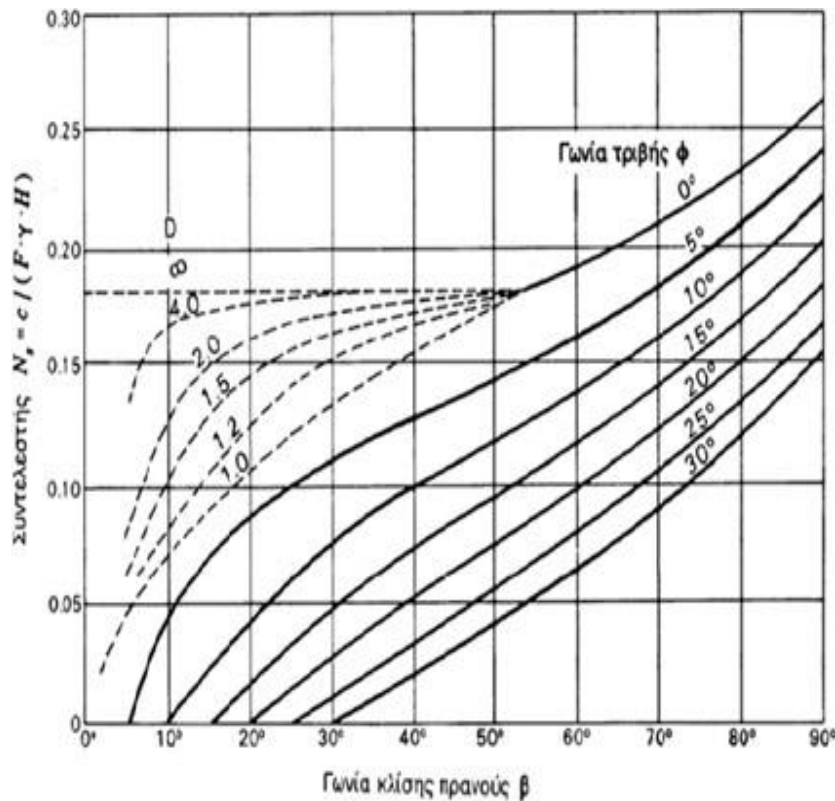
Με βάση τις γραφικές παραστάσεις η σχέση η οποία συνδέει τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς (FS) με την γωνία κλίσης του (β), για όλες τις περιπτώσεις, είναι ευθεία γραμμή της μορφής $y=ax+\beta$. Ο αριθμός a είναι η τιμή της κλίσης της ευθείας (αλλιώς η εφαιπόμενη της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία με τον άξονα x' και αριθμός β φανερώνει το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα y' . Οι εξισώσεις προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος του Excel.

5.3 Σύγκριση με τη μέθοδο Taylor

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν όλες εκείνες οι παραμετρικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας (FS), με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Plaxis. Τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας τα οποία προέκυψαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή ασφαλείας οι οποίες προκύπτουν από το διάγραμμα Taylor, μέσω του συντελεστή ευστάθειας (N_s), που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Η χρήση του διαγράμματος Taylor γίνεται με τον εξής τρόπο έχοντας σαν δεδομένα τη συνοχή (c), το ειδικό βάρος (γ) και τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) ομοιογενή υλικού και τη γωνία κλίσης (β) και ύψος (H) του πρανούς.

Αρχικά βρίσκουμε στον άξονα των x' τη γωνία κλίσης (β). Ύστερα ανεβαίνουμε κατακόρυφα μέχρι να συναντήσουμε τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) του υλικού, και τέλος από το σημείο τομής και μετακινούμενοι αριστερά, διαβάζουμε τον αριθμό ευστάθειας (N_s). Έχοντας βρει το (N_s) με αντικατάσταση στον τύπο φθάνουμε στο ζητούμενο που είναι ο συντελεστής ασφαλείας (FS) για το δεδομένο πρανός.



Εικόνα 5.12 Καμπύλες Taylor

(Πηγή: Καβαδάς, 2005)

Αριθμός Ευστάθειας (Ns)

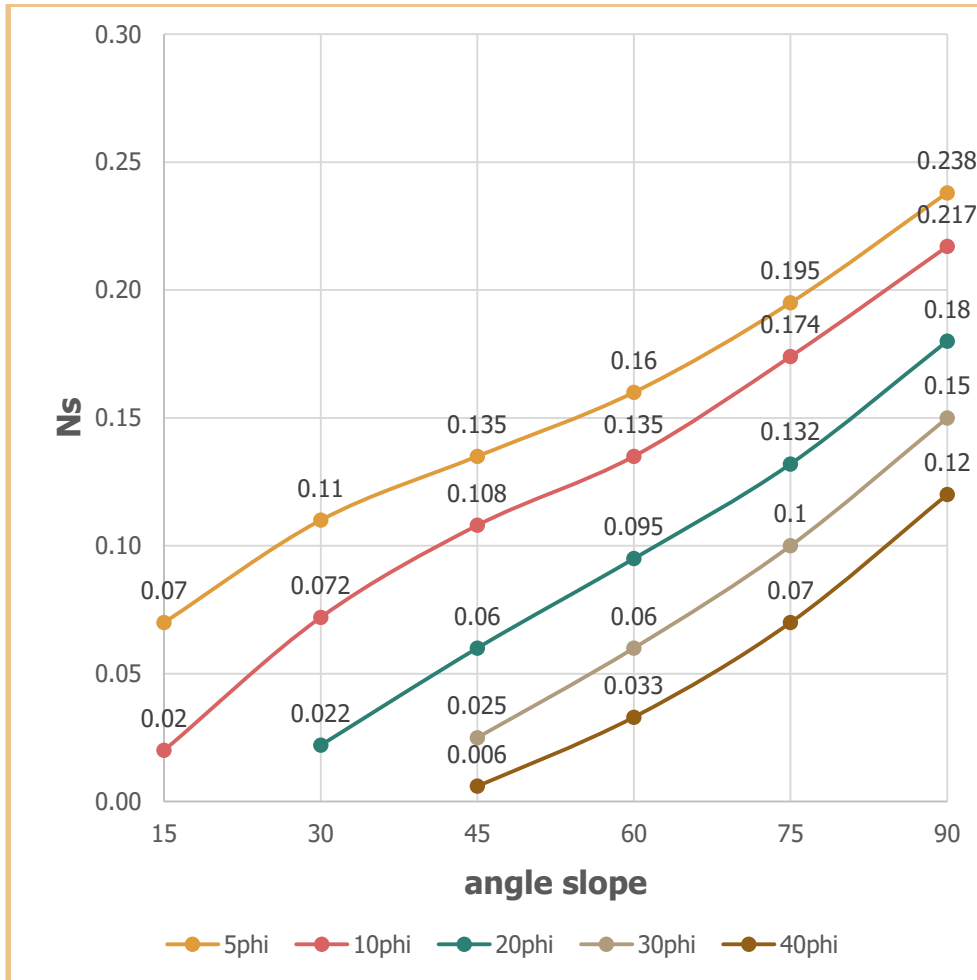
Οι αναλύσεις ευστάθειας ακανόνιστων πλαγιών ή ανομοιογενών εδαφών απαιτούν συνθέτους υπολογισμούς που πλέον επιλύονται υπολογιστικά. Ωστόσο διαγράμματα για ομογενή πρανή με καθορισμένη τη γωνία κλίσης τους χρησιμοποιούνται πολύ για μία πρώτη αξιολόγηση της ευστάθειας και είναι ένα βολικό εργαλείο για μια πρώτη εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας. Ένα πρώιμο παράδειγμα τέτοιων διαγραμμάτων παρουσιάστηκε από τον Taylor το 1937. Ο Taylor χρησιμοποίησε τη μέθοδο κύκλου τριβής και για να παρουσιάζει τα αποτελέσματα του αδιάστατα εισήγαγε έναν αριθμό ευστάθειας που ορίζεται ως :

$$N_s = \frac{c}{F \gamma H}$$

Όπου γ : το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού και H : το ύψος του πρανούς.

Για $FS=1$, ο αριθμός ευστάθειας αναπαριστά έναν συνδυασμό c , γ , H , ο οποίος καθιστά το πρανές να βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας για δεδομένη γωνία κλίσης β και γωνία εσωτερικής τριβής ϕ .

Βάση του διαγράμματος Taylor βρήκαμε τους αριθμούς ευστάθειας (N_s) για τις περιπτώσεις (β) και (ϕ) όπου αναλύονται στην εργασία κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα όμοιο του Taylor.



Εικόνα 5.13 Τροποποιημένο διάγραμμα Taylor

Οι τιμές του διαγράμματος φαίνονται αναλυτικά στον κάτω πίνακα.

Πίνακας 5.3 Αριθμός ευστάθειας (Ns) σύμφωνα με Taylor

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$\varphi = 5^\circ$	0.07	0.11	0.14	0.16	0.20	0.24
$\varphi = 10^\circ$	0.02	0.07	0.11	0.14	0.17	0.22
$\varphi = 20^\circ$	-	0.02	0.06	0.1	0.13	0.18
$\varphi = 30^\circ$	-	-	0.03	0.06	0.1	0.15
$\varphi = 40^\circ$	-	-	0.01	0.03	0.07	0.12

5.3.1 Υπολογισμός νέων αριθμών ευστάθειας

Επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε τον αριθμό ασφαλείας που αναλόγως θα έχει κάθε υπολογισμένος συντελεστής ασφαλείας από το Plaxis και του συντελεστής ασφαλείας που αποδίδει το διάγραμμα Taylor με βάση τους αριθμούς ευστάθειας του πάνω πίνακα.

Μέσω της εφαρμογής της εξίσωσης Taylor για την κάθε περίπτωση υπολογίστηκε ένας δεδομένος αριθμός ευστάθειας (N_s), από τον δεδομένο συντελεστή ασφαλείας ο οποίος είχε υπολογιστεί αμέσως πιο πριν. Ο νέος συντελεστής ευστάθειας (N_s) που προέκυψε μέσω του λογισμικού συγκρίνονταν με τον συντελεστή ευστάθειας με βάση το διάγραμμα κατά Taylor, διατηρώντας την ίδια γωνία κλίσης του πρανούς (β), το ύψος του (H) και την γωνία τριβής (φ). Αυτή η σύγκριση γινόταν μόνο έναντι στατικών φορτίσεων, λόγω του ότι οι καμπύλες Taylor προσδιορίζουν του συντελεστής ευστάθειας και μέσω αυτών τους συντελεστής ασφαλείας μόνο για υπό στατικές συνθήκες. Σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν αγνοήθηκε η ύπαρξη του νερού.

Από κάτω θα δούμε αριστερά τον πίνακα αριθμών ευστάθειας που υπολογίσαμε βάση των συντελεστών ασφαλείας από το Plaxis και δεξιά από το διάγραμμα Taylor.

Στις οριζόντιες τιμές μεταβάλλεται το ύψος πρανούς και μεταξύ των χρωματισμένων διαστημάτων και η γωνία εσωτερικής τριβής (φ).

<i>Ns (new)</i>						<i>Ns (Taylor)</i>					
15	30	45	60	75	90	15	30	45	60	75	90
0.121	0.144	0.164	0.189	0.254	0.360	0.07	0.11	0.135	0.16	0.195	0.238
0.100	0.125	0.149	0.176	0.218	0.348	0.07	0.11	0.135	0.16	0.195	0.238
0.076	0.105	0.128	0.158	0.202	0.300	0.07	0.11	0.135	0.16	0.195	0.238
0.054	0.081	0.102	0.129	0.163	0.247	0.07	0.11	0.135	0.16	0.195	0.238
0.099	0.125	0.149	0.174	0.235	0.324	0.02	0.072	0.108	0.135	0.174	0.217
0.075	0.103	0.128	0.154	0.192	0.302	0.02	0.072	0.108	0.135	0.174	0.217
0.054	0.081	0.103	0.129	0.167	0.241	0.02	0.072	0.108	0.135	0.174	0.217
0.035	0.057	0.075	0.097	0.126	0.194	0.02	0.072	0.108	0.135	0.174	0.217
0.074	0.101	0.126	0.150	0.204	0.296		0.022	0.06	0.095	0.132	0.18
0.052	0.078	0.102	0.125	0.159	0.243		0.022	0.06	0.095	0.132	0.18
0.034	0.057	0.075	0.097	0.128	0.192		0.022	0.06	0.095	0.132	0.18
0.021	0.037	0.051	0.067	0.090	0.140		0.022	0.06	0.095	0.132	0.18
0.060	0.085	0.109	0.130	0.178	0.254			0.025	0.06	0.1	0.15
0.040	0.062	0.084	0.106	0.138	0.217			0.025	0.06	0.1	0.15
0.025	0.043	0.060	0.080	0.106	0.165			0.025	0.06	0.1	0.15
0.014	0.027	0.038	0.051	0.072	0.114			0.025	0.06	0.1	0.15
0.048	0.072	0.095	0.115	0.157	0.216			0.006	0.033	0.07	0.12
0.031	0.050	0.070	0.092	0.118	0.176			0.006	0.033	0.07	0.12
0.019	0.034	0.048	0.065	0.087	0.141			0.006	0.033	0.07	0.12
0.011	0.020	0.029	0.042	0.059	0.105			0.006	0.033	0.07	0.12

Πίνακας 5.4 Προσδιορισμός του συντελεστή ευστάθειας υπό στατικές συνθήκες με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis

Από τη πρώτη ματιά φαίνεται η απλότητα των αριθμών Taylor.

Επίσης, παρατηρώντας τον αριστερό πίνακα θα ήταν εύκολα διακριτό ένα χονδροειδές λάθος, καθώς όσο αυξάνεται το ύψος του πρανούς ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται και αναλόγως, επειδή στην εξίσωση δεν αλλάζουμε άλλες μεταβλητές, και ο αριθμός ευστάθειας θα μειώνεται.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα του διαγράμματος Taylor όμως είναι, πως για τις ανάγκες δημιουργίας του δυσδιάστατου διαγράμματος δεν είχε τη δυνατότητα να έχει άλλους αριθμούς ευστάθειας για κάθε αλλαγή του ύψους του πρανούς. Με άλλα λόγια ο αριθμός ασφαλείας στο διάγραμμα Taylor μεταβάλλεται μόνο όταν αλλάζει η γωνία κλίσης ή η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) του υλικού.

Επιπλέον αυτός είναι ο λόγος που δεν είναι δυνατό να κατασκευάσουμε ένα γράφημα της ίδιας λογικής με του Taylor και για αυτό αναζητήσαμε άλλους τρόπους.

Παρακάτω θα δούμε οπτικά σε μορφή πινάκων τη σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα Plaxis και από το διάγραμμα Taylor.

Οι κόκκινες τιμές είναι κάτω της μονάδας.

<i>FoS (plaxis)</i>						<i>FoS(Διάγραμμα Taylor)</i>					
15	30	45	60	75	90	15	30	45	60	75	90
2.75	2.32	2.03	1.76	1.31	0.93	5.29	3.03	2.46	2.08	1.75	1.40
1.67	1.33	1.12	0.95	0.76	0.48	2.38	1.52	1.23	1.04	0.85	0.70
1.10	0.79	0.65	0.53	0.41	0.28	1.19	0.76	0.62	0.52	0.43	0.35
0.77	0.52	0.41	0.32	0.26	0.17	0.60	0.38	0.31	0.26	0.21	0.18
3.36	2.66	2.24	1.92	1.42	1.03	16.67	4.63	3.09	2.47	1.92	1.54
2.21	1.62	1.30	1.09	0.87	0.55	8.33	2.31	1.54	1.23	0.96	0.77
1.55	1.03	0.81	0.65	0.50	0.35	4.17	1.16	0.77	0.62	0.48	0.38
1.20	0.73	0.55	0.43	0.33	0.22	2.08	0.58	0.39	0.31	0.24	0.19
4.48	3.29	2.64	2.22	1.63	1.13	#DIV/0!	15.15	5.56	3.51	2.53	1.85
3.20	2.15	1.64	1.34	1.05	0.69	#DIV/0!	7.58	2.78	1.75	1.26	0.93
2.42	1.46	1.11	0.86	0.65	0.44	#DIV/0!	3.79	1.39	0.88	0.63	0.46
2.01	1.14	0.81	0.62	0.46	0.30	#DIV/0!	1.89	0.69	0.44	0.32	0.23
5.60	3.92	3.06	2.56	1.87	1.31	#DIV/0!	#DIV/0!	13.33	5.56	3.33	2.22
4.20	2.69	1.99	1.57	1.21	0.77	#DIV/0!	#DIV/0!	6.67	2.78	1.67	1.11
3.37	1.93	1.40	1.05	0.79	0.50	#DIV/0!	#DIV/0!	3.33	1.39	0.83	0.56
2.88	1.57	1.11	0.81	0.58	0.37	#DIV/0!	#DIV/0!	1.67	0.69	0.42	0.28
6.94	4.62	3.51	2.91	2.12	1.54	#DIV/0!	#DIV/0!	55.56	10.10	4.76	2.78
5.41	3.32	2.39	1.82	1.41	0.95	#DIV/0!	#DIV/0!	27.78	5.05	2.38	1.39
4.44	2.46	1.74	1.27	0.96	0.59	#DIV/0!	#DIV/0!	13.89	2.53	1.19	0.69
3.92	2.09	1.42	0.99	0.70	0.40	#DIV/0!	#DIV/0!	6.94	1.26	0.60	0.35

Πίνακας 5.5 Προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες με τη μέθοδο Taylor και του λογισμικού Plaxis

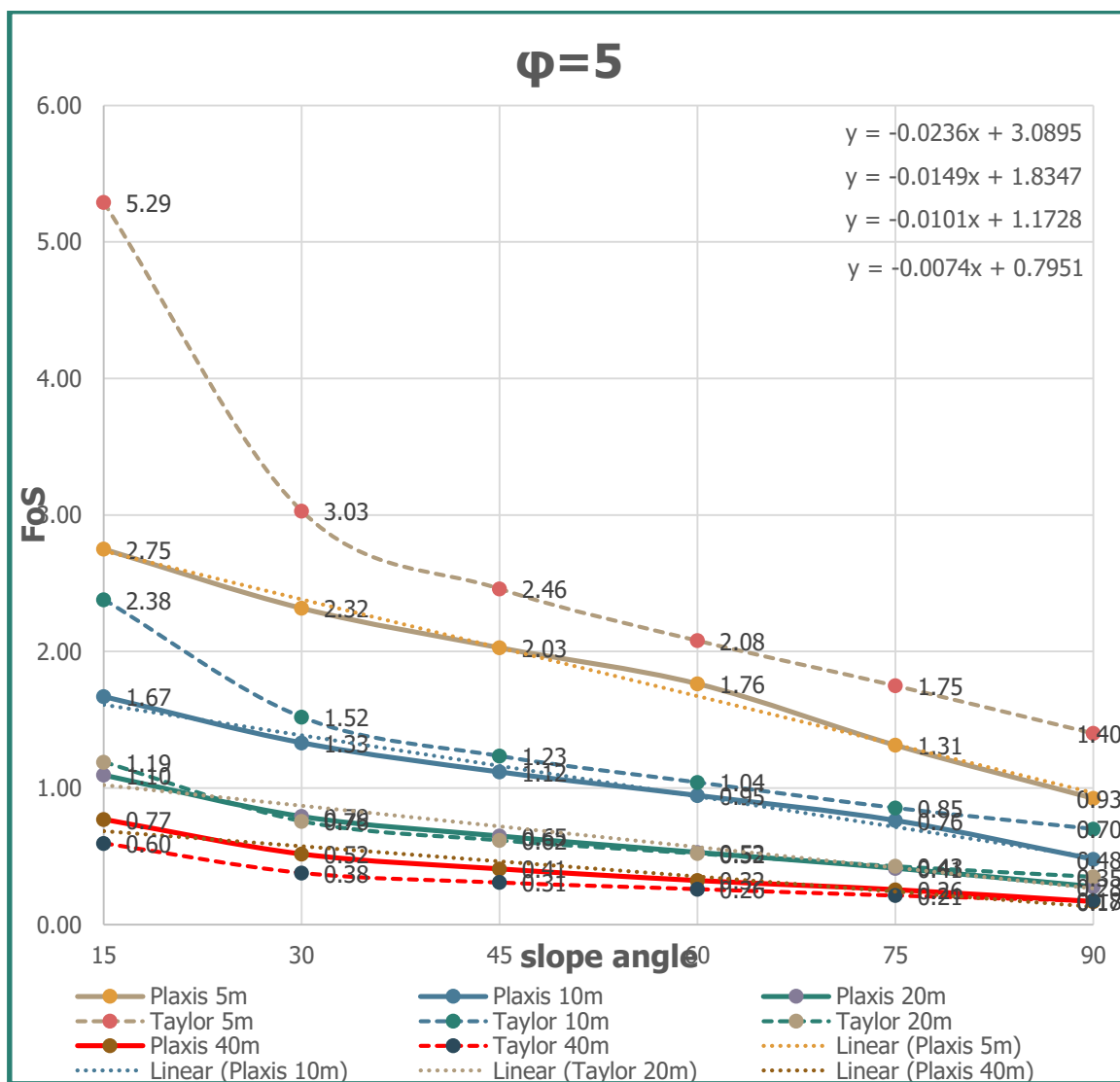
Εξ' αρχής παρατηρείται πως το διάγραμμα Taylor δίνει γενικά υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας.

Με μια καλύτερη ματιά όμως παρατηρούμε αρκετά ακριβής τιμές για οριακές καταστάσεις αστοχίας και αστάθειας δηλαδή τιμών μικρότερων της μονάδας.

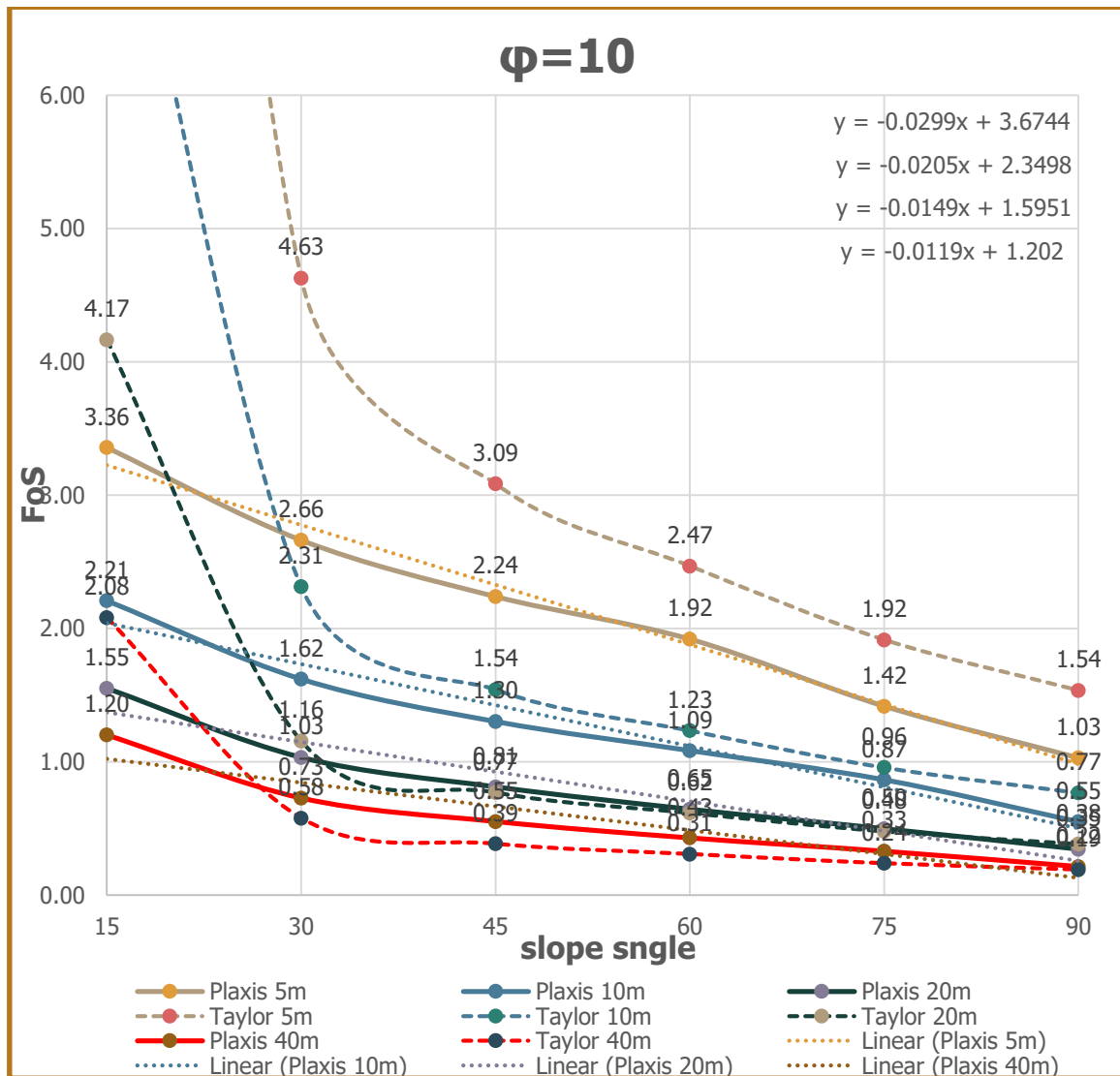
Παρακάτω παρατίθεται και η σύγκριση μέσω γραφημάτων.

Οι συνεχείς γραμμές είναι σχεδιασμένες βάση των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις στο πρόγραμμα Plaxis και οι διακεκομμένες από το διάγραμμα Taylor.

Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε τη διαφορά τους ειδικά στις μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής φ.



Εικόνα 5.14

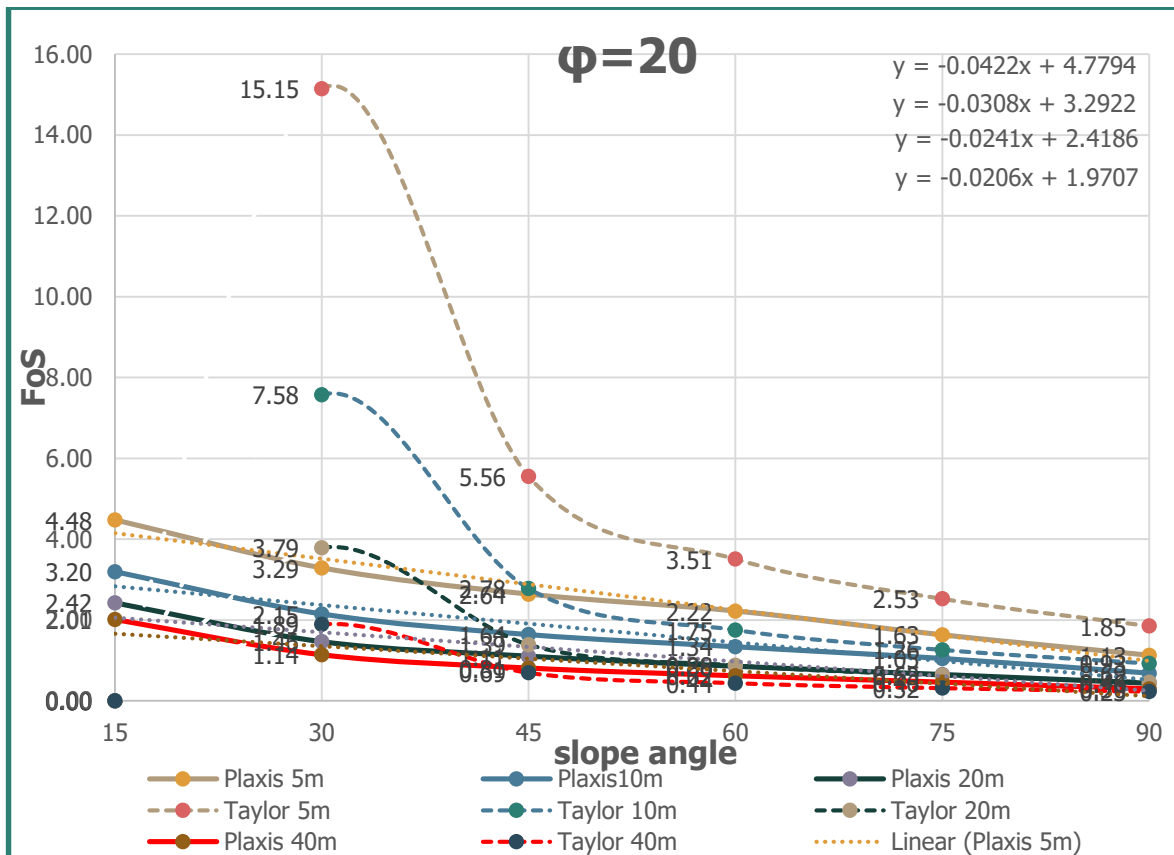


Εικόνα 5.15

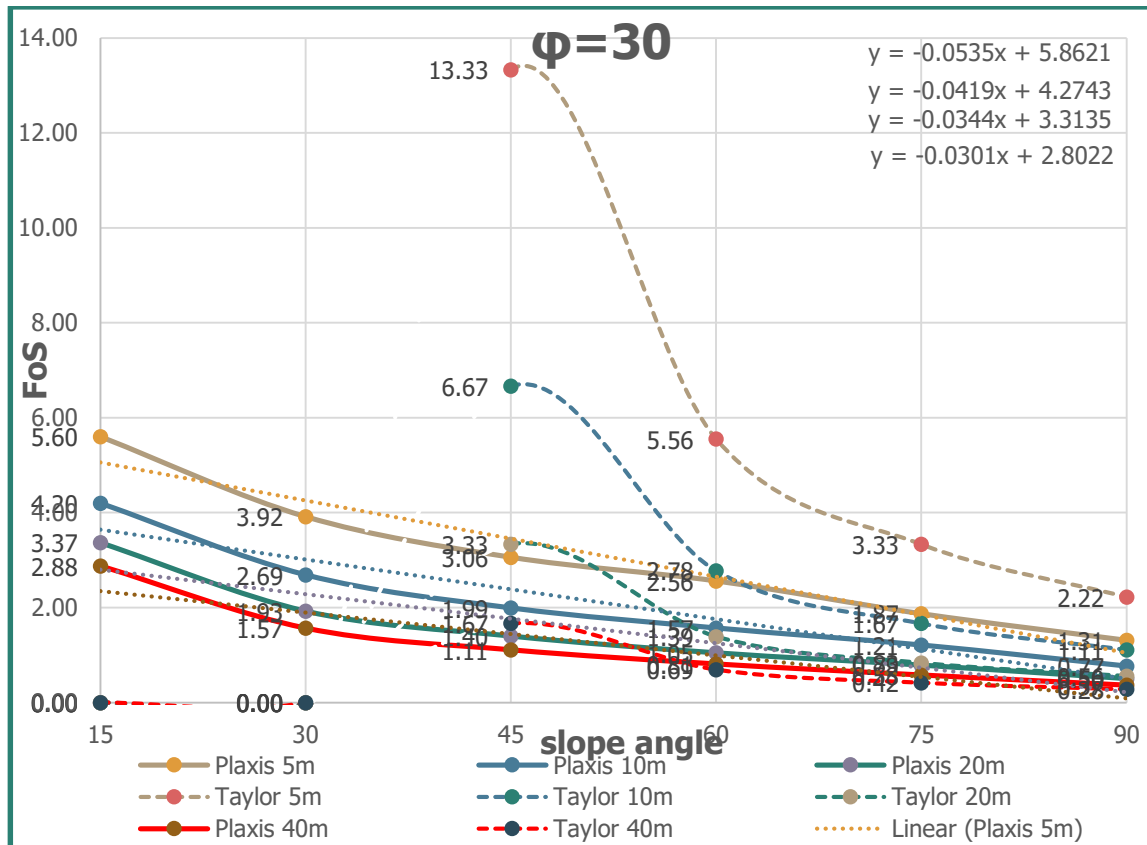
Παρατηρούμε ότι για τους συντελεστές ίσους με τη μονάδα έχουμε ταύτιση.

Κάτω της μονάδας το διάγραμμα Taylor βγάζει ελάχιστα μικρότερους συντελεστές.

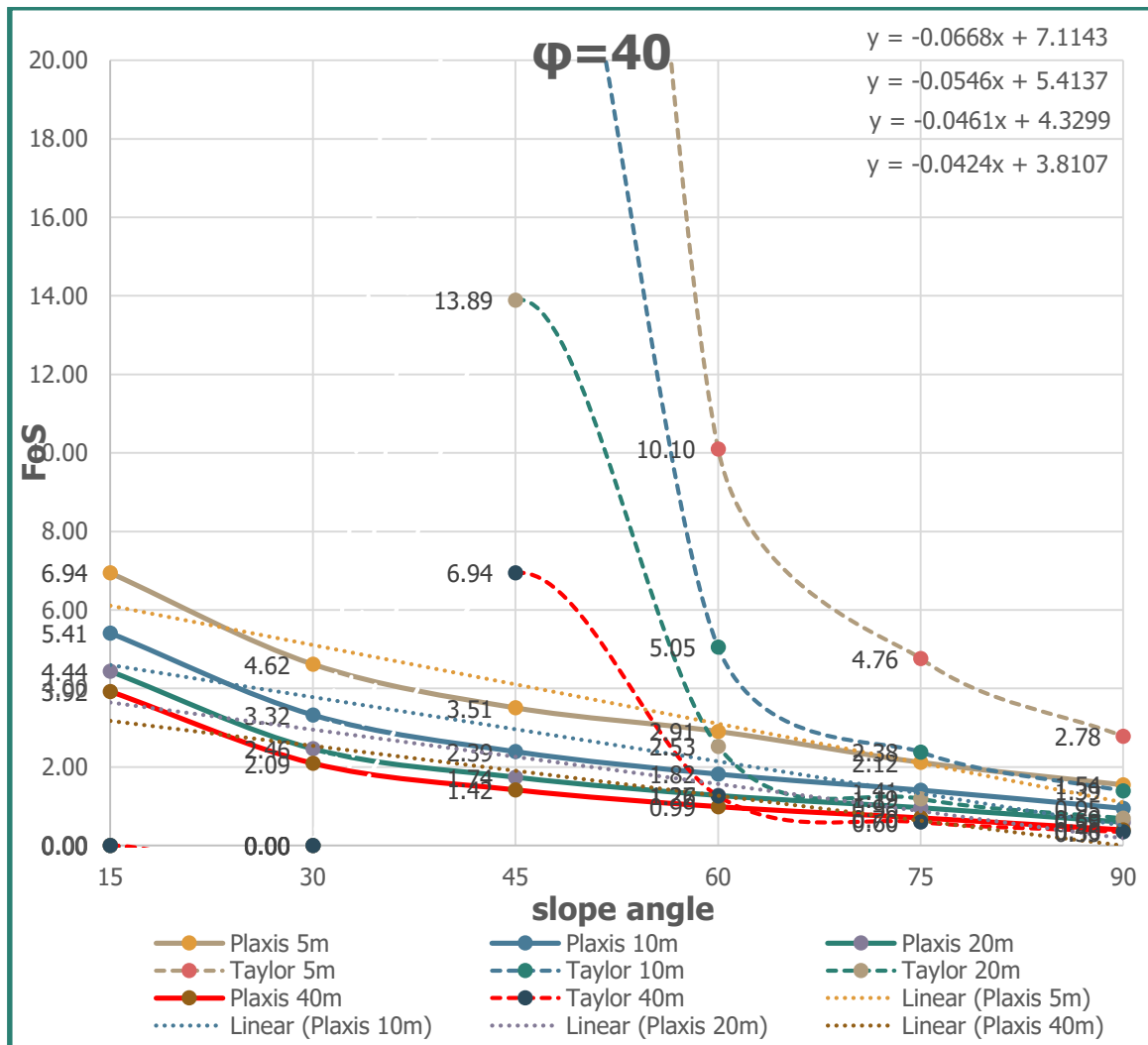
Και όσο αυξάνονται οι συντελεστές τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, αλλά όχι μόνο υπάρχει διαφορά αλλά και έλλειψη αποτελεσμάτων διότι το διάγραμμα δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 5.16



Εικόνα 5.17



Εικόνα 5.18

Παρατηρούμε ότι για τους συντελεστές ίσους με τη μονάδα έχουμε ταύτιση.

Κάτω της μονάδας το διάγραμμα Taylor βγάζει ελάχιστα μικρότερους συντελεστές.

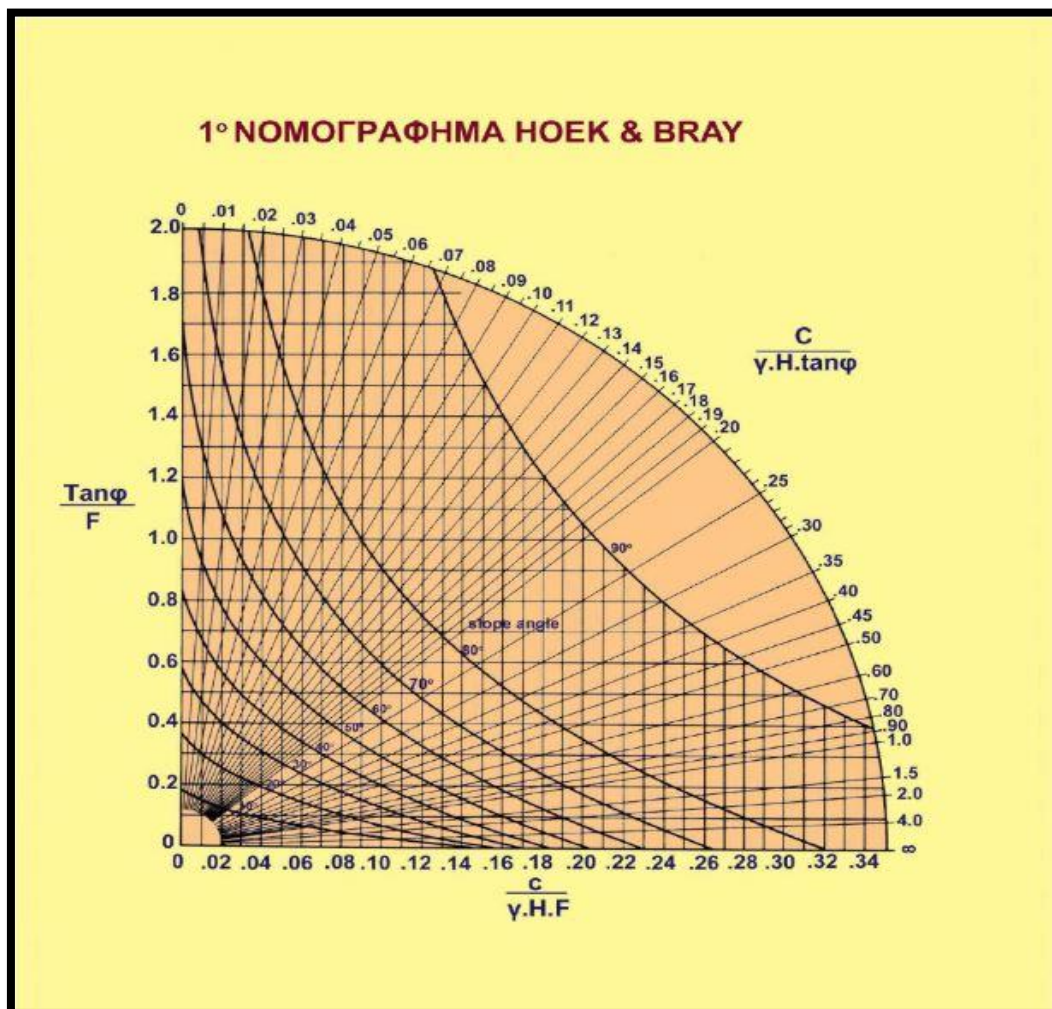
Και όσο αυξάνονται οι συντελεστές τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, αλλά όχι μόνο υπάρχει διαφορά αλλά και έλλειψη αποτελεσμάτων διότι το διάγραμμα δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις.

5.4 Σύγκριση νέων διαγραμμάτων με διαγράμματα Hoek & Bray (1977)

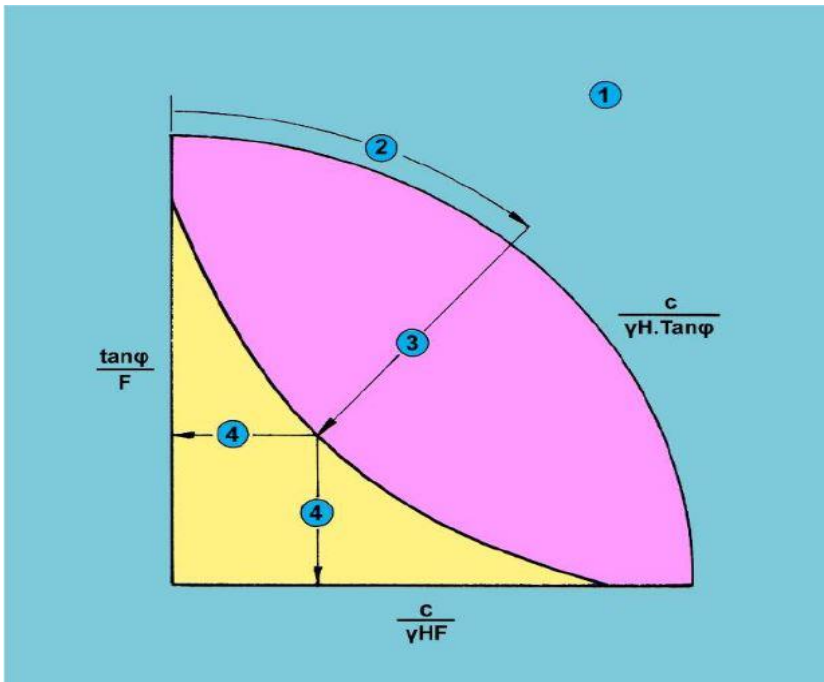
Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε η σύγκριση του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες με το διάγραμμα Hoek & Bray (1977).

Το διάγραμμα χρησιμοποιεί τρεις ποσότητες:

- Τον αριθμός ευστάθειας $N_s = \frac{c}{\gamma H F}$
- Την ποσότητα $\frac{\tan \phi}{F}$
- Την ποσότητα $\frac{c}{\gamma H \tan \phi}$



Εικόνα 5.19 Νομογράφημα περιστροφικής ολίσθησης Hoek & Bray(1977)



Αρχικά υπολογίζουμε τη ποσότητα $\frac{c}{\gamma H \tan \phi'}$ μετά εντοπίζεται πάνω στο τεταρτοκύκλιο και κατεβαίνουμε μέχρι να εντοπίσουμε τη γραμμή γωνίας κλίσης του πρανού μας. Τέλος μπορούμε να επιλέξουμε όποιον από τους δύο άξονες επιθυμούμε για να υπολογίσουμε το συντελεστή ασφαλείας.

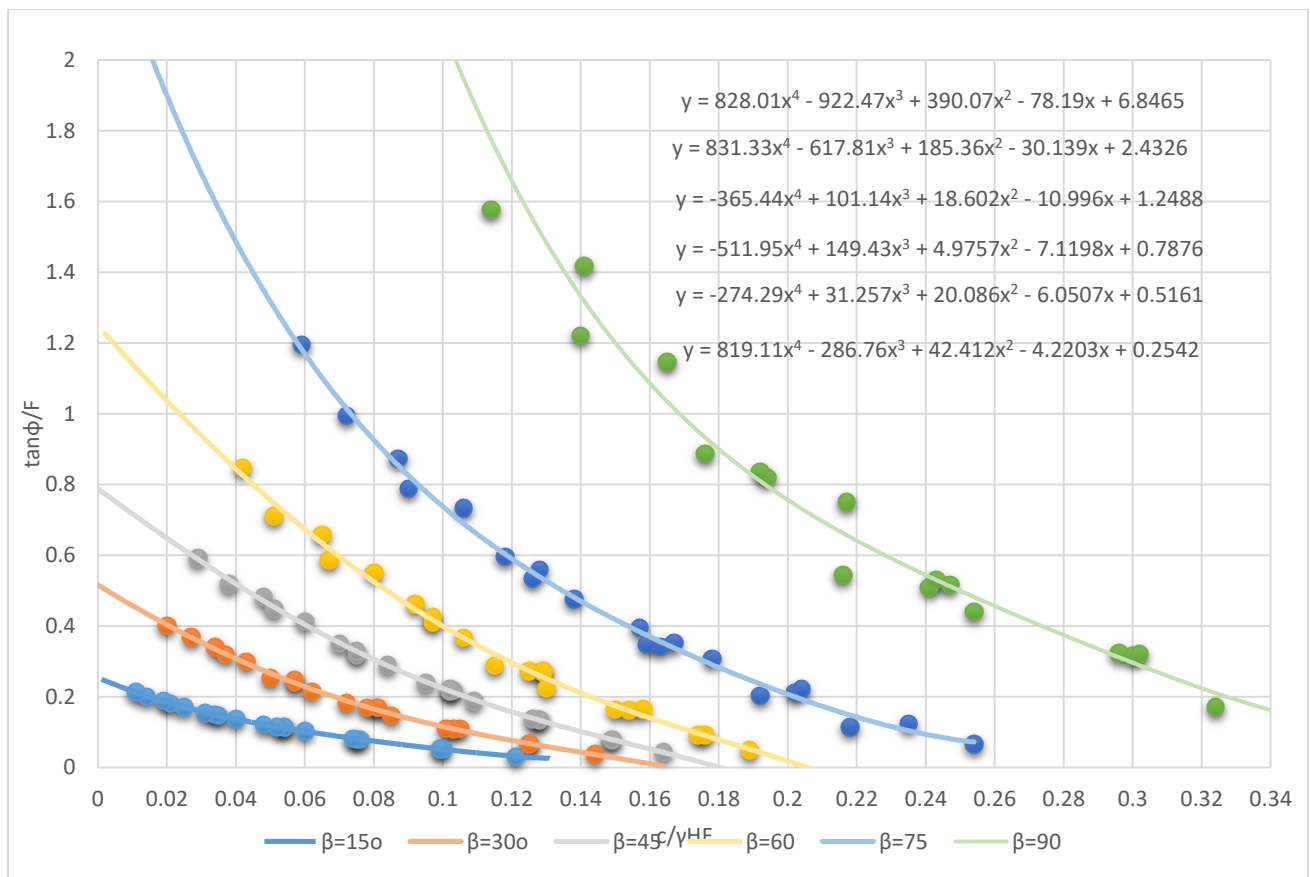
Εικόνα 5.20 Διαδικασία υπολογισμού συντελεστή ασφαλείας με βάση το νομογράφημα των Hoek & Bray (1977)

Για τη διαδικασία της σύγκρισης δημιουργήσα πίνακα βάση των εξισώσεων που είχαν χρησιμοποιήσει οι Hoek & Bray στους άξονες των νομογραφημάτων τους. Δηλαδή τις τιμές των εξισώσεων $\tan \phi / F$ και $N_s = \frac{c}{\gamma H F}$. Έγινε αντικατάσταση στις εξισώσεις και οι τιμές φαίνονται στον κάτω πίνακα.

$\beta=15$		$\beta=30$		$\beta=45$		$\beta=60$		$\beta=75$		$\beta=90$	
Ns	$\tan \phi / F$	Ns	$\tan \phi / F$	Ns	$\tan \phi / F$	Ns	$\tan \phi / F$	Ns	$\tan \phi / F$	Ns	$\tan \phi / F$
0.121	0.031814059	0.144	0.037759458	0.164	0.043140367	0.189	0.049596748	0.254	0.066581936	0.36	0.094582339
0.1	0.052388421	0.125	0.06568218	0.149	0.078254619	0.176	0.092482731	0.218	0.114664041	0.348	0.182648567
0.076	0.079898323	0.105	0.110465484	0.128	0.134805337	0.158	0.165384997	0.202	0.211836958	0.3	0.314707423
0.054	0.113474272	0.081	0.169223721	0.102	0.214432999	0.129	0.270862735	0.163	0.341752592	0.247	0.5176844
0.099	0.052509524	0.125	0.066213662	0.149	0.078717402	0.174	0.091789162	0.235	0.12434907	0.324	0.171191243
0.075	0.079822083	0.103	0.108776669	0.128	0.135323853	0.154	0.162513346	0.192	0.203610832	0.302	0.320012669
0.054	0.113612745	0.081	0.170528995	0.103	0.216884355	0.129	0.273375164	0.167	0.353360683	0.241	0.509615551
0.035	0.146694659	0.057	0.241875145	0.075	0.3188553	0.097	0.410062746	0.126	0.534324184	0.194	0.820125492
0.074	0.081279641	0.101	0.110629251	0.126	0.13781531	0.15	0.1637293	0.204	0.222884406	0.296	0.322668647
0.052	0.113883052	0.078	0.169288481	0.102	0.222068477	0.125	0.272025586	0.159	0.347299842	0.243	0.531343408
0.034	0.150152737	0.057	0.248783482	0.075	0.329384827	0.097	0.42569618	0.128	0.559094062	0.192	0.836713182
0.021	0.180809853	0.037	0.319272135	0.051	0.448791904	0.067	0.587048765	0	0.78781436	0.14	1.221376625
0.06	0.103079855	0.085	0.147433674	0.109	0.18861492	0.13	0.225351393	0.178	0.308578444	0.254	0.440389221
0.04	0.13746435	0.062	0.214548595	0.084	0.289543766	0.106	0.367504945	0.138	0.476361608	0.217	0.750780584
0.025	0.171473201	0.043	0.299766495	0.06	0.412393049	0.08	0.551432922	0	0.732678007	0.165	1.145536248
0.014	0.200538475	0.027	0.36820808	0.038	0.519667209	0.051	0.710147933	0	0.995431499	0.114	1.577459752
0.048	0.120872894	0.072	0.181741311	0.095	0.239332468	0.115	0.288846689	0.157	0.396362603	0.216	0.54345831
0.031	0.155101595	0.05	0.252436712	0.07	0.351087712	0.092	0.461550952	0.118	0.595951443	0.176	0.887936118
0.019	0.189156815	0.034	0.340681945	0.048	0.482518477	0.065	0.658633933	0	0.873152582	0.141	1.417398026
0.011	0.213837826	0.02	0.400907612	0.029	0.592584485	0	0.848432387	0	1.19529862	0.105	2.118938463

Πίνακας 5.6

Έπειτα κατασκευάστηκε το αντίστοιχο διάγραμμα βάση των τιμών.



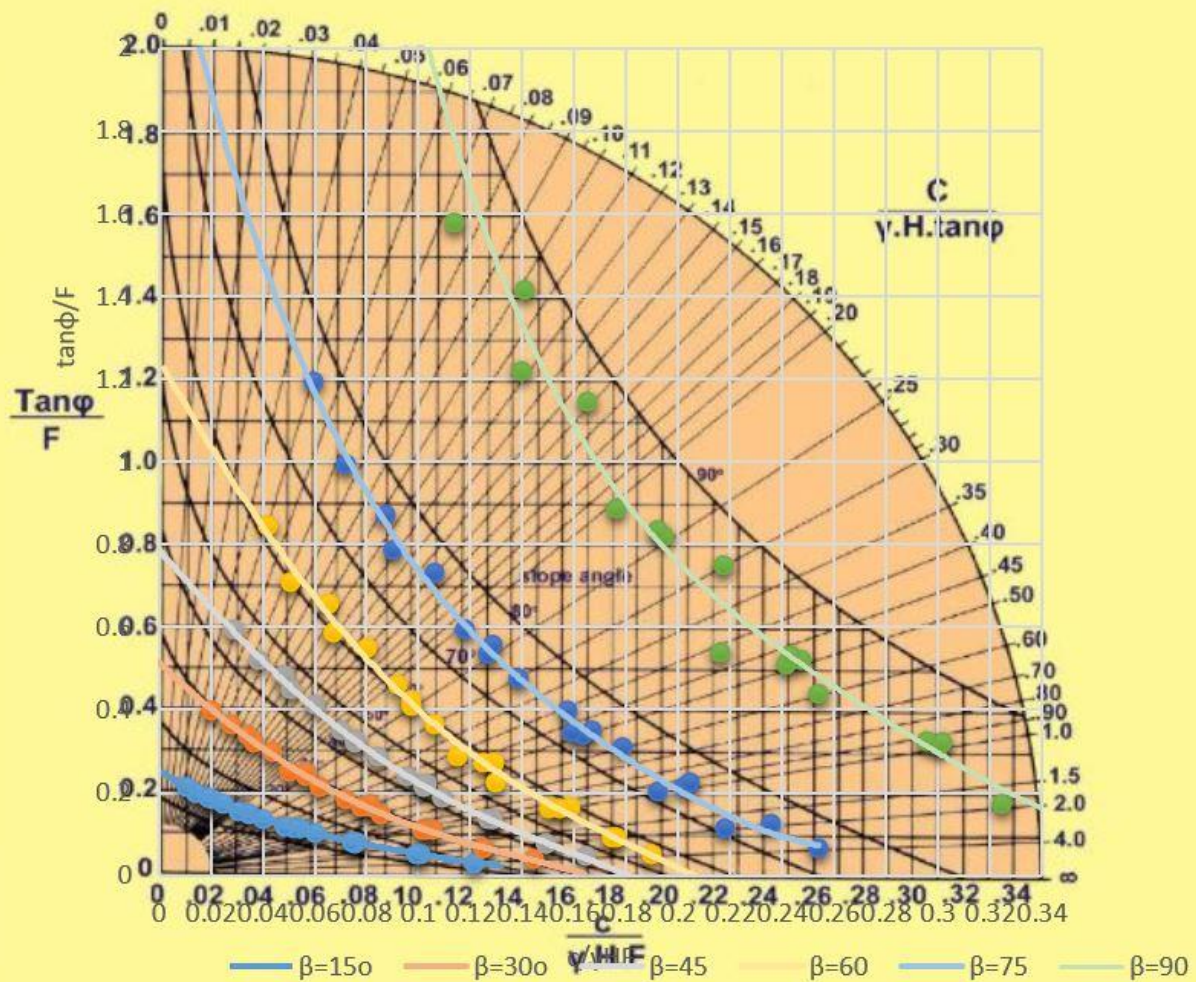
Εικόνα 5.21

Και παρατέθηκε πάνω στο 1^ο Νομογράφημα για στραγγισμένες συνθήκες όπου και έγινε οπτική σύγκριση.

Πρέπει να διαπιστωθεί ότι οι Hoek & Bray έχουν εξετάσει περιπτώσεις κλίσης πρανών ανά 10^ο ενώ εγώ εξέτασα ανά 15^ο.

Έπειτα φαίνεται η οπτική σύγκριση των δύο γραφημάτων.

1° ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑ ΗΟΕΚ & BRAY



Εικόνα 5.22 Οπτική Σύγκριση

Το συμπέρασμα της σύγκρισης είναι πολύ ικανοποιητικό και μας επιβεβαιώνει την ακρίβεια των τιμών Συντελεστών Ασφαλείας που εξήγαγα από το Plaxis.

Δεν περίμενα απόλυτη ταύτιση και ούτε ο στόχος ήταν η ανάδειξη του ακριβέστερου διαγράμματος καθώς κάθε διάγραμμα δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τις ιδιότητες των υλικών που αναλύθηκαν. Για παράδειγμα οι Hoek & Bray έκαναν τις αναλύσεις τους για υλικό ειδικού βάρους $\gamma=18.9\text{kN/m}^3$ και εγώ για $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Αυτό και μόνο μας δίνει να καταλάβουμε ότι για μικρότερες τιμές πυκνότητας θα πρέπει να προκειούνται μικρότερες τιμές Συντελεστών Ασφαλείας, ενώ για υψηλότερες το αντίστροφο.

5.5 Κατασκευή νέων διαγραμμάτων υπό στατικές συνθήκες

Πρώτο διάγραμμα

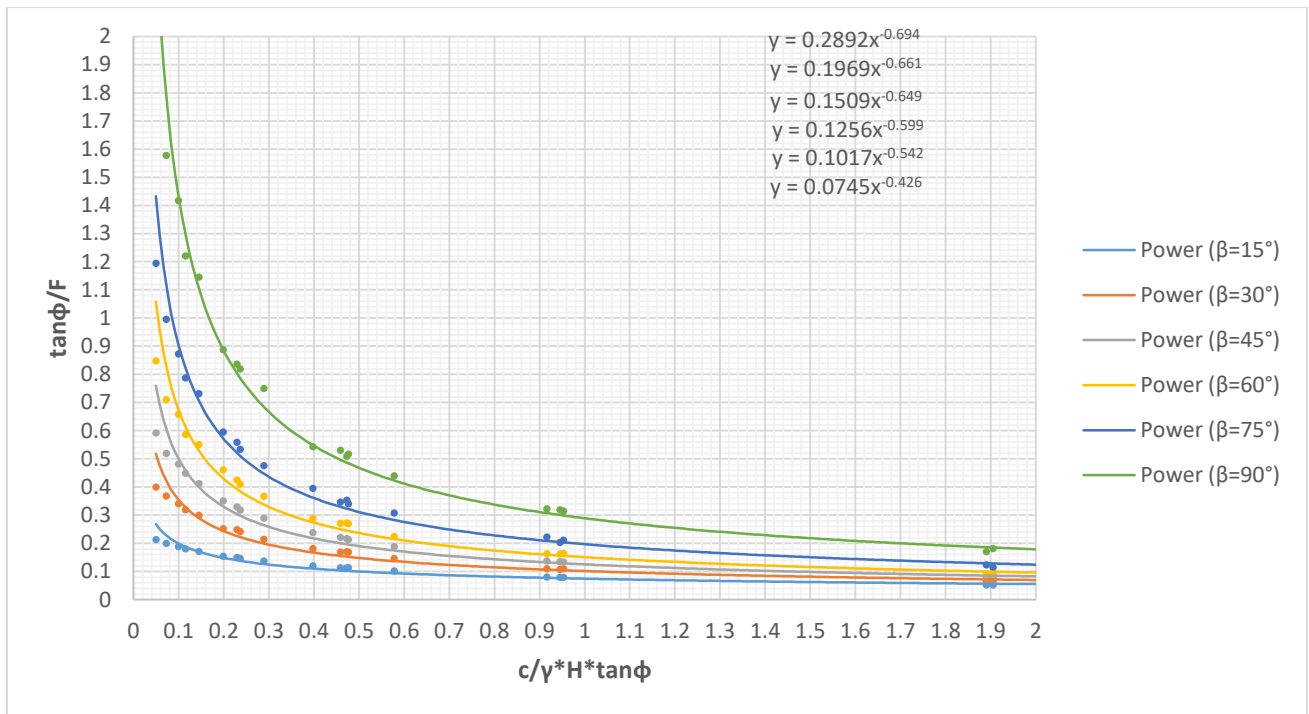
Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές ασφαλείας πολλών πρανών, διαφορετικής γεωμετρίας και εδαφικών ιδιοτήτων, υπολογίζουμε τις τιμές κατά περίπτωση δύο εξισώσεων, των $\tan\phi/F$ και $c/\gamma H \tan\phi$.

Έπειτα έγινε η ταξινόμηση των τιμών σε πίνακα βάση των γωνιών κλίσης των πρανών (β).

$\beta=15^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$		$\beta=75^\circ$		$\beta=90^\circ$	
$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma H \tan\phi$	$\tan\phi/F$
3.81001743	0.03181406	3.81001743	0.03775946	3.81001743	0.04314037	3.81001743	0.04959675	3.81001743	0.06658194	3.81001743	0.09458234
1.90500872	0.05238842	1.90500872	0.06568218	1.90500872	0.07825462	1.90500872	0.09248273	1.90500872	0.11466404	1.90500872	0.18264857
0.95250436	0.07989832	0.95250436	0.11046548	0.95250436	0.13480534	0.95250436	0.165385	0.95250436	0.21183696	0.95250436	0.31470742
0.47625218	0.11347427	0.47625218	0.16922372	0.47625218	0.214433	0.47625218	0.27086274	0.47625218	0.34175259	0.47625218	0.5176844
1.89042727	0.05250952	1.89042727	0.06621366	1.89042727	0.0787174	1.89042727	0.09178916	1.89042727	0.12434907	1.89042727	0.17119124
0.94521364	0.07982208	0.94521364	0.10877667	0.94521364	0.13532385	0.94521364	0.16251335	0.94521364	0.20361083	0.94521364	0.32001267
0.47260682	0.11361275	0.47260682	0.170529	0.47260682	0.21688436	0.47260682	0.27337516	0.47260682	0.35336068	0.47260682	0.50961555
0.23630341	0.14669466	0.23630341	0.24187515	0.23630341	0.3188553	0.23630341	0.41006275	0.23630341	0.53432418	0.23630341	0.82012549
0.91582581	0.08127964	0.91582581	0.11062925	0.91582581	0.13781531	0.91582581	0.1637293	0.91582581	0.22288441	0.91582581	0.32266865
0.4579129	0.11388305	0.4579129	0.16928848	0.4579129	0.22206848	0.4579129	0.27202559	0.4579129	0.34729984	0.4579129	0.53134341
0.22895645	0.15015274	0.22895645	0.24878348	0.22895645	0.32938483	0.22895645	0.42569618	0.22895645	0.55909406	0.22895645	0.83671318
0.11447823	0.18080985	0.11447823	0.31927214	0.11447823	0.4487919	0.11447823	0.58704877	0.11447823	0.78781436	0.11447823	1.22137663
0.57735027	0.10307986	0.57735027	0.14743367	0.57735027	0.18861492	0.57735027	0.22535139	0.57735027	0.30857844	0.57735027	0.44038922
0.28867513	0.13746435	0.28867513	0.2145486	0.28867513	0.28954377	0.28867513	0.36750495	0.28867513	0.47636161	0.28867513	0.75078058
0.14433757	0.1714732	0.14433757	0.2997665	0.14433757	0.41239305	0.14433757	0.55143292	0.14433757	0.73267801	0.14433757	1.14553625
0.07216878	0.20053848	0.07216878	0.36820808	0.07216878	0.51966721	0.07216878	0.71014793	0.07216878	0.9954315	0.07216878	1.57745975
0.3972512	0.12087289	0.3972512	0.18174131	0.3972512	0.23933247	0.3972512	0.28884669	0.3972512	0.3963626	0.3972512	0.54345831
0.1986256	0.1551016	0.1986256	0.25243671	0.1986256	0.35108771	0.1986256	0.46155095	0.1986256	0.59595144	0.1986256	0.88793612
0.0993128	0.18915682	0.0993128	0.34068195	0.0993128	0.48251848	0.0993128	0.65863393	0.0993128	0.87315258	0.0993128	1.41739803
0.0496564	0.21383783	0.0496564	0.40090761	0.0496564	0.59258449	0.0496564	0.84843239	0.0496564	1.19529862	0.0496564	2.11893846

Πίνακας 5.6 Υπολογισμός παραμέτρων για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης πρανούς υπό στατικές συνθήκες

Στη συνέχεια βλέπουμε το Πρώτο διάγραμμα από το οποίο μπορεί να εξαχθεί ο Συντελεστής Ασφαλείας οποιουδήποτε εδαφικού υλικού και γεωμετρίας πρανούς με απλή αντικατάσταση δυο εξισώσεων και εύρεση μίας τιμής από το διάγραμμα.



Εικόνα 5.23 Διάγραμμα παραγωγής εκθετικών εξισώσεων για διάφορες τιμές γωνιών κλίσης του πρανούς υπό στατικές συνθήκες

Τα σημεία εικονίζονται με διαφορετικό χρώμα για κάθε κατηγορία κλίσης και έγινε προσπάθεια δημιουργίας εξισώσεων που αναπαριστούν καλύτερα τα σημεία. Επειδή ο στόχος ήταν η εύρεση εύχρηστων εξισώσεων δεν επιλέχθηκε η χρήση μεγάλων πολυωνυμικών εξισώσεων όπου ενδεχομένως θα αποκτούσαμε μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι εκθετικές εξισώσεις είναι:

$$\text{Για } \beta=15^{\circ} \quad y = 0.2892x^{-0.694}$$

$$\text{Για } \beta=30^{\circ} \quad y = 0.1969x^{-0.661}$$

$$\text{Για } \beta=45^{\circ} \quad y = 0.1509x^{-0.649}$$

$$\text{Για } \beta=60^{\circ} \quad y = 0.1256x^{-0.599}$$

$$\text{Για } \beta=75^{\circ} \quad y = 0.1017x^{-0.542}$$

$$\text{Για } \beta=90^{\circ} \quad y = 0.0745x^{-0.426}$$

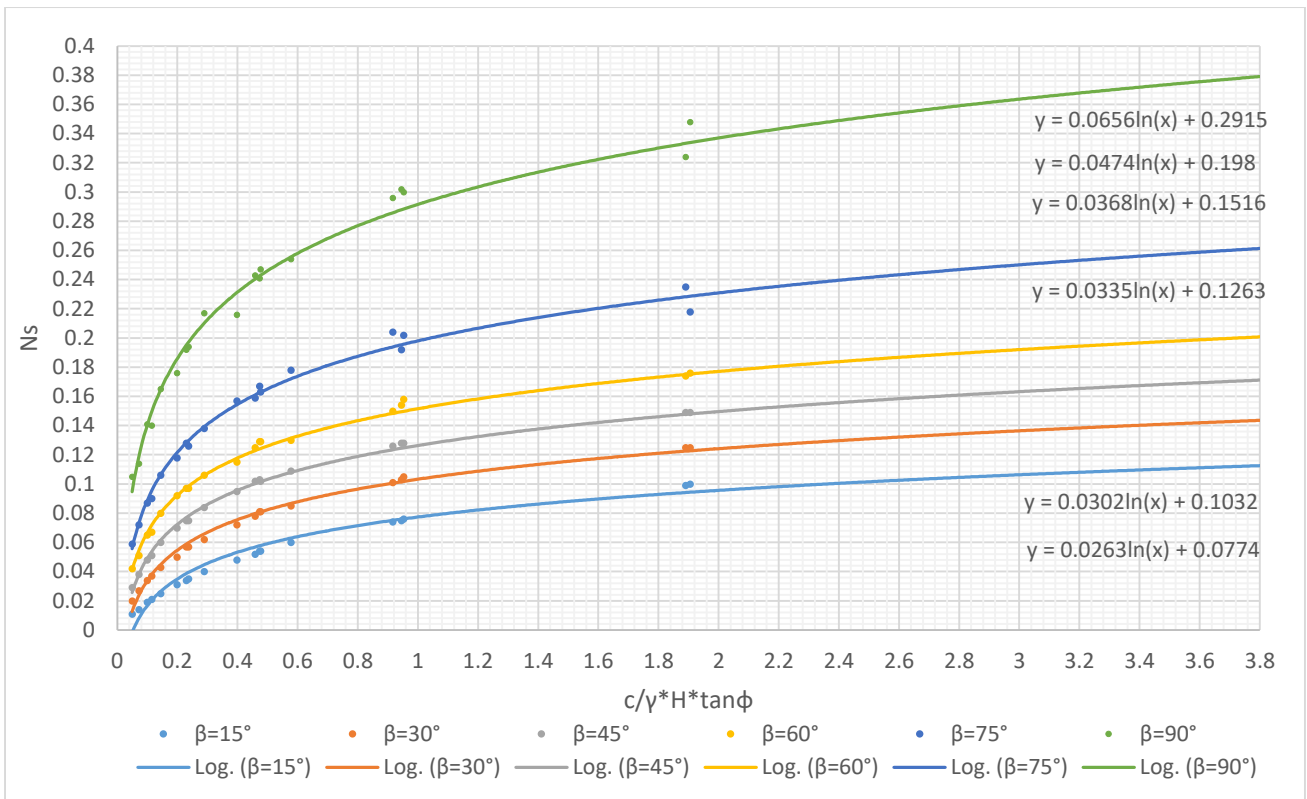
Δεύτερο διάγραμμα

Το Δεύτερο διάγραμμα δημιουργήθηκε με τη χρήση της εξίσωσης του αριθμού ευστάθειας $Ns=c/\gamma HF$ που εισήγαγε ο Taylor.

Δημιουργήθηκε ο πίνακας των τιμών για κάθε κατηγορία κλίσης πρανών (β) και εισάχθηκαν τα ζεύγη των τιμών σε διάγραμμα του excel όπου δημιουργήθηκαν οι καμπύλες.

$\beta=15^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$		$\beta=75^\circ$		$\beta=90^\circ$	
Ns	$c/\gamma H \tan \phi$	Ns	$c/\gamma H \tan \phi$	Ns	$c/\gamma H \tan \phi$	Ns	$c/\gamma H \tan \phi$	Ns	$c/\gamma H \tan \phi$	Ns	$c/\gamma H \tan \phi$
0.121	3.810017434	0.144	3.810017434	0.164	3.810017434	0.189	3.810017434	0.254	3.810017434	0.36	3.810017434
0.1	1.905008717	0.125	1.905008717	0.149	1.905008717	0.176	1.905008717	0.218	1.905008717	0.348	1.905008717
0.076	0.952504359	0.105	0.952504359	0.128	0.952504359	0.158	0.952504359	0.202	0.952504359	0.3	0.952504359
0.054	0.476252179	0.081	0.476252179	0.102	0.476252179	0.129	0.476252179	0.163	0.476252179	0.247	0.476252179
0.099	1.890427273	0.125	1.890427273	0.149	1.890427273	0.174	1.890427273	0.235	1.890427273	0.324	1.890427273
0.075	0.945213637	0.103	0.945213637	0.128	0.945213637	0.154	0.945213637	0.192	0.945213637	0.302	0.945213637
0.054	0.472606818	0.081	0.472606818	0.103	0.472606818	0.129	0.472606818	0.167	0.472606818	0.241	0.472606818
0.035	0.236303409	0.057	0.236303409	0.075	0.236303409	0.097	0.236303409	0.126	0.236303409	0.194	0.236303409
0.074	0.915825806	0.101	0.915825806	0.126	0.915825806	0.15	0.915825806	0.204	0.915825806	0.296	0.915825806
0.052	0.457912903	0.078	0.457912903	0.102	0.457912903	0.125	0.457912903	0.159	0.457912903	0.243	0.457912903
0.034	0.228956452	0.057	0.228956452	0.075	0.228956452	0.097	0.228956452	0.128	0.228956452	0.192	0.228956452
0.021	0.114478226	0.037	0.114478226	0.051	0.114478226	0.067	0.114478226	0	0.114478226	0.14	0.114478226
0.06	0.577350269	0.085	0.577350269	0.109	0.577350269	0.13	0.577350269	0.178	0.577350269	0.254	0.577350269
0.04	0.288675135	0.062	0.288675135	0.084	0.288675135	0.106	0.288675135	0.138	0.288675135	0.217	0.288675135
0.025	0.144337567	0.043	0.144337567	0.06	0.144337567	0.08	0.144337567	0	0.144337567	0.165	0.144337567
0.014	0.072168784	0.027	0.072168784	0.038	0.072168784	0.051	0.072168784	0	0.072168784	0.114	0.072168784
0.048	0.397251198	0.072	0.397251198	0.095	0.397251198	0.115	0.397251198	0.157	0.397251198	0.216	0.397251198
0.031	0.198625599	0.05	0.198625599	0.07	0.198625599	0.092	0.198625599	0.118	0.198625599	0.176	0.198625599
0.019	0.099312799	0.034	0.099312799	0.048	0.099312799	0.065	0.099312799	0	0.099312799	0.141	0.099312799
0.011	0.0496564	0.02	0.0496564	0.029	0.0496564	0	0.0496564	0	0.0496564	0.105	0.0496564

Πίνακας 5.7 Υπολογισμός παραμέτρων για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης πρανούς υπό στατικές συνθήκες



Εικόνα 5.24 Διάγραμμα παραγωγής πολυωνυμικών εξισώσεων για διάφορες τιμές γωνιών κλίσης του πρανούς υπό στατικές συνθήκες

Το πρώτο με το δεύτερο διάγραμμα είναι ισοδύναμα. Δηλαδή μπορούμε να εξαγάγουμε τους ίδιους συντελεστές και από τα δύο διαγράμματα αν έχουμε τα ίδια δεδομένα.

Οι λογαριθμικές εξισώσεις είναι:

$$\text{Για } \beta=15^\circ \quad y = 0.0263\ln(x) + 0.0774$$

$$\text{Για } \beta=30^\circ \quad y = 0.0302\ln(x) + 0.1032$$

$$\text{Για } \beta=45^\circ \quad y = 0.0335\ln(x) + 0.1263$$

$$\text{Για } \beta=60^\circ \quad y = 0.0368\ln(x) + 0.1516$$

$$\text{Για } \beta=75^\circ \quad y = 0.0474\ln(x) + 0.198$$

$$\text{Για } \beta=90^\circ \quad y = 0.0656\ln(x) + 0.2915$$

5.6 Παραμετρικές αναλύσεις υπό σεισμικές συνθήκες

Οι συντελεστές ασφαλείας υπολογίστηκαν υπό στατικές συνθήκες και υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης (ψευδοστατικά). Οι τιμές σεισμικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 0.08g, 0.12g και 0.18g. Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε 0.16g, 0.24g και 0.36g, επειδή στα φυσικά πρηνή με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Σχεδιασμό (ΕΑΚ 2000), σχετικά με τις τιμές της σεισμικής επιτάχυνσης σχεδιασμού των πρηνών λαμβάνονται ως οι μισές των πραγματικών και σχετίζονται με τις τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας του ελλαδικού χώρου.



Εικόνα 2 Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας σε σχέση με τα όρια των Δήμων.

Εικόνα 5.25 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας όπου διακρίνονται οι τρεις ζώνες επικινδυνότητας

Το πρώτο πράγμα που σχεδιάσαμε στο λογισμικό Plaxis πριν το σχεδιασμό της γεωμετρίας του προσομοιώματος ήταν ο καθορισμός της επιτάχυνσης στην καρτέλα των γενικών ρυθμίσεων. Στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, η οριζόντια επιτάχυνση (στον άξονα των x) ήταν ίση με μηδέν. Στην περίπτωση της ψευδοστατικής φόρτισης στο πρανές, οι τιμές που επιλέχθηκαν για τους συντελεστές οριζόντιας επιτάχυνσης ήταν οι 0.08, 0.12 και 0.18. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στις τιμές των τριών ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του Ελλαδικού χώρου, με επιταχύνσεις 0.16g, 0.24g και 0.36g με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000 σχετικά με την ευστάθεια των φυσικών ή τεχνητών πρανών.

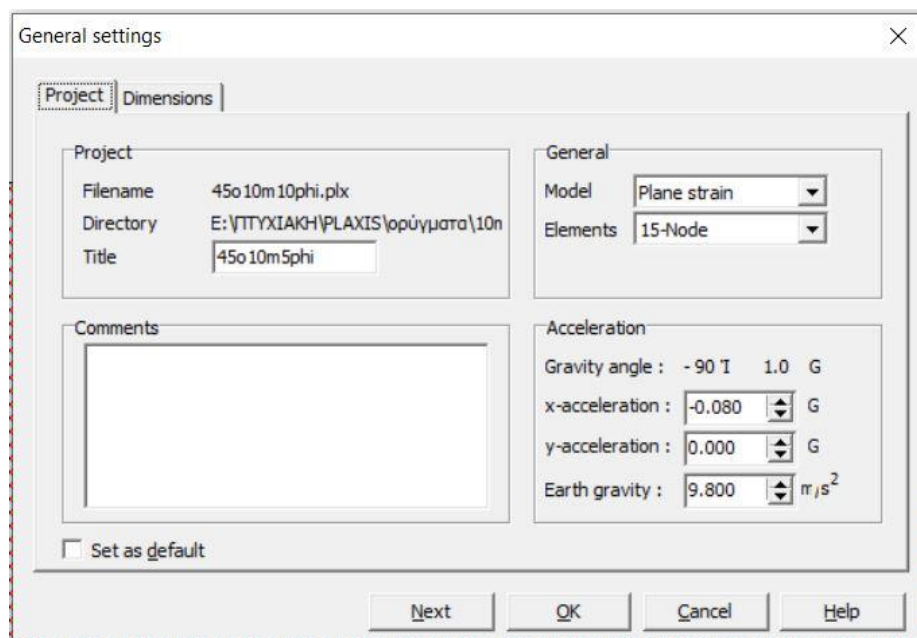
Επιπλέον, σεισμικές επιταχύνσεις οι οποίες δρουν στη μάζα του πρανούς είναι η οριζόντια (a_h) και η κατακόρυφη επιτάχυνση (a_v) για τις οποίες ισχύει:

$$a_h = a_\pi$$

$$a_v = \pm 0.5a_\pi$$

όπου a_π είναι η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανούς η οποία λαμβάνεται ίση με 0.5a για φυσικά πρανή ή ίση με ($\alpha_B + \alpha_K$) για πρανή αναχωμάτων.

Μια άλλη παραδοχή που υιοθετήθηκε στις αναλύσεις με ψευδοστατική φόρτιση ήταν η θεώρηση μόνο της οριζόντιας επιτάχυνσης (x-acceleration), ενώ αγνοήθηκε η κατακόρυφη επιτάχυνση (y-acceleration). Η κατακόρυφη επιτάχυνση έχει πολύ μικρή επιρροή στον συντελεστή ασφαλείας, λόγω του χαμηλότερου πλάτους, της υψηλότερης συχνότητας και την αζομείωση των παθητικών και ενεργητικών δυνάμεων ανάλογα με την κατεύθυνσή της (Psarrououlos & Antoniou, 2015).



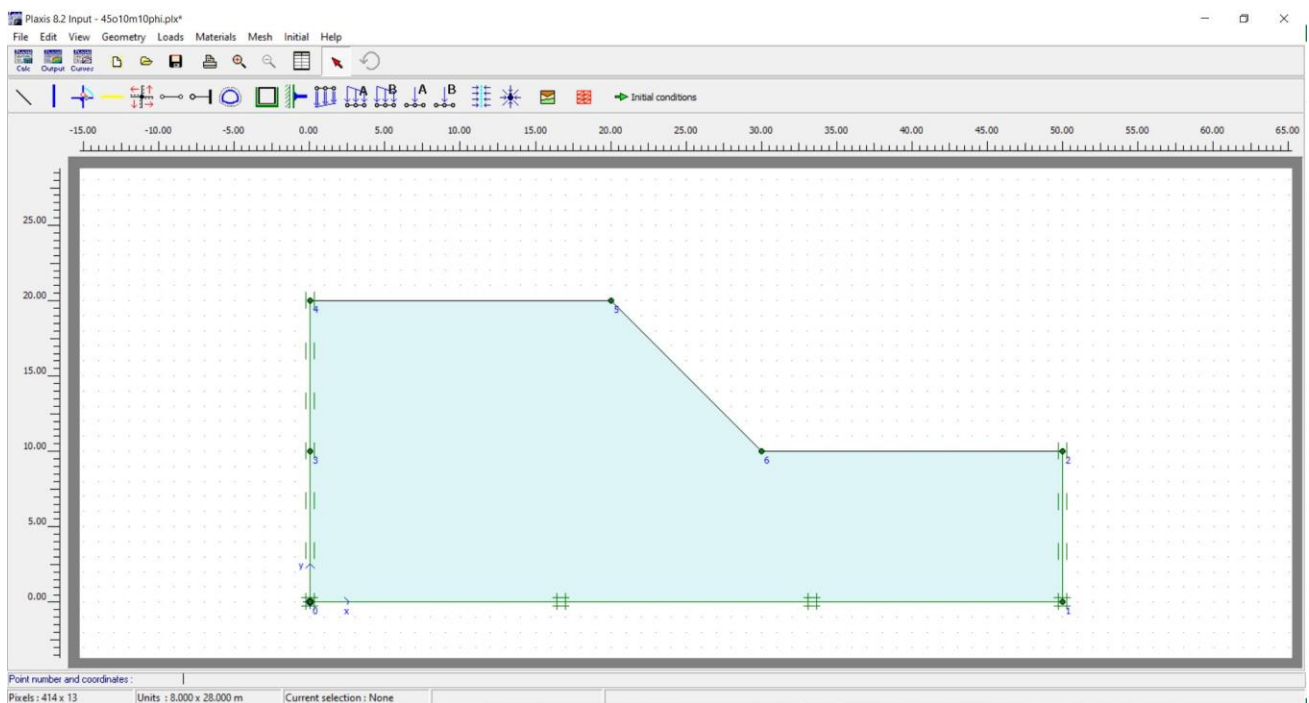
Εικόνα 5.26 Ψευδοστατική φόρτιση με επιτάχυνση 0,08g

Τελευταία παραδοχή που έγινε ήταν σχετικά με την τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης η οποία είχε αρνητικό πρόσημο καθώς το πρανές είχε διεύθυνση Δ-Α. Αυτό μεταφράζεται στο ότι η στέψη του πρανούς βρίσκεται στα αριστερά και ο πόδας στα δεξιά.

5.6.1 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας

Στις αναλύσεις παρουσιάζονται οι πίνακες των αποτελεσμάτων, όπου για διάφορες τιμές επιταχύνσεων, των γωνιών κλίσης του πρανού, των γωνιών εσωτερικής τριβής και του ύψους του πρανού προκύπτουν κάποιοι συντελεστές ασφαλείας και κατά συνέπεια κάποιοι συντελεστές ευστάθειας, για διάφορες τιμές ύψους πρανών και εσωτερικής γωνίας τριβής.

Μέσω των λόγων F_{ST}/F_P και N_{SP}/N_{ST} μπορεί να γίνει κατανοητό αν υπάρχουν μεγαλύτερες ή μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας και των συντελεστών ευστάθειας υπό στατικές συνθήκες ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ) μέσω του Plaxis τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά της μεθόδου Taylor.



Εικόνα 5.27 Εδαφικό προσομοίωμα με $H=10\text{m}$ και $\beta=45^\circ$

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας στο Plaxis ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Στο πρόγραμμα Curves στο οποίο προβάλλονται τα διαγράμματα στον οριζόντιο άξονα x τοποθετήθηκε το μέτρο της μετατόπισης $|u|$, ενός συγκεκριμένου σημείου στην παραπάνω περίπτωση το σημείο αυτό είναι το πόδι του πρανού, και στον άξονα y δίνεται ο τελικός συντελεστής ασφαλείας $\text{Sum-}M_{sf}$. Για τον προσδιορισμό του τελικού συντελεστή ασφαλείας αφήνεται το ποντίκι στο τελευταίο σημείο της καμπύλης και εμφανίζεται ένα εικονίδιο με την τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας (FS) σε ένα πρανές ύψους 5m ($H=5m$) και συνοχής $c=30kN/m^2$, που προέκυψαν από τις παραμετρικές επιλύσεις, με τη βοήθεια του λογισμικού Plaxis. Πρώτα κατασκευάστηκε η γεωμετρία του μοντέλου, στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα δεδομένα στην καρτέλα Material Sets και εκτελέστηκαν στο υποπρόγραμμα Calculation με την βοήθεια της εντολής Phi/c reduction, όπου πραγματοποιούνταν σταδιακή μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής (ϕ) και της δύναμης συνοχής (c).

Πίνακας 5.8 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=5m$ και $\phi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	5.29	3.03	2.46	2.08	1.75	1.40
$FS_p(a=0)$	2.75	2.32	2.03	1.76	1.31	0.93
$a=0.08g$	1.87	1.78	1.74	1.55	1.15	0
$a=0.12g$	1.6	1.53	1.52	1.47	1.06	0
$a=0.18g$	1.3	1.23	1.24	1.22	0.83	0
FS_T/FS_p	1.92	1.31	1.21	1.18	1.34	1.51

Πίνακας 5.9 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=5m$ και $\phi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	16.67	4.63	3.09	2.47	1.92	1.54
$FS_p(a=0)$	3.36	2.66	2.24	1.92	1.42	1.03
$a=0.08g$	2.40	2.18	1.95	1.68	1.25	0
$a=0.12g$	2.06	1.96	1.82	1.59	1.15	0
$a=0.18g$	1.68	1.61	1.61	1.44	1.01	0
FS_T/FS_p	4.96	1.74	1.38	1.29	1.35	1.5

Πίνακας 5.10 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=5m$ και $\phi=20^\circ$

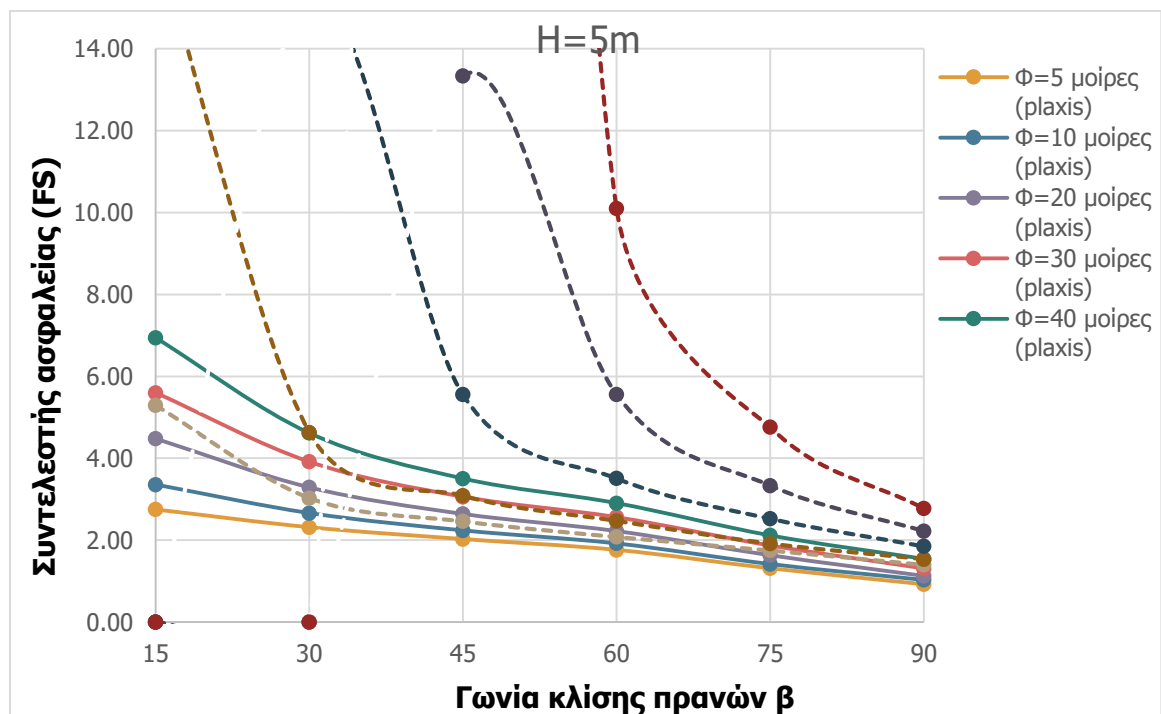
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	-	15.15	5.56	3.51	2.53	1.85
$FS_p(a=0)$	4.48	3.29	2.64	2.22	1.63	1.13
$a=0.08g$	3.30	2.74	2.31	1.98	1.44	0.75
$a=0.12g$	2.87	2.52	2.16	1.88	1.35	0.54
$a=0.18g$	2.87	2.23	1.96	1.72	1.18	0
FS_T/FS_p	-	4.60	2.11	1.58	1.55	1.64

Πίνακας 5.11 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=5m και φ=30°

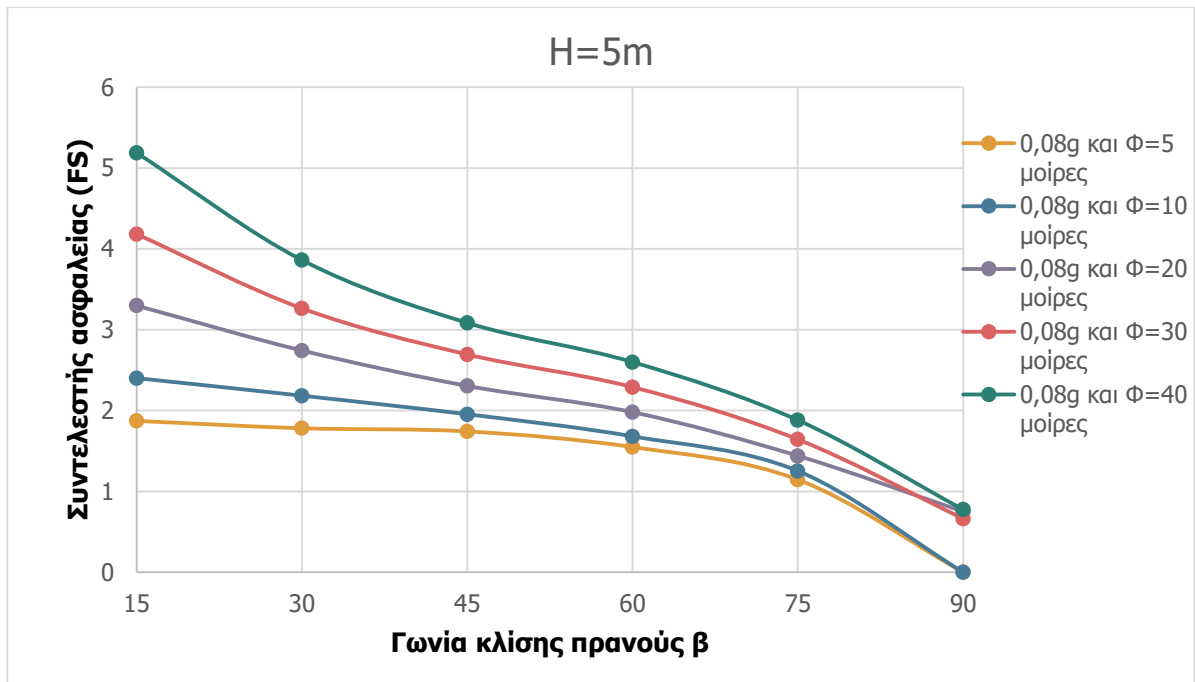
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	-	13.33	5.56	3.33	2.22
$FS_p(\alpha=0)$	5.6	3.92	3.06	2.56	1.87	1.31
$\alpha=0.08g$	4.18	3.26	2.69	2.29	1.64	0.66
$\alpha=0.12g$	3.68	3.02	2.53	2.16	1.54	0.64
$\alpha=0.18g$	3.08	2.69	2.30	1.99	1.37	0
FS_T/FS_p	-	-	4.36	2.17	1.78	1.69

Πίνακας 5.12 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=5m και φ=40°

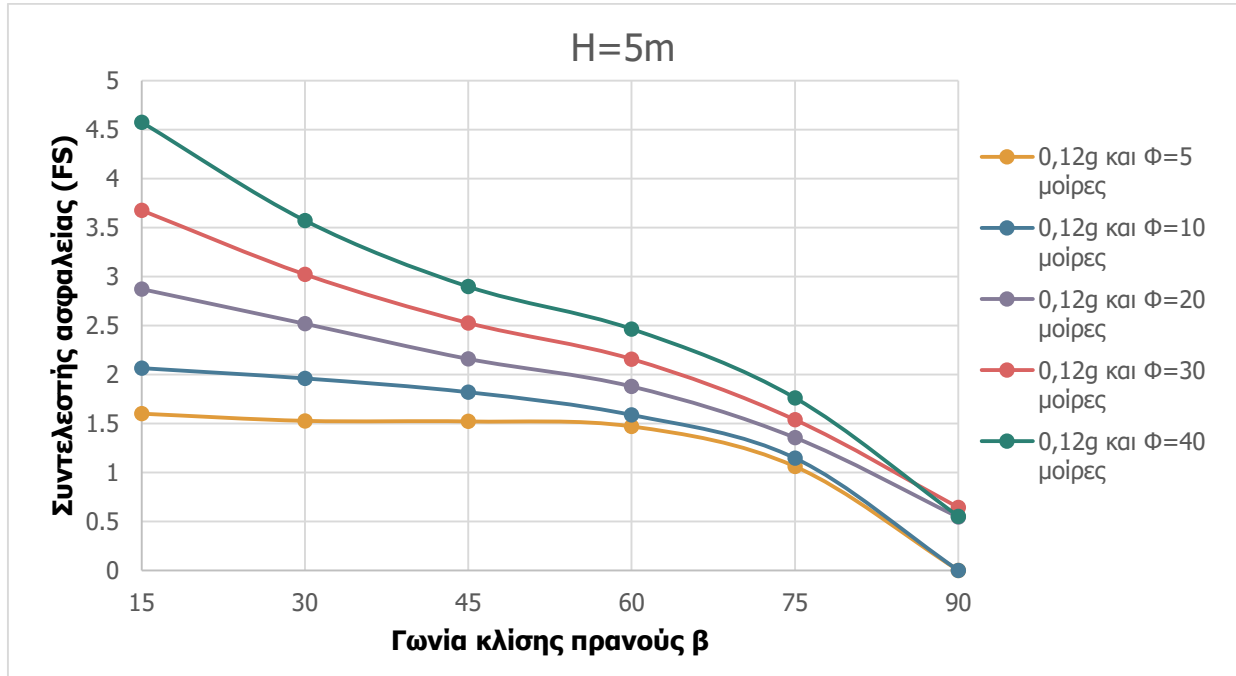
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	-	55.56	10.10	4.76	2.78
$FS_p(\alpha=0)$	6.94	4.62	3.51	2.91	2.12	1.54
$\alpha=0.08g$	5.19	3.86	3.09	2.6	1.88	0.78
$\alpha=0.12g$	4.58	3.57	2.90	2.46	1.76	0.55
$\alpha=0.18g$	3.86	3.2	2.65	2.26	1.52	0
FS_T/FS_p	-	-	15.83	3.47	2.25	1.81



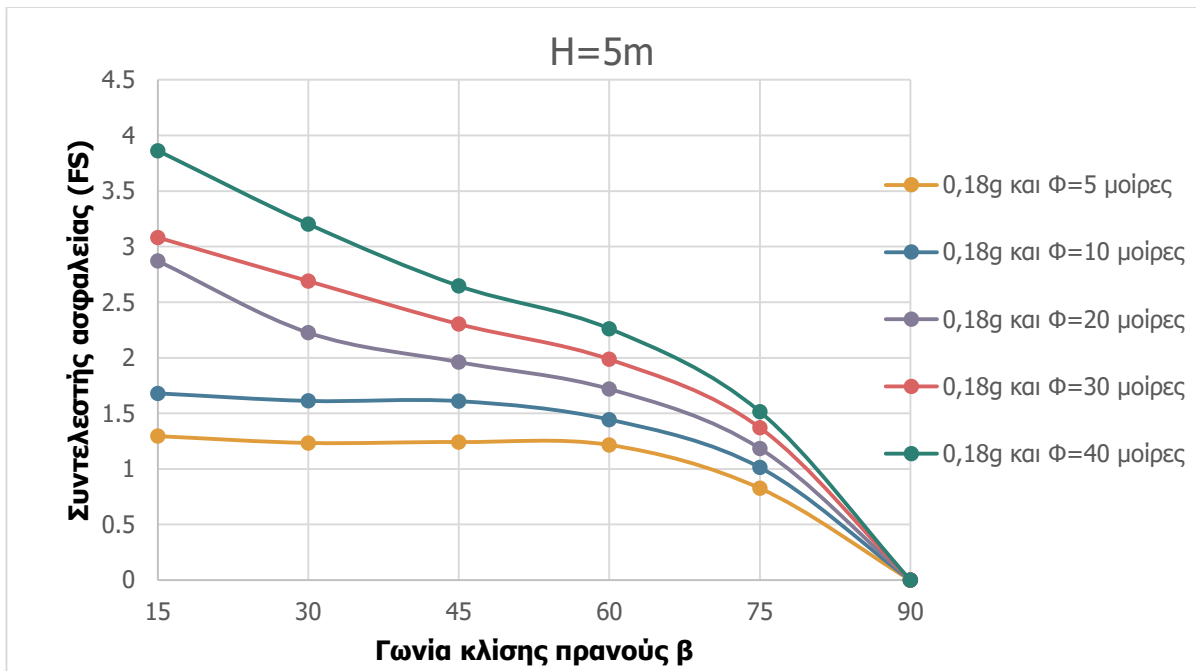
Εικόνα 5.28 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό στατικές συνθήκες κατά Taylor και Plaxis, για H=5m και c=30 kN/m²



Εικόνα 5.29 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=5m και c=30 kN/m² για 0,08g



Εικόνα 5.30 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=5m και c=30kN/m² για 0,12g



Εικόνα 5.31 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=5m και $c=30\text{kN/m}^2$ για 0,18g

Με βάση τους παραπάνω πίνακες και τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι:

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), τόσο υπό στατικές όσο και υπό σεισμικές συνθήκες. Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες των πρανών τόσο πιο ασταθές είναι.
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS) αυξάνεται όσο μεγαλώνει η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής το έδαφος του πρανούς εμφανίζεται πιο σταθερό
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται ενώ αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής της σεισμικής επιτάχυνσης επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του εδάφους.
- Από τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$ προκύπτει $F = \frac{c}{N_s \cdot \gamma \cdot H}$, για ένα δεδομένο συντελεστή ευστάθειας που προκύπτει από μια εσωτερικής γωνία τριβής (ϕ) και συγκεκριμένη γωνία κλίσης πρανούς (β) από τις καμπύλες Taylor προσδιορίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας. Με βάση τον λόγο FS_T/FS_p , η μικρότερη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας (μεταξύ του διαγράμματος Taylor και του λογισμικού του Plaxis) παρουσιάζεται για $\beta=60^\circ$ και $\phi=5^\circ$ όπου ο λόγος λαμβάνει την τιμή 1.18. Μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για $\beta=45^\circ$ και $\phi=40^\circ$ όπου ο λόγος λαμβάνει την τιμή 15.83. Άρα για μικρότερες γωνίες τριβής και μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρανούς οι συντελεστές ασφαλείας κατά καμπυλών Taylor και οι συντελεστές ασφαλείας με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με βάση το Plaxis παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση. Όσο αυξάνονται οι γωνίες τριβής και μειώνονται οι γωνίες κλίσης πρανούς τότε οι δύο συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας (FS), για την ίδια συνοχή $c=30\text{kN/m}^2$ και ίδιες γωνίες τριβής (φ) για ύψος πρηνούς ($H=10\text{m}$).

Πίνακας 5.13 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	2.38	1.52	1.23	1.04	0.85	0.70
$FS_p(\alpha=0)$	1.67	1.33	1.12	0.95	0.76	0.48
$\alpha=0.08g$	1.25	1.09	0.78	0	0	0
$\alpha=0.12g$	1.10	0.96	0.52	0	0	0
$\alpha=0.18g$	0.86	0.64	0.35	0	0	0
FS_T/FS_p	1.43	1.14	1.1	1.09	1.12	1.46

Πίνακας 5.14 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	8.33	2.31	1.54	1.23	0.96	0.77
$FS_p(\alpha=0)$	2.21	1.62	1.30	1.09	0.87	0.55
$\alpha=0.08g$	1.65	1.35	1.14	0.48	0	0
$\alpha=0.12g$	1.46	1.25	1.07	0.49	0	0
$\alpha=0.18g$	1.24	1.11	0.85	0.33	0	0
FS_T/FS_p	3.77	1.43	1.18	1.13	1.10	1.4

Πίνακας 5.15 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=20^\circ$

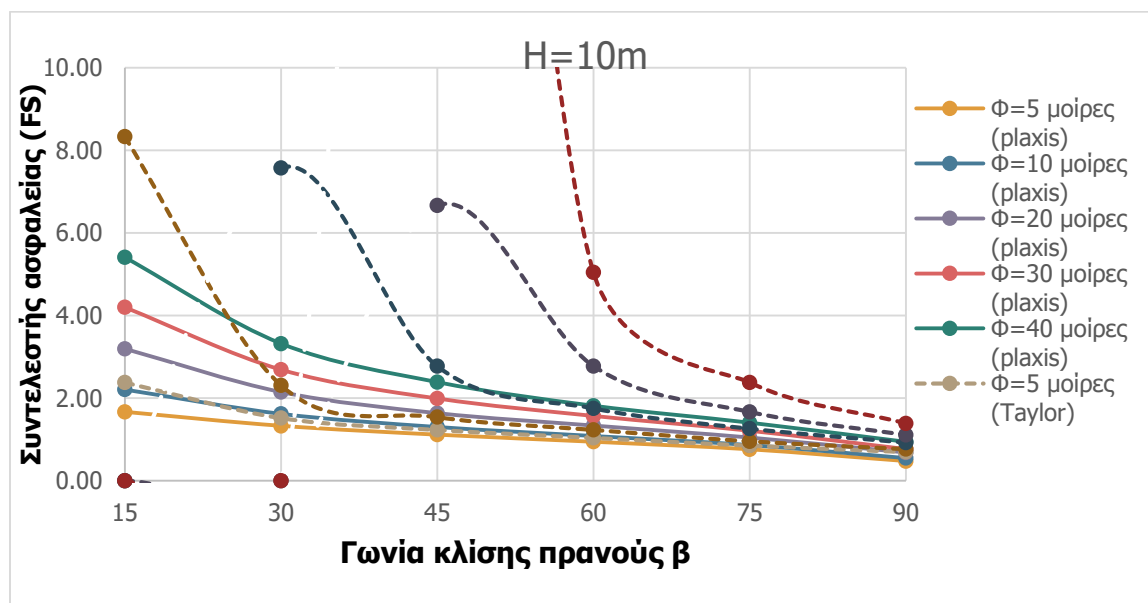
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	7.58	2.78	1.75	1.26	0.93
$FS_p(\alpha=0)$	3.20	2.15	1.64	1.34	1.05	0.69
$\alpha=0.08g$	2.38	1.81	1.44	1.19	0.48	0
$\alpha=0.12g$	2.10	1.67	1.36	1.13	0.32	0
$\alpha=0.18g$	1.79	1.48	1.23	1.04	0.18	0
FS_T/FS_p	-	3.53	1.70	1.31	1.2	1.35

Πίνακας 5.16 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=30^\circ$

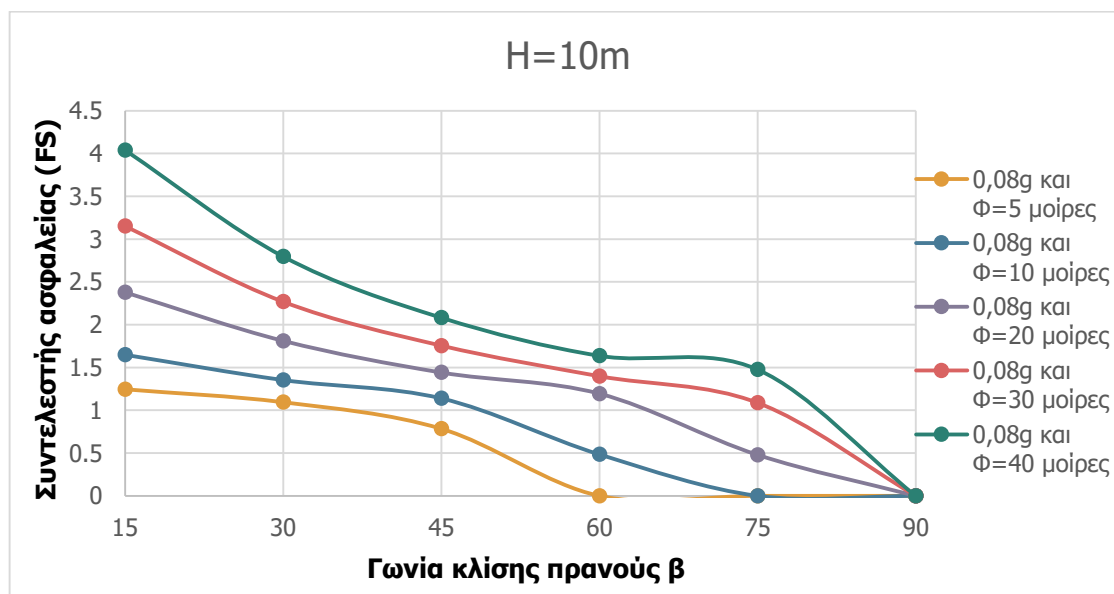
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	-	6.67	2.78	1.67	1.11
$FS_p(\alpha=0)$	4.20	2.69	1.99	1.57	1.21	0.77
$\alpha=0.08g$	3.15	2.27	1.76	1.40	1.09	0
$\alpha=0.12g$	2.79	2.11	1.65	1.32	1.03	0
$\alpha=0.18g$	2.37	1.87	1.50	1.21	0.80	0
FS_T/FS_p	-	-	3.35	1.77	1.38	1.44

Πίνακας 5.17 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=10m και $\phi=40^\circ$

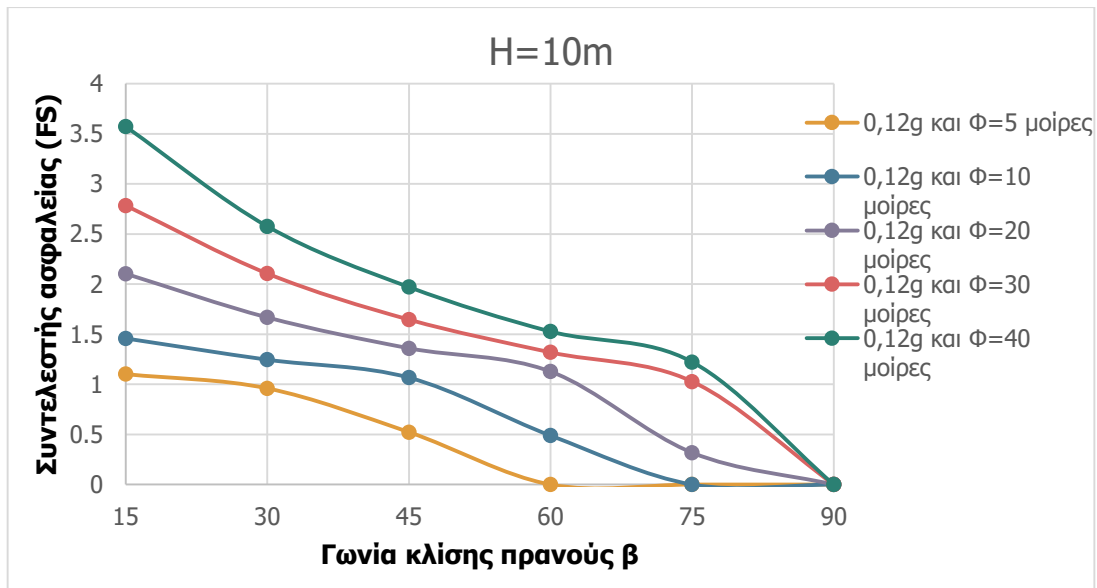
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	-	-	27.78	5.05	2.38	1.39
$FS_p(a=0)$	5.41	3.32	2.39	1.82	1.41	0.95
$a=0.08g$	4.04	2.80	2.08	1.64	1.48	0
$a=0.12g$	3.57	2.58	1.97	1.53	1.22	0
$a=0.18g$	3.03	2.28	1.79	1.40	1.09	0
FS_T/FS_p	-	-	11.62	2.77	1.69	1.46



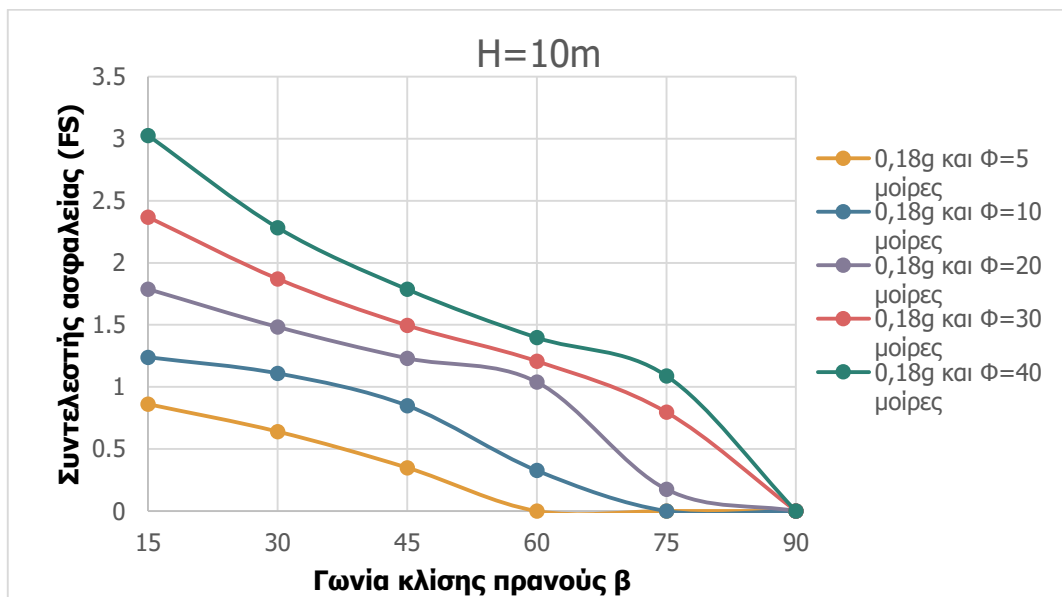
Εικόνα 5.32 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό στατικές συνθήκες κατά Taylor και Plaxis για H=10m και $c=30 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 5.33 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=10m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και σεισμική επιτάχυνση 0.08g



Εικόνα 5.34 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=10m και $c=30\text{kN/m}^2$ και 0.12g



Εικόνα 5.35 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=10m και $c=30\text{ kN/m}^2$ και 0.18g

Με βάση τους πίνακες και τα διαγράμματα, προκύπτουν τα εξής παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), τόσο υπό στατικές όσο και υπό σεισμικές συνθήκες. Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες των πρανών τόσο πιο ασταθές είναι.

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS) αυξάνεται όσο μεγαλώνει η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής το έδαφος του πρανούς εμφανίζεται πιο σταθερό
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS) μειώνεται ενώ αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής της σεισμικής επιτάχυνσης επειδή μειώνεται η συνοχή του εδάφους.
- Με βάση τους πίνακες και τον λόγο FS_T/FS_p η μικρότερη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας παρατηρείται για γωνία κλίσης του πρανού $\beta=60^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=5^\circ$. Ο λόγος FS_T/FS_p ισούται με 1.09. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για γωνία κλίσης πρανού $\beta=45^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$, ο λόγος ισούται με 11.62. Για μικρότερες γωνίες τριβής και μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρανού οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν με βάση το Taylor και το λογισμικό Plaxis παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση.

Στους παρακάτω πίνακες και στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας (FS), για συνοχή $c=30\text{kN/m}^2$ και ίδιες γωνίες τριβής (ϕ), αλλά για ύψος πρανού 20 μέτρων ($H=20\text{m}$).

Πίνακας 5.18 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=20\text{m}$ και $\phi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	1.19	0.76	0.62	0.52	0.43	0.35
$FS_p(a=0)$	1.10	0.79	0.65	0.53	0.41	0.28
$a=0.08g$	0.26	0	0	0	0	0
$a=0.12g$	0.17	0	0	0	0	0
$a=0.18g$	0.12	0	0	0	0	0
FS_T/FS_p	1.08	0.96	0.95	0.98	1.05	1.25

Πίνακας 5.19 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=20\text{m}$ και $\phi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	4.17	1.16	0.77	0.62	0.48	0.38
$FS_p(a=0)$	1.55	1.03	0.81	0.65	0.50	0.35
$a=0.08g$	1.16	0.17	0	0	0	0
$a=0.12g$	1.03	0.12	0	0	0	0
$a=0.18g$	0.72	0.08	0	0	0	0
FS_T/FS_p	2.69	1.13	0.95	0.95	0.96	1.09

Πίνακας 5.20 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=20m και $\varphi=20^\circ$

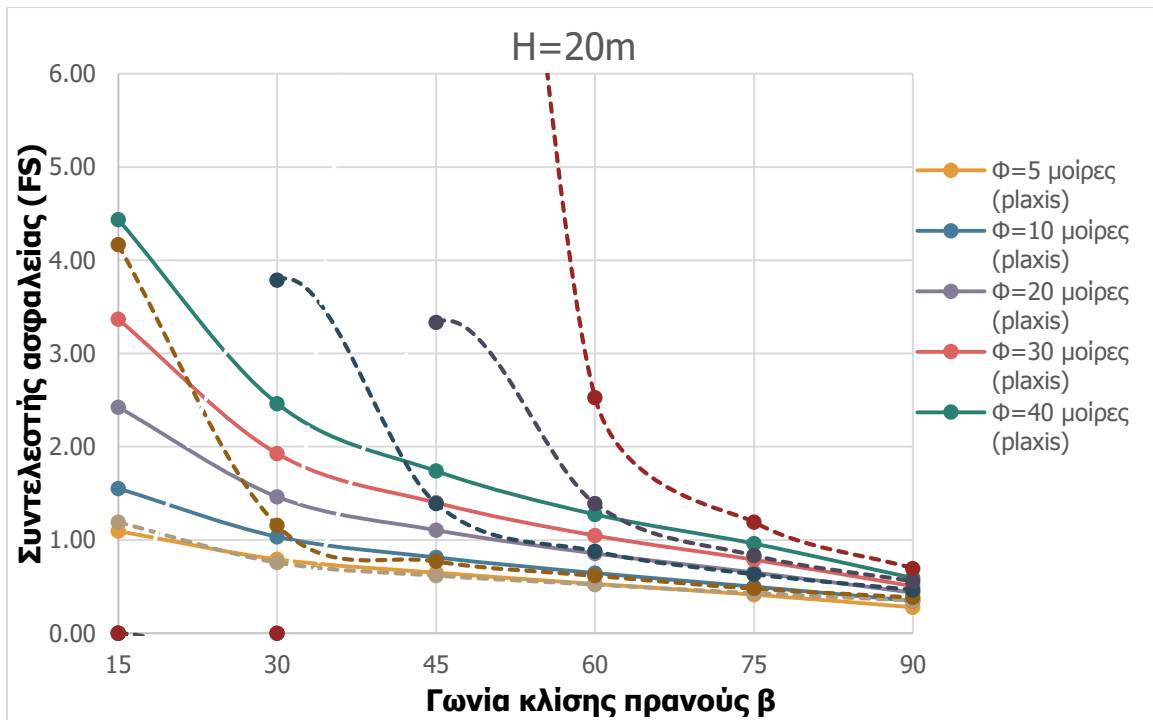
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	3.79	1.39	0.88	0.63	0.46
$FS_p(\alpha=0)$	2.42	1.46	1.11	0.86	0.65	0.44
$\alpha=0.08g$	1.83	1.24	0.87	0	0	0
$\alpha=0.12g$	1.61	1.16	0.66	0	0	0
$\alpha=0.18g$	1.37	1.04	0.44	0	0	0
FS_T/FS_p	-	2.60	1.25	1.02	0.97	1.05

Πίνακας 5.21 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=20m και $\varphi=30^\circ$

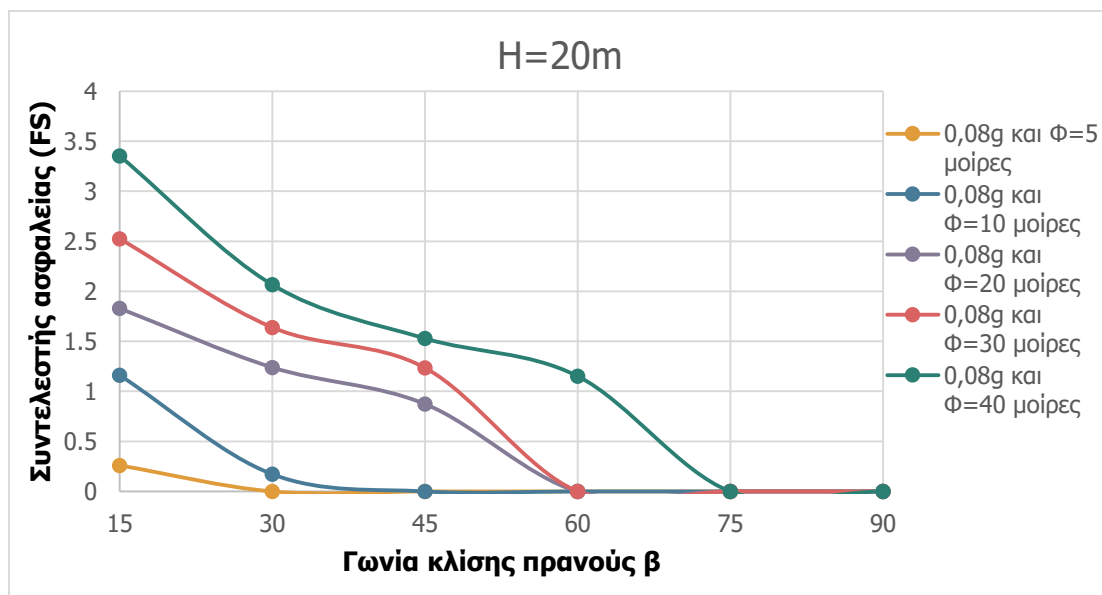
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	-	3.33	1.39	0.83	0.56
$FS_p(\alpha=0)$	3.37	1.93	1.40	1.05	0.79	0.50
$\alpha=0.08g$	2.53	1.64	1.24	0	0	0
$\alpha=0.12g$	2.24	1.53	1.17	0	0	0
$\alpha=0.18g$	1.90	1.35	1.07	0	0	0
FS_T/FS_p	-	-	2.38	1.32	1.05	1.12

Πίνακας 5.22 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=20m και $\varphi=40^\circ$

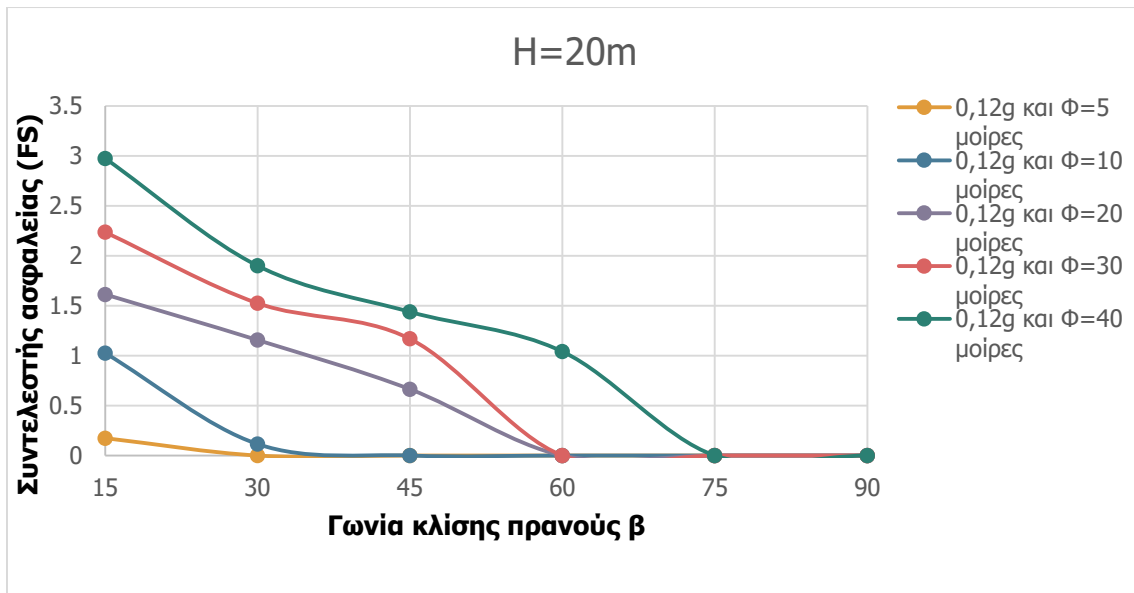
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(\alpha=0)$	-	-	13.89	2.53	1.19	0.69
$FS_p(\alpha=0)$	4.44	2.46	1.74	1.27	0.96	0.59
$\alpha=0.08g$	3.35	2.07	1.53	1.15	0	0
$\alpha=0.12g$	2.98	1.9	1.44	1.04	0	0
$\alpha=0.18g$	2.51	1.69	1.31	0.94	0	0
FS_T/FS_p	-	-	7.98	1.99	1.24	1.17



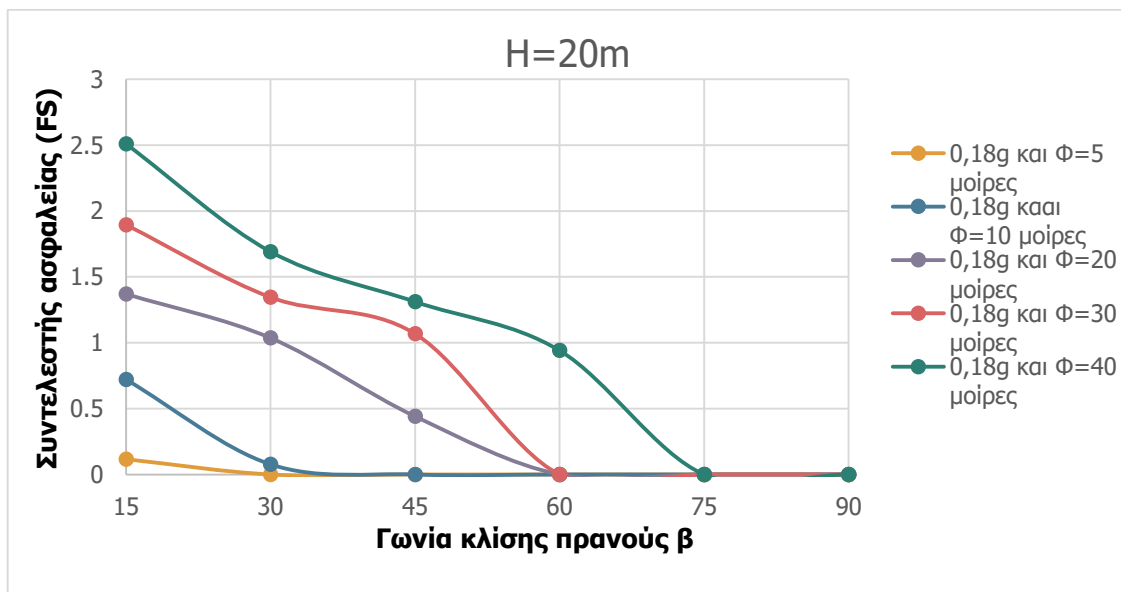
Εικόνα 5.36 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό στατικές συνθήκες για $H=20m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 5.37 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=20m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $0.08g$



Εικόνα 5.38 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=20m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και 0.12g



Εικόνα 5.39 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=20m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και 0.18g

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες πρανών το πρανές εμφανίζεται πιο ασταθές.

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής τόσο πιο σταθερό είναι το έδαφος από το οποίο αποτελείται το πρανές.
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης. Αυτό γίνεται επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του πρανούς λόγω σεισμικών φορτίων
- Με βάση τον λόγο FS_T/FS_p παρατηρήθηκε ότι η μικρότερη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας (κατά Taylor και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) παρουσιάστηκε για γωνία κλίσης πρανών $\beta=60^\circ$ και γωνία τριβής $\phi=5^\circ$ καθώς για κλίση πρανούς $\beta=60^\circ$ και γωνία τριβής $\phi=20^\circ$. Ο λόγος FS_T/FS_p ισούται με 0.98 και 1.02 αντίστοιχα για την κάθε περίπτωση. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρήθηκε για γωνία κλίσης πρανούς $\beta=45^\circ$ και γωνία τριβής $\phi=40^\circ$, ο λόγος FS_T/FS_p ισούται με 7.98. Συμπερασματικά για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρανούς και μικρότερες γωνίες τριβής οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τις καμπύλες Taylor και την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζουν μικρότερη απόκλιση. Για μεγαλύτερες γωνίες τριβής και μικρότερες γωνίες κλίσης πρανούς η απόκλιση των δύο μεθόδων αυξάνεται.
- Στις περιπτώσεις όπου οι συντελεστές ασφαλείας είναι μικρότεροι της μονάδας ($FS < 1$) τα πρανή χαρακτηρίζονται ως ασταθή.
- Στην περίπτωση όπου το πρανές έχει γωνία $\beta=45^\circ$ και εσωτερική τριβή $\phi=30^\circ$ και δεχθεί σεισμική επιτάχυνση 0.18g ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με 1.07. Υπάρχει οριακή ισορροπία στο πρανές άρα απαιτείται επιπλέον διερεύνηση της περιοχής.
- Οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων για ύψος πρανούς 20 μέτρων έχουν μειωθεί σε σύγκριση με τις αναλύσεις οι οποίες προέκυψαν για πρανή με ύψος $H=5\text{m}$ και $H=10\text{m}$. Άρα για υψηλότερα πρανή οι δύο μέθοδοι προσδιορισμού ασφαλείας συγκλίνουν περισσότερο όσον αφορά τα τελικά αποτελέσματα.

Στους παρακάτω πίνακες και στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας (FS), για δύναμη συνοχής $c=30\text{kN/m}^2$ και ίδιες γωνίες τριβής (ϕ), αλλά για ύψος πρανούς **40 μέτρων** ($H=40\text{m}$).

Πίνακας 5.23 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για $H=40\text{m}$ και $\phi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	0.60	0.38	0.31	0.26	0.21	0.18
$FS_p(a=0)$	0.77	0.52	0.41	0.32	0.26	0.17
$a=0.08g$	0	0	0	0	0	0
$a=0.12g$	0	0	0	0	0	0
$a=0.18g$	0	0	0	0	0	0
FS_T/FS_p	0.78	0.73	0.76	0.81	0.81	1.06

Πίνακας 5.24 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=40m και $\varphi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	2.08	0.58	0.39	0.31	0.24	0.19
$FS_p(a=0)$	1.20	0.73	0.55	0.43	0.33	0.22
$a=0.08g$	0.609	0	0	0	0	0
$a=0.12g$	0.406	0	0	0	0	0
$a=0.18g$	0.271	0	0	0	0	0
FS_T/FS_p	1.73	0.79	0.71	0.72	0.73	0.86

Πίνακας 5.25 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=40m και $\varphi=20^\circ$

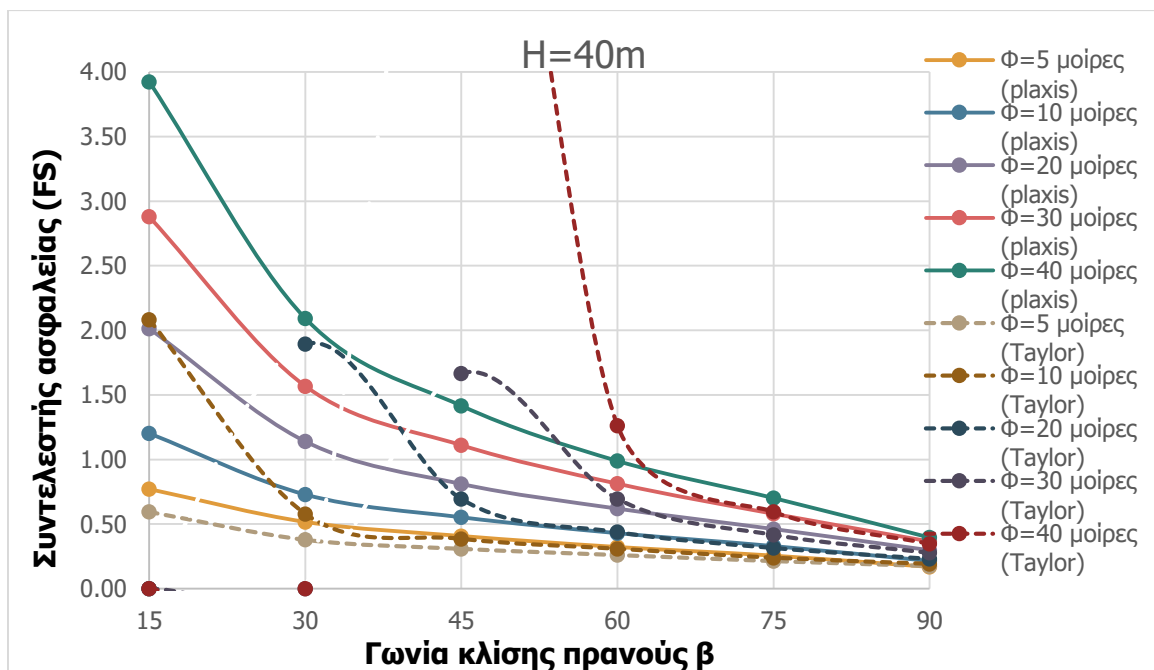
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	-	1.89	0.69	0.44	0.32	0.23
$FS_p(a=0)$	2.01	1.14	0.81	0.62	0.46	0.30
$a=0.08g$	1.504	0.958	0	0	0	0
$a=0.12g$	1.334	0.598	0	0	0	0
$a=0.18g$	0.973	0.402	0	0	0	0
FS_T/FS_p	-	1.66	0.85	0.71	0.70	0.77

Πίνακας 5.26 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για H=40m και $\varphi=30^\circ$

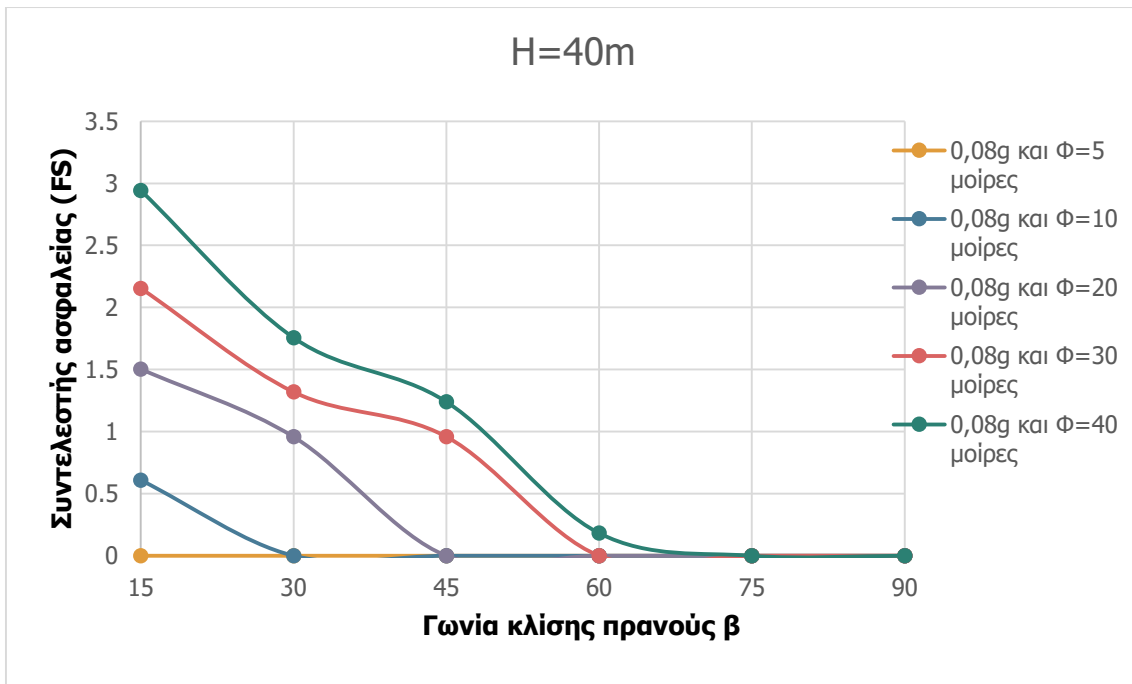
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	-	-	1.67	0.69	0.42	0.28
$FS_p(a=0)$	2.88	1.57	1.11	0.81	0.58	0.37
$a=0.08g$	2.154	1.319	0.959	0	0	0
$a=0.12g$	1.928	1.226	0.655	0	0	0
$a=0.18g$	1.609	1.09	0.433	0	0	0
FS_T/FS_p	-	-	1.5	0.85	0.72	0.76

Πίνακας 5.27 Συντελεστής ασφαλείας (FS) πρανούς για H=40m και φ=40°

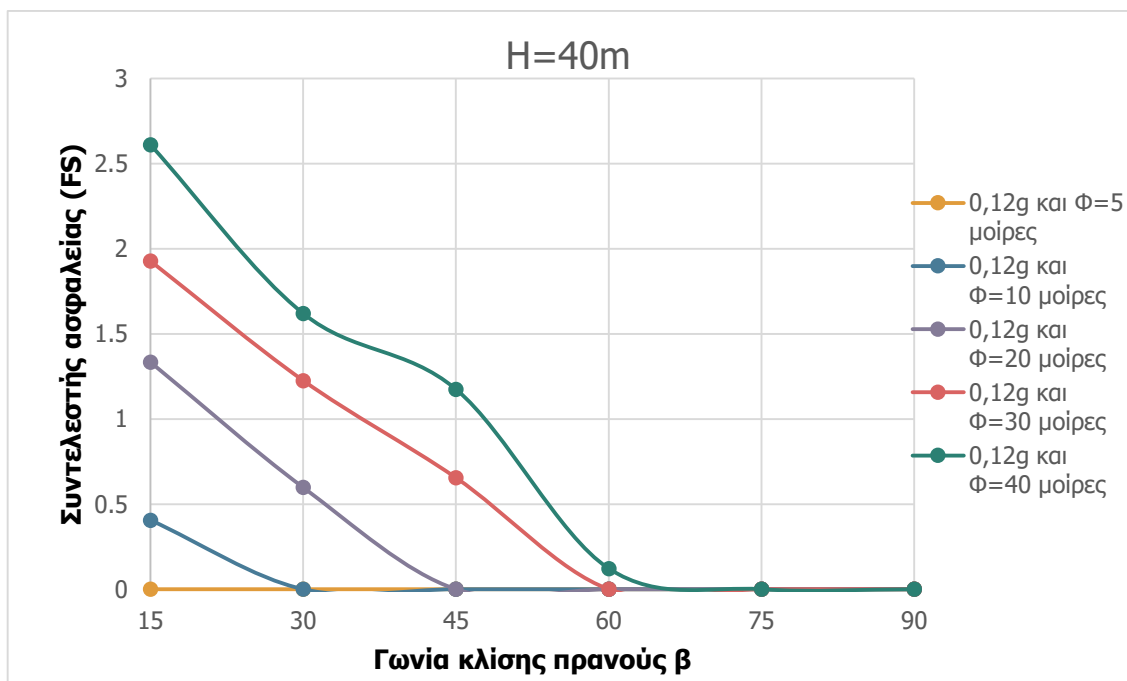
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$FS_T(a=0)$	-	-	6.94	1.26	0.60	0.35
$FS_p(a=0)$	3.92	2.09	1.42	0.99	0.70	0.40
$a=0.08g$	2.942	1.756	1.24	0.182	0	0
$a=0.12g$	2.611	1.62	1.175	0.122	0	0
$a=0.18g$	2.198	1.455	1.036	0.082	0	0
FS_T/FS_p	-	-	4.89	1.27	0.86	0.88



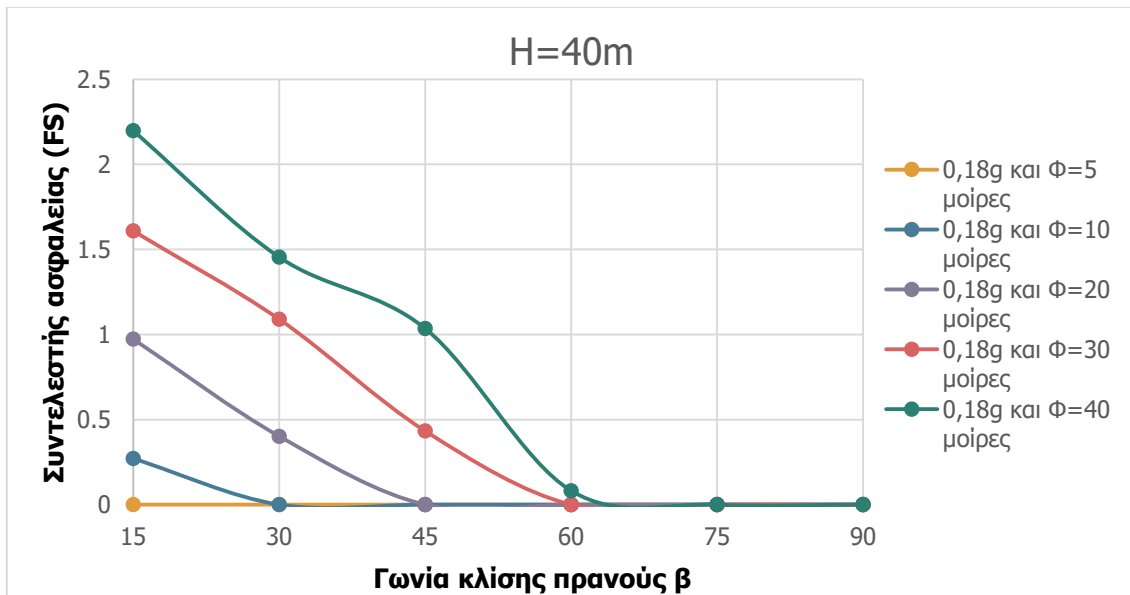
Εικόνα 5.40 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό στατικές συνθήκες για H=40m και $c=30 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 5.41 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=40m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και 0.08g



Εικόνα 5.42 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=40m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και 0.12g



Εικόνα 5.43 Συντελεστής ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=40m και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και 0.18g

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες πρανών το πρανές εμφανίζεται πιο ασταθές.
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή για μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής τόσο πιο σταθερό είναι το έδαφος από το οποίο αποτελείται το πρανές.
- Ο συντελεστής ασφαλείας (FS), μειώνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης. Αυτό γίνεται επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του πρανούς λόγω σεισμικών φορτίων
- Με βάση τον λόγο FS_T/FS_p παρατηρήθηκε ότι η μικρότερη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας (κατά Taylor και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) παρουσιάστηκε για γωνία κλίσης πρανών $\beta=75^\circ$ και γωνία τριβής $\phi=20^\circ$. Ο λόγος FS_T/FS_p ισούται με 0.70. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρήθηκε για γωνία κλίσης πρανούς $\beta=45^\circ$ και γωνία τριβής $\phi=40^\circ$, ο λόγος FS_T/FS_p ισούται με 4.89. Συμπερασματικά για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρανούς και μικρότερες γωνίες τριβής οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τις καμπύλες Taylor και την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζουν μικρότερη απόκλιση. Για μεγαλύτερες γωνίες τριβής και μικρότερες γωνίες κλίσης πρανούς η απόκλιση των δύο μεθόδων αυξάνεται. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων, αυξάνεται για μεγαλύτερες κλίσης πρανών και για μικρότερες γωνίες εσωτερικής τριβής.
- Οι διαφορές των αποτελεσμάτων των συντελεστών ασφαλείας για ύψος πρανούς 40 μέτρων, έχουν μειωθεί αρκετά σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις οι οποίοι

εκτελέστηκαν για ύψη πρανών 5,10 και 20 μέτρων. Για πρανή με μεγαλύτερο ύψος, οι δύο μέθοδοι προσδιορισμών συντελεστών ασφαλείας τείνουν να δώσουν κοινά αποτελέσματα από ότι για πρανή με μικρότερο ύψος

- Στις περισσότερες οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας που προέκυψαν για πρανή με ύψος 40 μέτρων είναι μικρότεροι της μονάδας ($FS < 1$). Χαρακτηρίζονται ως ασταθή εδαφικά πρανή
- Στην περίπτωση όπου τα πρανές έχει γωνία κλίσης $\beta = 90^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi = 5^\circ$ υπο στατικές συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει την τιμή 1.06. Άρα απαιτείται πρόσθετη ανάλυση και διερεύνηση της περιοχής λόγω της κατάστασης οριακής ισορροπίας του πρανού.

5.7 Υπολογισμός νέων αριθμών ευστάθειας

Επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε τον αριθμό ασφαλείας που αναλόγως θα έχει κάθε υπολογισμένος συντελεστής ασφαλείας από το Plaxis και τους συντελεστές ασφαλείας που αποδίδει το διάγραμμα Taylor με βάση τους αριθμούς ευστάθειας του πάνω πίνακα.

Μέσω της εφαρμογής της εξίσωσης Taylor για την κάθε περίπτωση υπολογίστηκε ένας δεδομένος αριθμός ευστάθειας (N_s), από τον δεδομένο συντελεστή ασφαλείας ο οποίος είχε υπολογιστεί αμέσως πιο πριν. Ο νέος συντελεστής ευστάθειας (N_s) που προέκυψε μέσω του λογισμικού συγκρίνονταν με τον συντελεστή ευστάθειας με βάση το διάγραμμα κατά Taylor, διατηρώντας την ίδια γωνία κλίσης του πρανού (β), το ύψος του (H) και την γωνία τριβής (φ). Αυτή η σύγκριση γινόταν μόνο έναντι στατικών φορτίσεων, λόγω του ότι οι καμπύλες Taylor προσδιορίζουν τους συντελεστές ευστάθειας και μέσω αυτών τους συντελεστές ασφαλείας μόνο για υπό στατικές συνθήκες.

Εξ' αρχής παρατηρείται πως το διάγραμμα Taylor δίνει γενικά υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας.

Με μια καλύτερη ματιά όμως παρατηρούμε αρκετά ακριβής τιμές για οριακές καταστάσεις αστοχίας και αστάθειας δηλαδή τιμών μικρότερων της μονάδας.

Παρακάτω προθέεται και η σύγκριση μέσω γραφημάτων.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ευστάθειας (N_s) για $H=5\text{m}$ και $c=30\text{kN/m}^2$. Οι αριθμοί ευστάθειας προκύπτουν με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$.

Πίνακας 5.30 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=5m και φ=5°

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.07	0.11	0.14	0.16	0.20	0.24
$N_{SP}(a=0)$	0.12	0.14	0.16	0.19	0.25	0.36
$a=0.08g$	0.18	0.19	0.19	0.22	0.29	-
$a=0.12g$	0.21	0.22	0.22	0.23	0.31	-
$a=0.18g$	0.26	0.27	0.27	0.27	0.40	-
N_{SP}/N_{ST}	1.71	1.27	1.14	1.19	1.25	1.5

Πίνακας 5.31 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=5m και φ=10°

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.02	0.07	0.11	0.14	0.17	0.22
$N_{SP}(a=0)$	0.1	0.13	0.15	0.17	0.24	0.32
$a=0.08g$	0.14	0.15	0.17	0.20	0.27	-
$a=0.12g$	0.16	0.17	0.18	0.21	0.29	-
$a=0.18g$	0.20	0.21	0.21	0.23	0.33	-
N_{SP}/N_{ST}	5	1.86	1.36	1.21	1.41	1.45

Πίνακας 5.32 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=5m και φ=20°

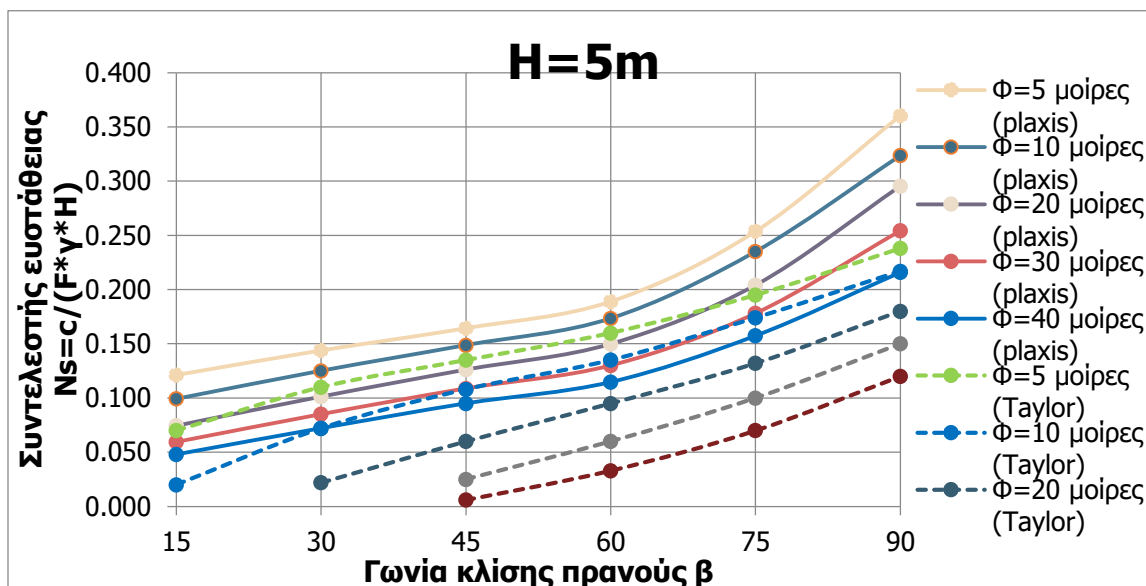
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0.02	0.06	0.1	0.13	0.18
$N_{SP}(a=0)$	0.07	0.10	0.13	0.15	0.20	0.30
$a=0.08g$	0.10	0.12	0.14	0.17	0.23	0.44
$a=0.12g$	0.12	0.13	0.15	0.18	0.25	0.61
$a=0.18g$	0.12	0.15	0.17	0.19	0.28	-
N_{SP}/N_{ST}	-	5	2.17	1.5	0.65	1.67

Πίνακας 5.33 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=5m και φ=30°

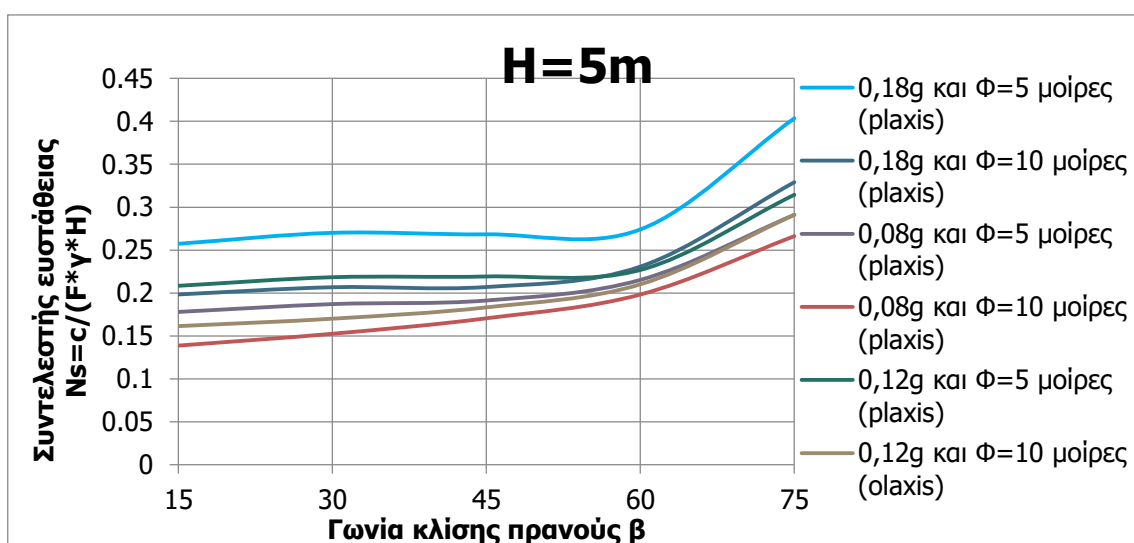
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.03	0.06	0.1	0.2
$N_{SP}(a=0)$	0.06	0.09	0.11	0.13	0.18	0.25
$a=0.08g$	0.08	0.1	0.12	0.15	0.2	0.5
$a=0.12g$	0.09	0.11	0.13	0.15	0.22	0.52
$a=0.18g$	0.11	0.12	0.14	0.17	0.24	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	3.67	2.17	1.8	1.25

Πίνακας 5.34 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=5m και φ=40°

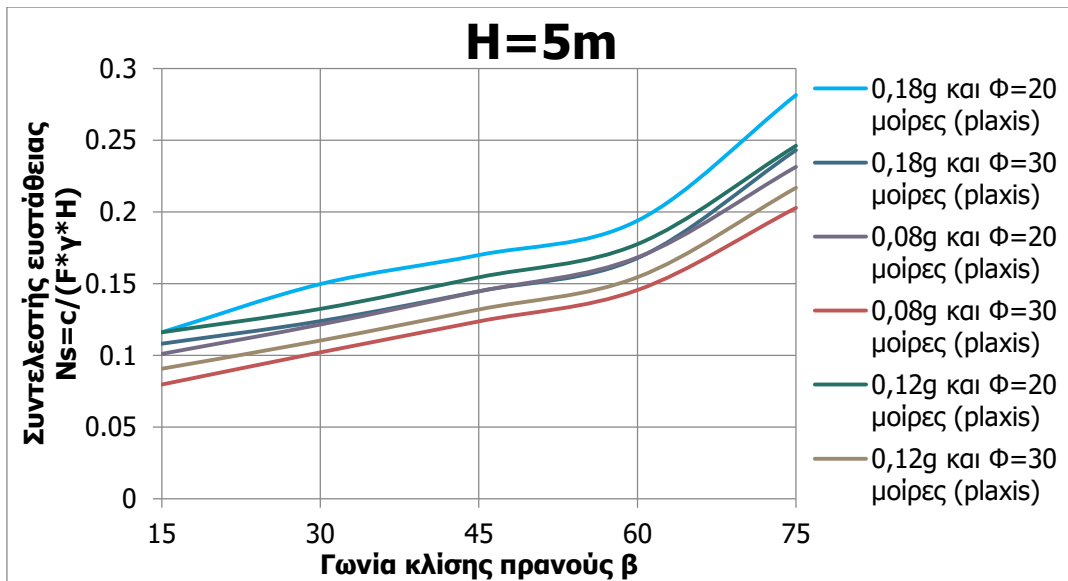
	β=15°	β=30°	β=45°	β=60°	β=75°	β=90°
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.01	0.03	0.07	0.12
$N_{SP}(a=0)$	0.05	0.07	0.1	0.12	0.16	0.22
a=0.08g	0.06	0.09	0.11	0.13	0.18	0.43
a=0.12g	0.07	0.09	0.12	0.14	0.19	0.6
a=0.18g	0.09	0.10	0.13	0.15	0.22	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	10	4	2.29	1.83



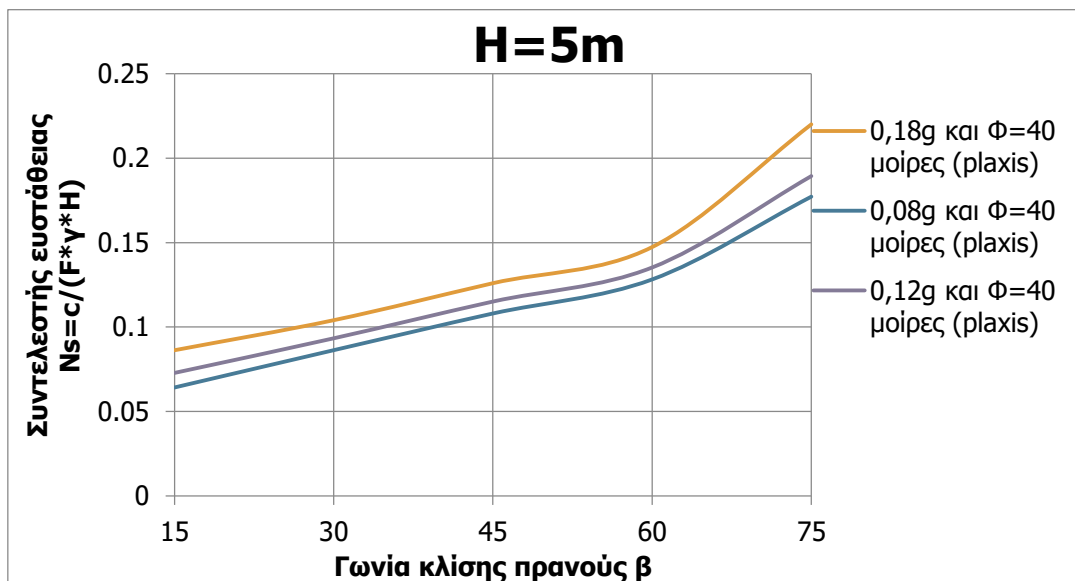
Εικόνα 5.44 Συντελεστής ευστάθειας (Ns) πρανούς υπό στατικές συνθήκες κατά Taylor και Plaxis για $c=30\text{kN/m}^2$ και $H=5\text{m}$



Εικόνα 5.45 Συντελεστής ευστάθειας (Ns) πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $c=30\text{kN/m}^2$ και $H=5\text{m}$ και φ=5° και φ=10°



Εικόνα 5.46 Συντελεστής ευστάθειας (N_s) πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $H=5\text{m}$ και $\phi=20^\circ$ και $\phi=30^\circ$



Εικόνα 5.47 Αριθμός ευστάθειας πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $c=30$ και $H=5\text{m}$ και $\phi=40^\circ$

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$ ο αριθμός ευστάθειας είναι αντιστρόφως ανάλογος του συντελεστή ασφαλείας.

- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική γωνία τριβής (φ), επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες εσωτερικής τριβής το πρηνές είναι πιο σταθερό
- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής που είναι ένα απολύτως λογικό αποτέλεσμα επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του εδάφους
- Οι αριθμός ευστάθειας οι οποίοι προκύπτουν υπό στατικές συνθήκες μέσω του λογισμικού στο Plaxis και μέσω των καμπυλών Taylor παρατηρήθηκε πως η μικρότερη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων σημειώνεται για $\beta=45^\circ$ και $\varphi=5^\circ$. Ο λόγος (N_{SP}/N_{ST}), τείνει προς τη μονάδα στην τιμή 1.15, ενώ η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται για $\beta=15^\circ$ για $\varphi=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ και $\beta=30^\circ$ για $\varphi=30^\circ$ και 40° , σε αυτές τις περιπτώσεις η διαίρεση λόγω της τιμής μηδέν στον παρονομαστή δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί.
- Οι τιμές των λόγων των συντελεστών ευστάθειας ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές των λόγων των συντελεστών ασφαλείας.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ευστάθειας (N_s) για $H=10\text{m}$ και $c=30\text{kN/m}^2$. Οι συντελεστές ευστάθειας προκύπτουν με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$.

Πίνακας 5.35 Αριθμός ευστάθειας (N_s) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.07	0.11	0.14	0.16	0.2	0.24
$N_{SP}(a=0)$	0.1	0.13	0.15	0.18	0.22	0.35
$a=0.08g$	0.13	0.15	0.21	-	-	-
$a=0.12g$	0.15	0.17	0.32	-	-	-
$a=0.18g$	0.19	0.26	0.48	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	1.43	1.18	1.07	1.13	1.1	1.46

Πίνακας 5.36 Αριθμός ευστάθειας (N_s) για $H=10\text{m}$ και $\varphi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.02	0.07	0.11	0.14	0.17	0.22
$N_{SP}(a=0)$	0.08	0.10	0.13	0.15	0.19	0.30
$a=0.08g$	0.10	0.12	0.15	0.34	-	-
$a=0.12g$	0.11	0.13	0.16	0.34	-	-
$a=0.18g$	0.13	0.15	0.20	0.51	-	-
N_{SP}/N_{ST}	4	1.43	1.18	1.07	1.11	1.36

Πίνακας 5.37 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=10 m και $\varphi=20^\circ$

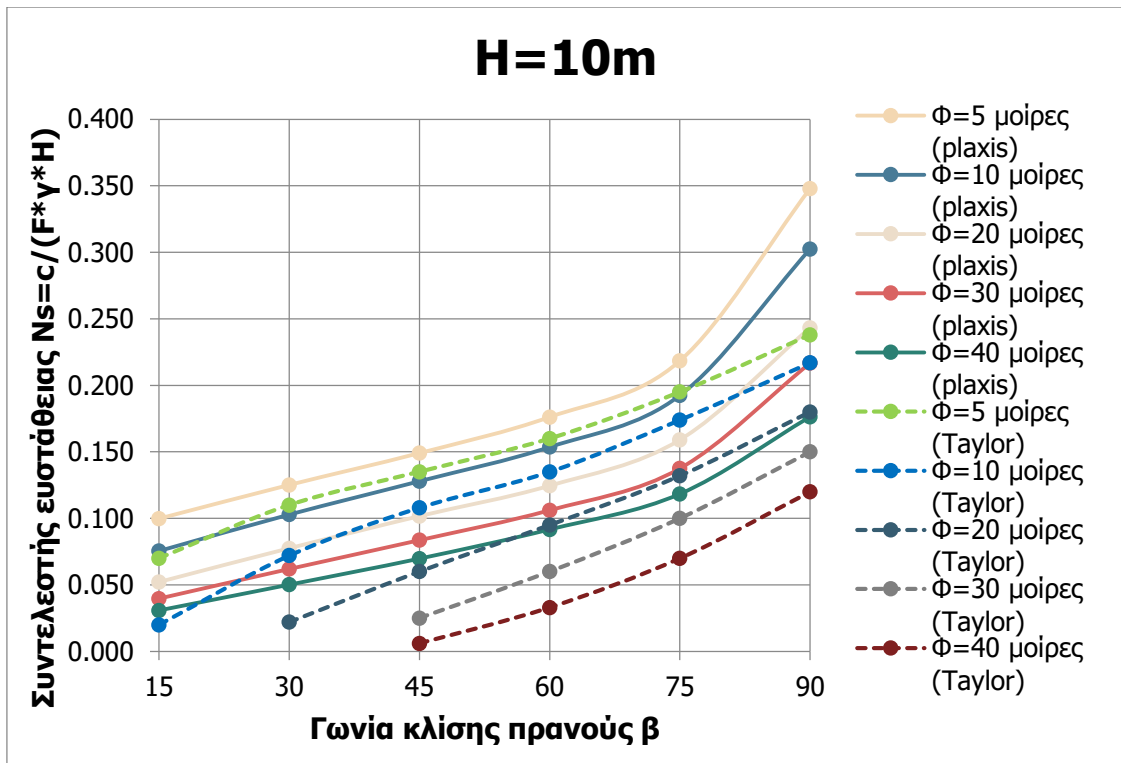
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0.02	0.06	0.1	0.13	0.18
$N_{SP}(a=0)$	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.24
$a=0.08g$	0.07	0.09	0.12	0.14	0.35	-
$a=0.12g$	0.08	0.1	0.12	0.15	0.52	-
$a=0.18g$	0.09	0.11	0.14	0.16	0.95	-
N_{SP}/N_{ST}	-	4	1.67	1.3	1.23	1.33

Πίνακας 5.38 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=10m και $\varphi=30^\circ$

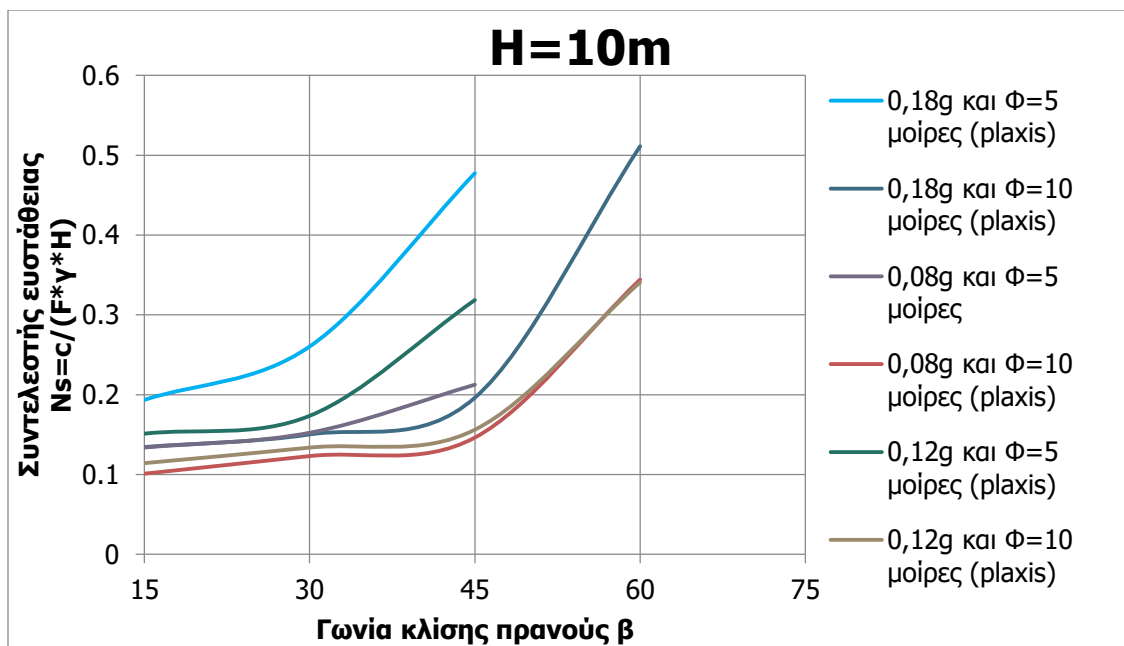
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.03	0.06	0.1	0.15
$N_{SP}(a=0)$	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.22
$a=0.08g$	0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	-
$a=0.12g$	0.06	0.08	0.10	0.13	0.16	-
$a=0.18g$	0.07	0.09	0.11	0.14	0.21	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	2.67	1.83	1.4	1.47

Πίνακας 5.39 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=10m και $\varphi=40^\circ$

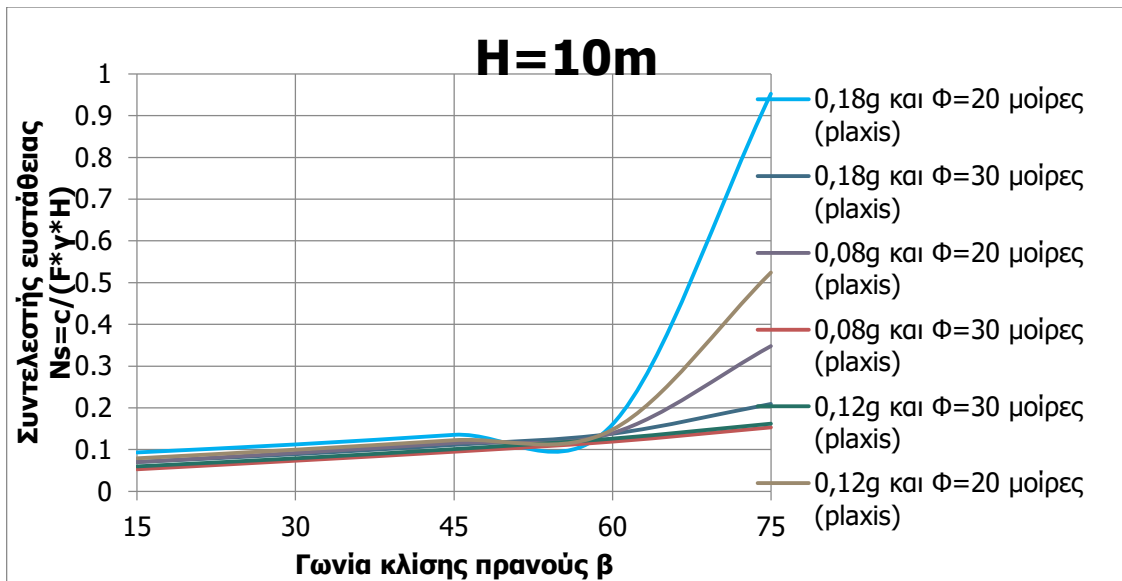
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.01	0.03	0.07	0.12
$N_{SP}(a=0)$	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.18
$a=0.08g$	0.04	0.06	0.08	0.10	0.11	-
$a=0.12g$	0.05	0.06	0.08	0.11	0.14	-
$a=0.18g$	0.06	0.07	0.09	0.12	0.15	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	7	3	1.71	1.5



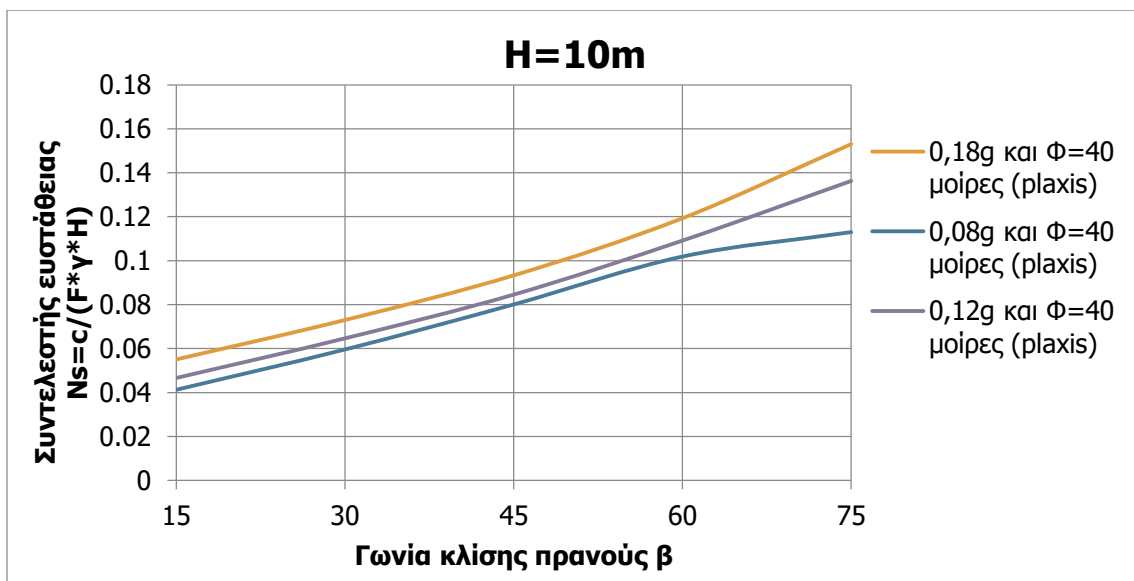
Εικόνα 5.48 Συντελεστής ευστάθειας (N_s) υπό στατικές συνθήκες για $H=10m$ και $c=30kN/m^2$



Εικόνα 5.49 Συντελεστής ευστάθειας (N_s) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=10m$ και $c=30 kN/m^2$ και $\phi=5^\circ$ και $\phi=10^\circ$



Εικόνα 5.50 Αριθμός ευστάθειας (Ns) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=10m και c=30 kN/m² και φ=20° και φ=30°



Εικόνα 5.51 Αριθμός ευστάθειας (Ns) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για H=10m και c=30 kN/m² και φ=40°

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Ο Αριθμός ευστάθειας (Ns), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή με βάση τον τύπο $Ns = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$ ο συντελεστής ευστάθειας είναι αντιστρόφος ανάλογος του συντελεστή ασφαλείας.

- Ο Αριθμός ευστάθειας (N_s), μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική γωνία τριβής (ϕ), επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες εσωτερικής τριβής το πρηνές είναι πιο σταθερό
- Ο Αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής που είναι ένα απολύτως λογικό αποτέλεσμα επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του εδάφους
- Με βάση τους συντελεστές ευστάθειας που προέκυψαν υπό στατικές με την μέθοδο Taylor και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) μέσω του λογισμικού Plaxis συμπεραίνεται ότι η μικρότερη τιμή μεταξύ των συντελεστών παρατηρείται για $\beta=45^\circ$ και $\phi=5^\circ$ καθώς επίσης και για $\beta=60^\circ$ και $\phi=10^\circ$. Ο λόγος N_{SP}/N_{ST} ισούται με 1.07. Αντιθέτως η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται για $\beta=15^\circ$ και $\phi=40^\circ$ και $\beta=30^\circ$ και $\phi=40^\circ$ και $\beta=15^\circ$ και $\phi=30^\circ$ και $\beta=30^\circ$ και $\phi=30^\circ$ και $\beta=15^\circ$ και $\phi=20^\circ$ όπου η διαίρεση εξαιτίας της τιμής μηδέν στον παρονομαστή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Άρα για μικρότερες γωνίες τριβής και μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρηνούς οι συντελεστές ευστάθειας που προκύπτουν από τις μεθόδους Taylor και (Μ.Π.Σ.) εμφανίζουν μικρότερη απόκλιση.
- Οι διαφορές στους συντελεστές ευστάθειας για ύψη πρηνών των 10 μέτρων, έχουν μειωθεί σημαντικά σε σχέση με τους συντελεστές ευστάθειας που προέκυψαν για ύψη πρηνών των 5 μέτρων, όπως φαίνεται από τις αριθμητικές τιμές των πηλίκων. Άρα για υψηλότερα πρηνή, οι δύο μέθοδοι προσδιορισμών συντελεστών ασφαλείας τείνουν να δώσουν κοινά αποτελέσματα, σε σχέση με τις μεθόδους προσδιορισμού σε μικρότερα πρηνή.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ευστάθειας (N_s) για $H=20\text{m}$ και $c=30\text{kN/m}^2$. Οι συντελεστές ευστάθειας προκύπτουν με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$.

Πίνακας 5.40 Αριθμός ευστάθειας (N_s) για $H=20\text{m}$ και $\phi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.07	0.11	0.14	0.16	0.2	0.24
$N_{SP}(a=0)$	0.08	0.11	0.13	0.16	0.20	0.3
$a=0.08g$	0.32	-	-	-	-	-
$a=0.12g$	0.48	-	-	-	-	-
$a=0.18g$	0.72	-	-	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	1.09	0.95	0.95	0.99	1.04	1.26

Πίνακας 5.41 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=20m και $\varphi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.02	0.07	0.11	0.14	0.17	0.22
$N_{SP}(a=0)$	0.05	0.08	0.10	0.13	0.17	0.24
$a=0.08g$	0.07	0.48	-	-	-	-
$a=0.12g$	0.08	0.73	-	-	-	-
$a=0.18g$	0.12	1.08	-	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	2.7	1.13	0.95	0.96	0.96	1.11

Πίνακας 5.42 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=20 m και $\varphi=20^\circ$

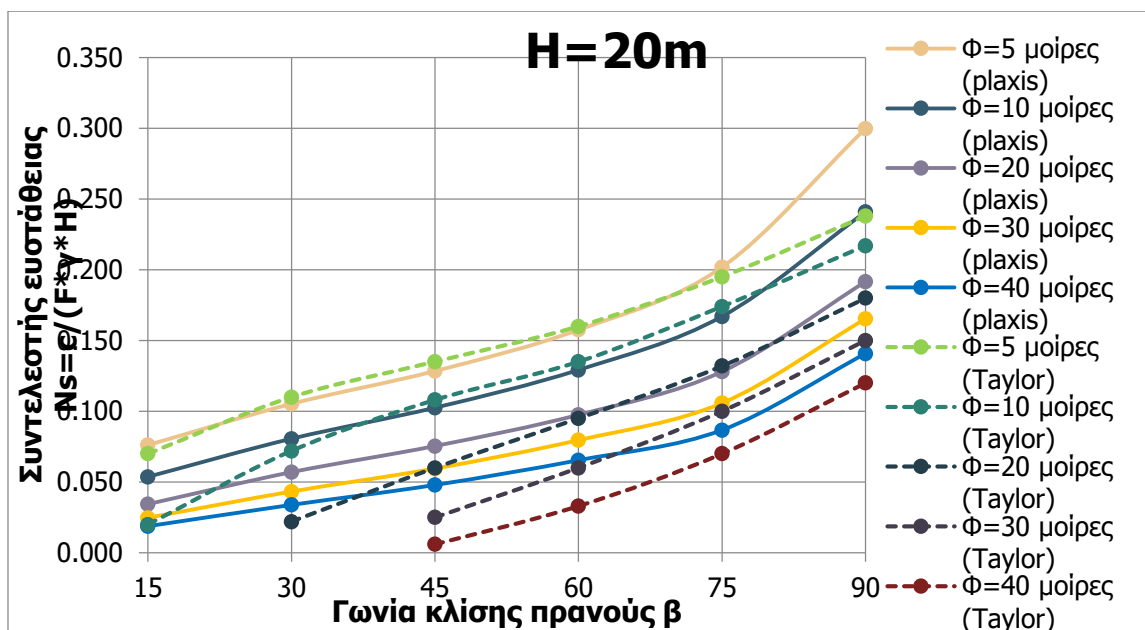
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0.02	0.06	0.1	0.13	0.18
$N_{SP}(a=0)$	0.03	0.06	0.08	0.1	0.13	0.19
$a=0.08g$	0.05	0.07	0.1	-	-	-
$a=0.12g$	0.05	0.07	0.13	-	-	-
$a=0.18g$	0.06	0.08	0.19	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	2.85	1.25	1.02	0.97	1.07

Πίνακας 5.43 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=20m και $\varphi=30^\circ$

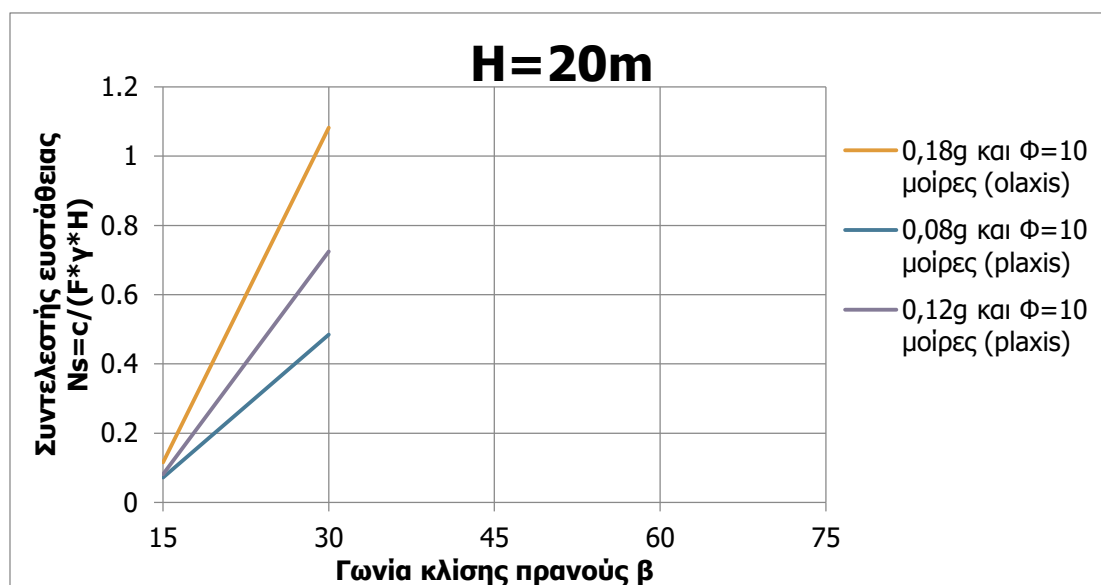
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.03	0.06	0.1	0.15
$N_{SP}(a=0)$	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.17
$a=0.08g$	0.03	0.05	0.07	-	-	-
$a=0.12g$	0.04	0.06	0.07	-	-	-
$a=0.18g$	0.04	0.06	0.08	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	2.4	1.33	1.06	1.1

Πίνακας 5.44 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=20m και $\varphi=40^\circ$

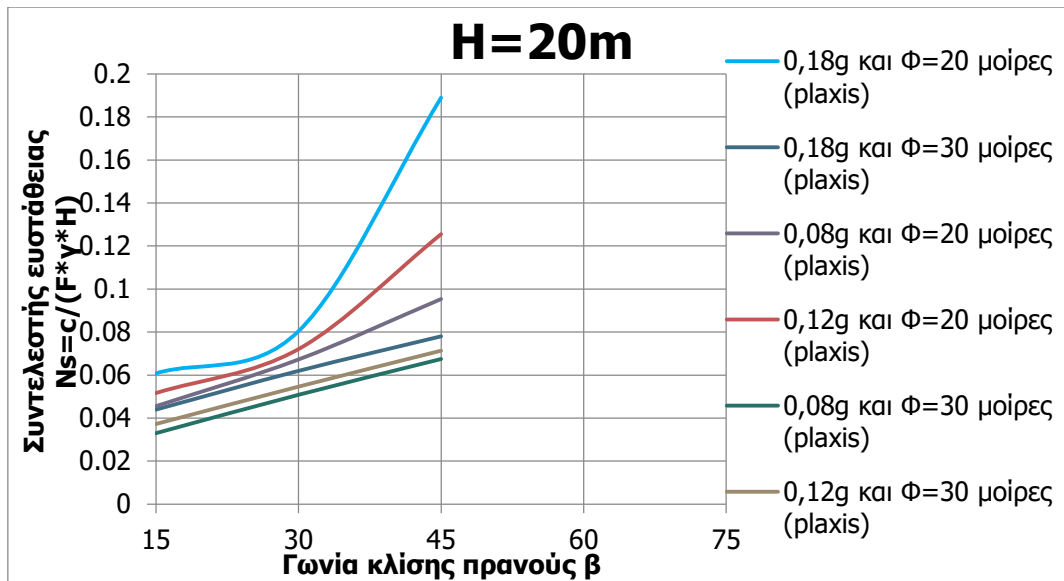
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.01	0.03	0.07	0.12
$N_{SP}(a=0)$	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.14
$a=0.08g$	0.03	0.040	0.05	0.07	-	-
$a=0.12g$	0.03	0.04	0.06	0.08	-	-
$a=0.18g$	0.03	0.05	0.06	0.09	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	8	1.97	1.24	1.18



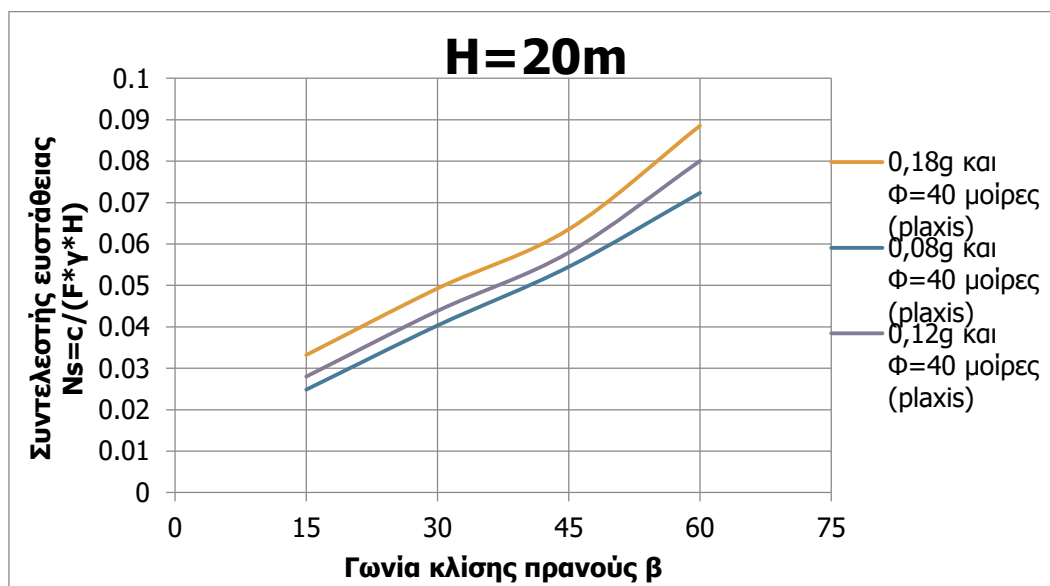
Εικόνα 5.52 Αριθμός ευστάθειας (N_s) υπό στατικές συνθήκες για $H=20m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 5.53 Αριθμός ευστάθειας πρανούς (N_s) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=20m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $\phi=10^\circ$



Εικόνα 5.54 Αριθμός ευστάθειας πρανούς (N_s) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=10\text{m}$ και $c=30\text{ kN/m}^2$ και $\phi=20^\circ$ και $\phi=30^\circ$



Εικόνα 5.55 Αριθμός ευστάθειας πρανούς (N_s) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=20\text{m}$ και $c=30\text{ kN/m}^2$ και $\phi=40^\circ$

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Ο συντελεστής ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$ ο συντελεστής ευστάθειας είναι αντιστρόφως ανάλογος του συντελεστή ασφαλείας.

- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική γωνία τριβής (φ), επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες εσωτερικής τριβής το πρηνές είναι πιο σταθερό
- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής που είναι ένα απολύτως λογικό αποτέλεσμα επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του εδάφους λόγω σεισμικών φορτίων
- Με βάση τους αριθμούς ευστάθειας που προέκυψαν υπό στατικές με την μέθοδο Taylor και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) μέσω του λογισμικού Plaxis συμπεραίνεται ότι η μικρότερη μεταξύ των συντελεστών παρατηρείται για κλίση πρηνούς $\beta=60^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=5^\circ$. Ο λόγος (N_{SP}/N_{ST}) ισούται με 0.99. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται για γωνία κλίσης πρηνούς $\beta=15^\circ$ και $\beta=30^\circ$ και γωνίες εσωτερικής τριβής $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$ και $\varphi=40^\circ$, η διαίρεση εξαιτίας της τιμής μηδέν στον παρονομαστή δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί. Άρα για μικρότερες γωνίες τριβής και για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρηνούς οι συντελεστές ευστάθειας που προκύπτουν με την μέθοδο Taylor παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση με τους αντίστοιχους συντελεστές που προκύπτουν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για μεγαλύτερες γωνίες τριβής και μικρότερες γωνίες πρηνούς η απόκλιση μεταξύ των μεθόδων αυξάνεται.
- Οι τιμές των λόγων των συντελεστών ευστάθειας ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές των λόγων των συντελεστών ασφαλείας.
- Κάποιοι συντελεστές ευστάθειας (N_s), δεν μπόρεσαν να υπολογιστούν επειδή δεν είχαν υπολογιστεί και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας (FS), καθώς δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία υπολογισμού της παραμετρικής ανάλυσης

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ευστάθειας (N_s) για $H=40\text{m}$ και $c=30\text{kN/m}^2$. Οι συντελεστές ευστάθειας προκύπτουν με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$.

Πίνακας 5.45 Αριθμός ευστάθειας (N_s) για $H=40\text{m}$ και $\varphi=5^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.07	0.11	0.14	0.16	0.2	0.24
$N_{SP}(a=0)$	0.05	0.08	0.1	0.13	0.16	0.25
$a=0.08\text{g}$	-	-	-	-	-	-
$a=0.12\text{g}$	-	-	-	-	-	-
$a=0.18\text{g}$	-	-	-	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	0.77	0.74	0.76	0.81	0.84	1.04

Πίνακας 5.46 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=40m και $\varphi=10^\circ$

	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0.02	0.07	0.11	0.14	0.17	0.22
$N_{SP}(a=0)$	0.04	0.06	0.08	0.1	0.13	0.19
$a=0.08g$	0.07	-	-	-	-	-
$a=0.12g$	0.1	-	-	-	-	-
$a=0.18g$	0.15	-	-	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	1.75	0.79	0.69	0.72	0.72	0.89

Πίνακας 5.47 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=40m και $\varphi=20^\circ$

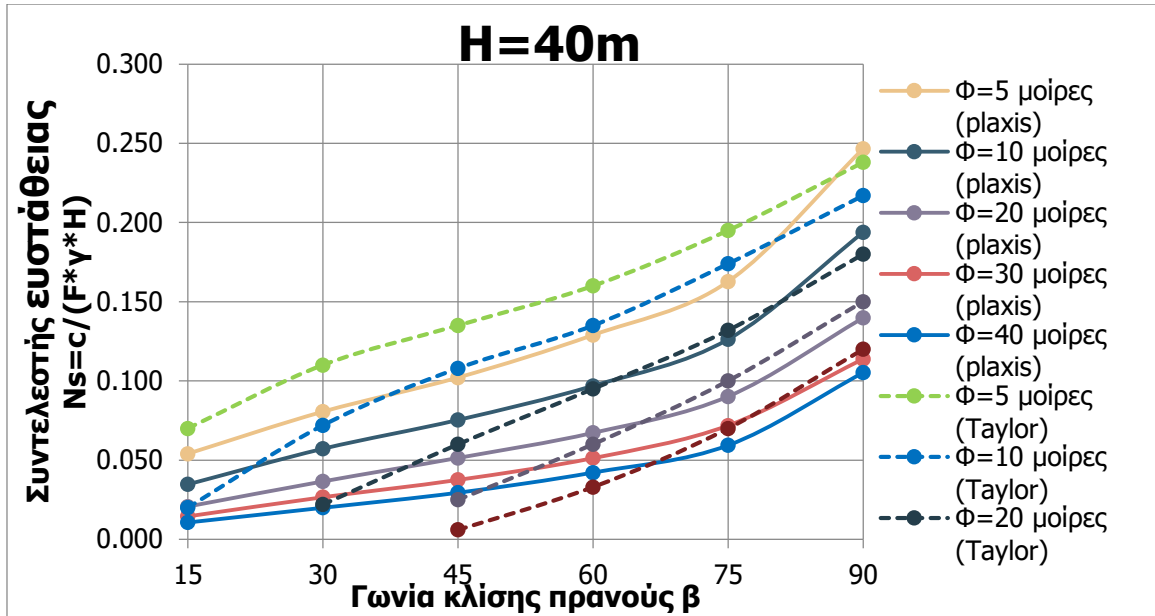
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0.02	0.06	0.1	0.13	0.18
$N_{SP}(a=0)$	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.14
$a=0.08g$	0.03	0.04	-	-	-	-
$a=0.12g$	0.03	0.07	-	-	-	-
$a=0.18g$	0.04	0.1	-	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	1.68	0.85	0.71	0.68	0.78

Πίνακας 5.48 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=40m και $\varphi=30^\circ$

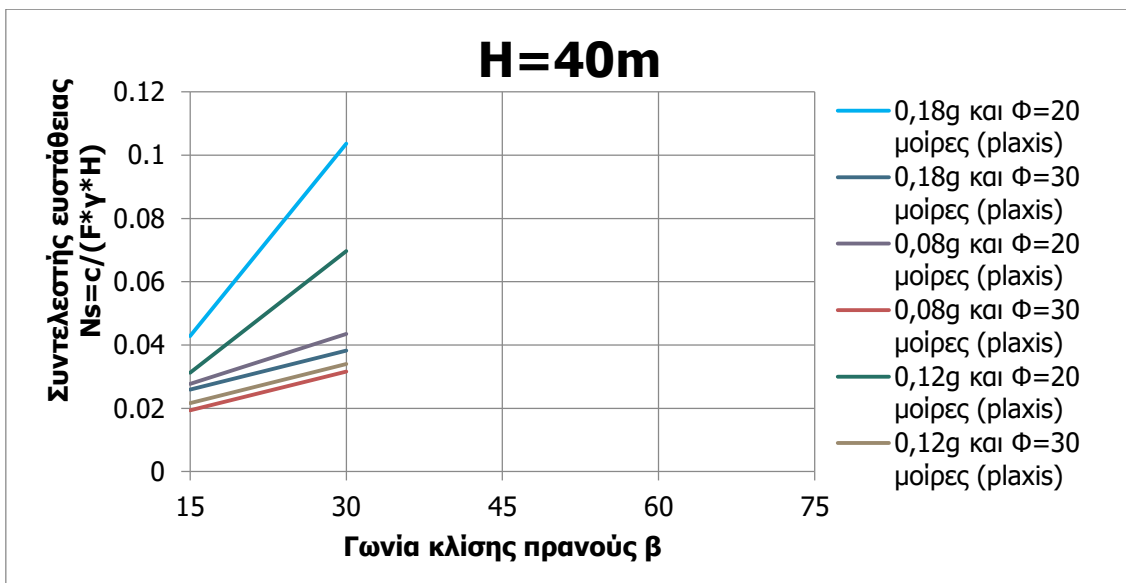
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.03	0.06	0.1	0.15
$N_{SP}(a=0)$	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.11
$a=0.08g$	0.02	0.03	0.04	-	-	-
$a=0.12g$	0.02	0.03	0.06	-	-	-
$a=0.18g$	0.03	0.04	0.1	-	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	1.52	0.85	0.72	0.76

Πίνακας 5.49 Αριθμός ευστάθειας (Ns) για H=40m και $\varphi=40^\circ$

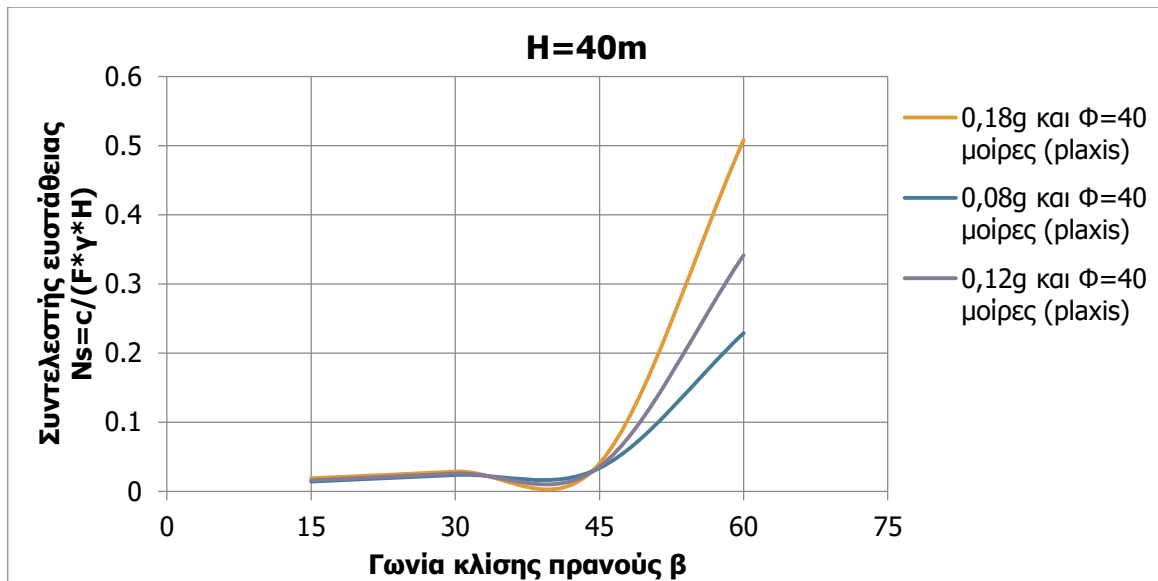
	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	$\beta=75^\circ$	$\beta=90^\circ$
$N_{ST}(a=0)$	0	0	0.01	0.03	0.07	0.12
$N_{SP}(a=0)$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.11
$a=0.08g$	0.01	0.02	0.03	0.23	-	-
$a=0.12g$	0.02	0.03	0.04	0.34	-	-
$a=0.18g$	0.02	0.03	0.04	0.51	-	-
N_{SP}/N_{ST}	-	-	4.83	1.27	0.84	0.88



Εικόνα 5.56 Αριθμός ευστάθειας (N_s) υπό στατικές συνθήκες για $H=40m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$



Εικόνα 5.57 Αριθμός ευστάθειας (N_s) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για $H=40m$ και $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $\phi=20^\circ$ και $\phi=30^\circ$



Εικόνα 5.58 Αριθμός ευστάθειας (N_s) υπό στατικές συνθήκες για $H=40m$ και $c=30 \text{ kN}/m^2$ και $\phi=40^\circ$

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του πρανούς (β), υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι λογικό επειδή με βάση τον τύπο $N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$ ο συντελεστής ευστάθειας είναι αντιστρόφος ανάλογος του συντελεστή ασφαλείας.
- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική γωνία τριβής (ϕ), επειδή όσο μεγαλύτερες είναι οι γωνίες εσωτερικής τριβής το πρανές είναι πιο σταθερό
- Ο αριθμός ευστάθειας (N_s), αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής που είναι ένα απολύτως λογικό αποτέλεσμα επειδή μειώνεται η δύναμη συνοχής του εδάφους λόγω σεισμικών φορτίων
- Με βάση τους αριθμών ευστάθειας που προέκυψαν υπό στατικές με την μέθοδο Taylor και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) μέσω του λογισμικού Plaxis συμπεραίνεται ότι η μικρότερη απόκλιση μεταξύ των συντελεστών παρατηρείται για κλίση πρανούς $\beta=75^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$. Ο λόγος (N_{SP}/N_{ST}) ισούται με 0.68. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται για γωνία κλίσης πρανούς $\beta=15^\circ$ και $\beta=30^\circ$ και για γωνίες εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$, $\phi=30^\circ$ και $\phi=40^\circ$, η διαίρεση εξαιτίας της τιμής μηδέν στον παρονομαστή δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί. Άρα για μικρότερες γωνίες τριβής και για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης πρανούς οι συντελεστές ευστάθειας που προκύπτουν με την μέθοδο Taylor παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση με τους αντίστοιχους συντελεστές που προκύπτουν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για μεγαλύτερες γωνίες τριβής και μικρότερες γωνίες πρανούς η απόκλιση μεταξύ των μεθόδων αυξάνεται.
- Οι τιμές των λόγων των αριθμών ευστάθειας ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές των λόγων των συντελεστών ασφαλείας.

- Κάποιοι αριθμοί ευστάθειας (Ns), δεν μπόρεσαν να υπολογιστούν επειδή δεν είχαν υπολογιστεί και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας (FS), καθώς δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία υπολογισμού της παραμετρικής ανάλυσης

5.8: Κατασκευή νέων διαγραμμάτων υπό ψευδοστατικές συνθήκες

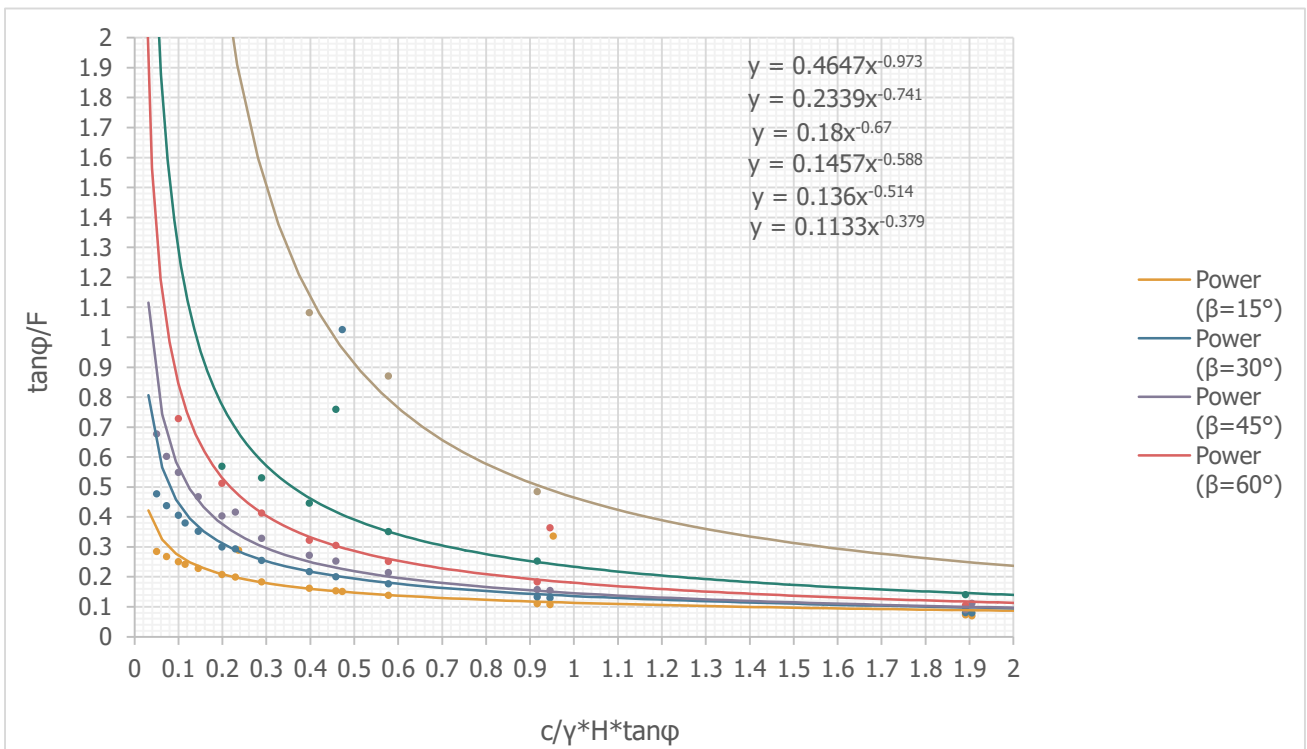
5.8.1 Αποτελέσματα με αρχική επιτάχυνση $a=0.08g$

<i>Parameters</i>				<i>FoS (plaxis) a=0.08g</i>					
γ	c	H	phi	15	30	45	60	75	90
18	30	5	5	1.87	1.78	1.74	1.55	1.15	0.00
18	30	10	5	1.25	1.09	0.78	0.00	0.00	0.00
18	30	20	5	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
				15	30	45	60	75	90
18	30	5	10	2.40	2.18	1.95	1.68	1.25	0.00
18	30	10	10	1.65	1.35	1.14	0.48	0.00	0.00
18	30	20	10	1.16	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	10	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
				15	30	45	60	75	90
18	30	5	20	3.30	2.74	2.31	1.98	1.44	0.75
18	30	10	20	2.38	1.81	1.44	1.19	0.48	0.00
18	30	20	20	1.83	1.24	0.87	0.00	0.00	0.00
18	30	40	20	1.50	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00
				15	30	45	60	75	90
18	30	5	30	4.18	3.26	2.69	2.29	1.64	0.66
18	30	10	30	3.15	2.27	1.76	1.40	1.09	0.00
18	30	20	30	2.53	1.64	1.24	0.00	0.00	0.00
18	30	40	30	2.15	1.32	0.96	0.00	0.00	0.00
				15	30	45	60	75	90
18	30	5	40	5.19	3.86	3.09	2.60	1.88	0.78
18	30	10	40	4.04	2.80	2.08	1.64	1.48	0.00
18	30	20	40	3.35	2.07	1.53	1.15	0.00	0.00
18	30	40	40	2.94	1.76	1.24	0.18	0.00	0.00

Πίνακας 5.50 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για αρχική επιτάχυνση 0.08g μέσω του λογισμικού Plaxis

$\beta=15^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$		$\beta=75^\circ$		$\beta=90^\circ$	
$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$
3.810017434	0.046735	3.810017434	0.049123	3.810017434	0.05022311	3.81001743	0.05651722	3.810017434	0.076409313	3.810017434	0
1.905008717	0.070272	1.905008717	0.079971	1.905008717	0.11159268	1.90500872	0	1.905008717	0	1.905008717	0
0.952504359	0.336495	0.952504359	0	0.952504359	0	0.95250436	0	0.952504359	0	0.952504359	0
0.476252179	0	0.476252179	0	0.476252179	0	0.47625218	0	0.476252179	0	0.476252179	0
1.890427273	0.073439	1.890427273	0.080736	1.890427273	0.09023899	1.89042727	0.1048941	1.890427273	0.140836247	1.890427273	0
0.945213637	0.106995	0.945213637	0.130323	0.945213637	0.15480859	0.94521364	0.36431194	0.945213637	0	0.945213637	0
0.472606818	0.151875	0.472606818	1.025157	0.472606818	0	0.47260682	0	0.472606818	0	0.472606818	0
0.236303409	0.289535	0.236303409	0	0.236303409	0	0.23630341	0	0.236303409	0	0.236303409	0
0.915825806	0.110361	0.915825806	0.132691	0.915825806	0.15790466	0.91582581	0.18382335	0.915825806	0.252757107	0.915825806	0.485293646
0.457912903	0.153057	0.457912903	0.200977	0.457912903	0.2525817	0.4579129	0.30483269	0.457912903	0.759854351	0.457912903	0
0.228956452	0.199	0.228956452	0.293761	0.228956452	0.41644192	0.22895645	0	0.228956452	0	0.228956452	0
0.114478226	0.242001	0.114478226	0.379927	0.114478226	0	0.11447823	0	0.114478226	0	0.114478226	0
0.577350269	0.138023	0.577350269	0.176884	0.577350269	0.21430968	0.57735027	0.25211802	0.577350269	0.351400042	0.577350269	0.870814886
0.288675135	0.183228	0.288675135	0.254564	0.288675135	0.32897451	0.28867513	0.41298303	0.288675135	0.531141002	0.288675135	0
0.144337567	0.228654	0.144337567	0.352258	0.144337567	0.4674901	0.14433757	0	0.144337567	0	0.144337567	0
0.072168784	0.268036	0.072168784	0.437718	0.072168784	0.60203365	0.07216878	0	0.072168784	0	0.072168784	0
0.397251198	0.161707	0.397251198	0.217271	0.397251198	0.2719934	0.3972512	0.32273063	0.397251198	0.446092308	0.397251198	1.082709202
0.198625599	0.207749	0.198625599	0.300107	0.198625599	0.40321943	0.1986256	0.51289709	0.198625599	0.568881106	0.198625599	0
0.099312799	0.250253	0.099312799	0.406147	0.099312799	0.54878982	0.0993128	0.7283851	0.099312799	0	0.099312799	0
0.0496564	0.285214	0.0496564	0.477847	0.0496564	0.67669325	0.0496564	4.61043753	0.0496564	0	0.0496564	0

Πίνακας 51 Υπολογισμός παραμέτρων για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση (0.08g)



Εικόνα 5.59 Διάγραμμα παραγωγής εκθετικών εξισώσεων για διάφορες τιμές γωνιών κλίσης του πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση (0.08g)

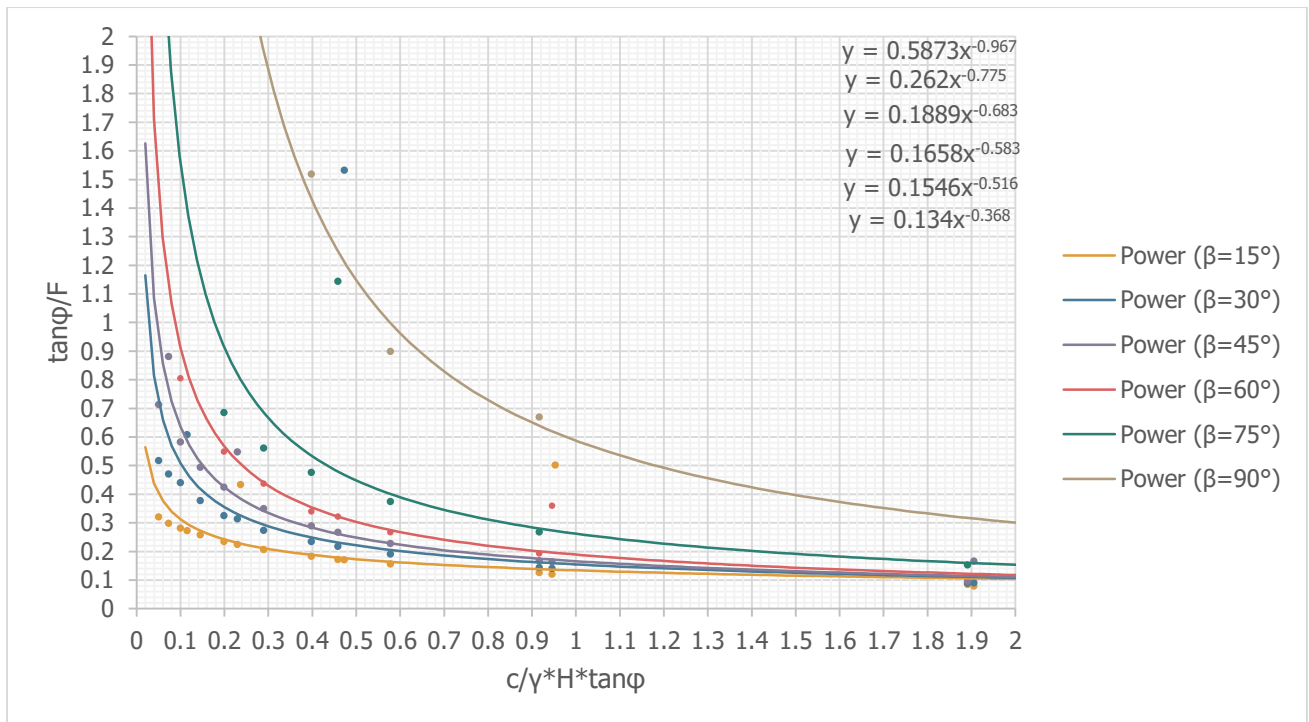
5.8.2 Αποτελέσματα με αρχική επιτάχυνση $\alpha=0.12g$

<i>Parameters</i>					<i>FoS (plaxis) $\alpha=0.12g$</i>					
γ	c	H	phi		15	30	45	60	75	90
18	30	5	5		1.60	1.53	1.52	1.47	1.06	0.00
18	30	10	5		1.10	0.96	0.52	0.00	0.00	0.00
18	30	20	5		0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	10		2.06	1.96	1.82	1.59	1.15	0.00
18	30	10	10		1.46	1.25	1.07	0.49	0.00	0.00
18	30	20	10		1.03	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	10		0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	20		2.87	2.52	2.16	1.88	1.35	0.54
18	30	10	20		2.10	1.67	1.36	1.13	0.32	0.00
18	30	20	20		1.61	1.16	0.66	0.00	0.00	0.00
18	30	40	20		1.33	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	30		3.68	3.02	2.53	2.16	1.54	0.64
18	30	10	30		2.79	2.11	1.65	1.32	1.03	0.00
18	30	20	30		2.24	1.53	1.17	0.00	0.00	0.00
18	30	40	30		1.93	1.23	0.66	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	40		4.58	3.57	2.90	2.46	1.76	0.55
18	30	10	40		3.57	2.58	1.97	1.53	1.22	0.00
18	30	20	40		2.98	1.90	1.44	1.04	0.00	0.00
18	30	40	40		2.61	1.62	1.18	0.12	0.00	0.00

Πίνακας 5.52 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για αρχική επιτάχυνση $0.12g$ μέσω του λογισμικού Plaxis

$\beta=15^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$		$\beta=75^\circ$		$\beta=90^\circ$	
c/ $\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$
3.810017434	0.054715	3.810017	0.057332	3.810017	0.057558	3.810017	0.059557	3.810017	0.082536	3.810017	0
1.905008717	0.079391	1.905009	0.091134	1.905009	0.167282	1.905009	0	1.905009	0	1.905009	0
0.952504359	0.502808	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0
0.476252179	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0
1.890427273	0.08543	1.890427	0.090009	1.890427	0.09699	1.890427	0.111177	1.890427	0.153997	1.890427	0
0.945213637	0.120938	0.945214	0.141514	0.945214	0.165255	0.945214	0.360587	0.945214	0	0.945214	0
0.472606818	0.171859	0.472607	1.533278	0.472607	0	0.472607	0	0.472607	0	0.472607	0
0.236303409	0.434303	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0
0.915825806	0.126775	0.915826	0.144605	0.915826	0.168661	0.915826	0.193911	0.915826	0.268811	0.915826	0.670295
0.457912903	0.17299	0.457913	0.218208	0.457913	0.267625	0.457913	0.322669	0.457913	1.14456	0.457913	0
0.228956452	0.225648	0.228956	0.314853	0.228956	0.548148	0.228956	0	0.228956	0	0.228956	0
0.114478226	0.272841	0.114478	0.608646	0.114478	0	0.114478	0	0.114478	0	0.114478	0
0.577350269	0.157102	0.57735	0.191112	0.57735	0.228654	0.57735	0.267664	0.57735	0.375635	0.57735	0.899299
0.288675135	0.207307	0.288675	0.274145	0.288675	0.35076	0.288675	0.437718	0.288675	0.561625	0.288675	0
0.144337567	0.258207	0.144338	0.37859	0.144338	0.494307	0.144338	0	0.144338	0	0.144338	0
0.072168784	0.299456	0.072169	0.470922	0.072169	0.881451	0.072169	0	0.072169	0	0.072169	0
0.397251198	0.18341	0.397251	0.234976	0.397251	0.289744	0.397251	0.340544	0.397251	0.476761	0.397251	1.520108
0.198625599	0.234845	0.198626	0.325611	0.198626	0.425723	0.198626	0.549509	0.198626	0.686099	0.198626	0
0.099312799	0.28205	0.099313	0.441631	0.099313	0.583519	0.099313	0.806052	0.099313	0	0.099313	0
0.0496564	0.321371	0.049656	0.517963	0.049656	0.714127	0.049656	6.877866	0.049656	0	0.049656	0

Πίνακας 5.53 Υπολογισμός παραμέτρων για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση ($0.12g$)



Εικόνα 5.60 Διάγραμμα παραγωγής εκθετικών εξισώσεων για διάφορες τιμές γωνιών κλίσης του πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση (0.12g)

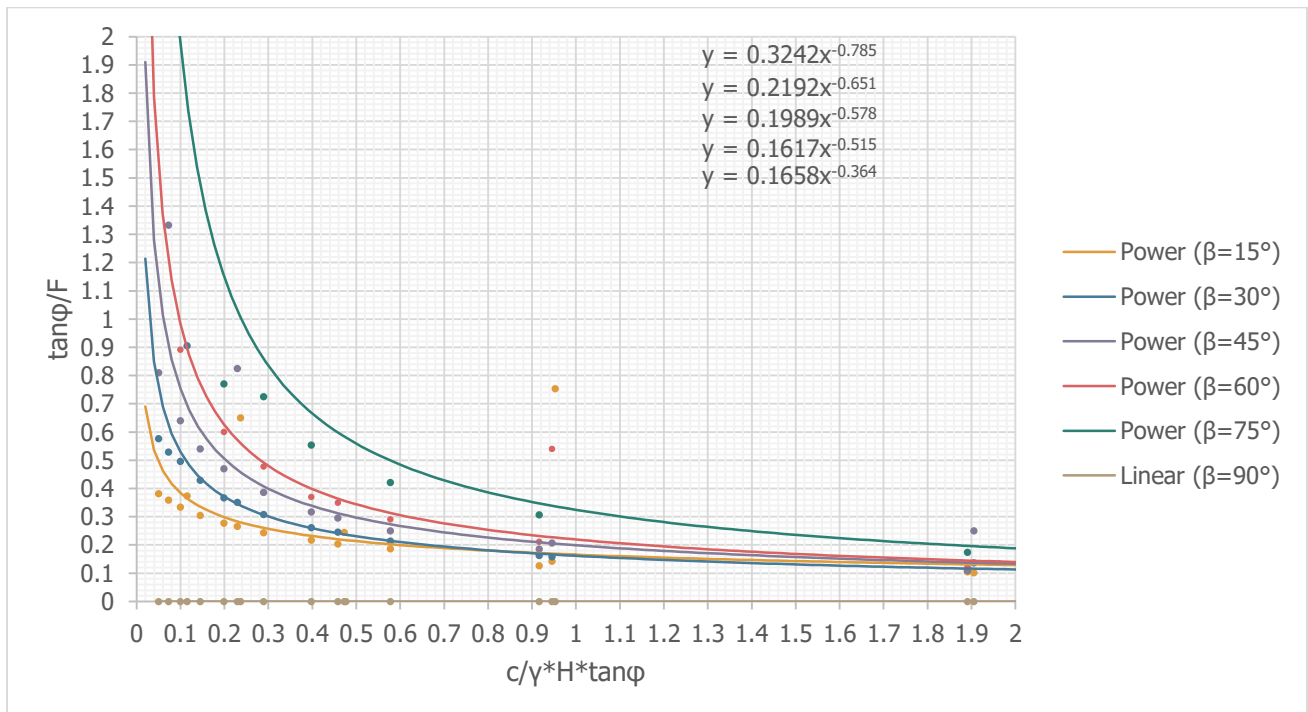
5.8.3 Αποτελέσματα με αρχική επιτάχυνση $a=0.18g$

<i>Parameters</i>					<i>FoS (plaxis) a=0.18g</i>					
γ	c	H	phi		15	30	45	60	75	90
18	30	5	5		1.30	1.23	1.24	1.22	0.83	0.00
18	30	10	5		0.86	0.64	0.35	0.00	0.00	0.00
18	30	20	5		0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	10		1.68	1.61	1.61	1.44	1.01	0.00
18	30	10	10		1.24	1.11	0.85	0.33	0.00	0.00
18	30	20	10		0.72	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
18	30	40	10		0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	20		2.87	2.23	1.96	1.72	1.18	0.00
18	30	10	20		1.79	1.48	1.23	1.04	0.18	0.00
18	30	20	20		1.37	1.04	0.44	0.00	0.00	0.00
18	30	40	20		0.97	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	30		3.08	2.69	2.30	1.99	1.37	0.00
18	30	10	30		2.37	1.87	1.50	1.21	0.80	0.00
18	30	20	30		1.90	1.35	1.07	0.00	0.00	0.00
18	30	40	30		1.61	1.09	0.43	0.00	0.00	0.00
					15	30	45	60	75	90
18	30	5	40		3.86	3.20	2.65	2.26	1.52	0.00
18	30	10	40		3.03	2.28	1.79	1.40	1.09	0.00
18	30	20	40		2.51	1.69	1.31	0.94	0.00	0.00
18	30	40	40		2.20	1.46	1.04	0.08	0.00	0.00

Εικόνα 5.54 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας (FS) υπό ψευδοστατικές συνθήκες για αρχική επιτάχυνση 0.18g μέσω του λογισμικού Plaxis

$\beta=15^\circ$		$\beta=30^\circ$		$\beta=45^\circ$		$\beta=60^\circ$		$\beta=75^\circ$		$\beta=90^\circ$	
$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$	$c/\gamma \cdot H \cdot \tan\phi$	$\tan\phi/F$
3.810017	0.067559	3.810017	0.070898	3.810017	0.070442	3.810017	0.071948	3.810017	0.105918	3.810017	0
1.905009	0.101613	1.905009	0.136701	1.905009	0.250684	1.905009	0	1.905009	0	1.905009	0
0.952504	0.754213	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0	0.952504	0
0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0	0.476252	0
1.890427	0.104957	1.890427	0.109384	1.890427	0.10952	1.890427	0.12211	1.890427	0.174064	1.890427	0
0.945214	0.142314	0.945214	0.158996	0.945214	0.207688	0.945214	0.54088	0.945214	0	0.945214	0
0.472607	0.244559	0.472607	2.289961	0.472607	0	0.472607	0	0.472607	0	0.472607	0
0.236303	0.650653	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0	0.236303	0
0.915826	0.126775	0.915826	0.163509	0.915826	0.185604	0.915826	0.211734	0.915826	0.307407	0.915826	0
0.457913	0.203563	0.457913	0.245428	0.457913	0.29567	0.457913	0.350308	0.457913	2.07983	0.457913	0
0.228956	0.265672	0.228956	0.351323	0.228956	0.825329	0.228956	0	0.228956	0	0.228956	0
0.114478	0.37407	0.114478	0.905399	0.114478	0	0.114478	0	0.114478	0	0.114478	0
0.57735	0.18733	0.57735	0.214628	0.57735	0.250695	0.57735	0.29071	0.57735	0.421116	0.57735	0
0.288675	0.243813	0.288675	0.308578	0.288675	0.385929	0.288675	0.478335	0.288675	0.725314	0.288675	0
0.144338	0.30467	0.144338	0.429257	0.144338	0.54059	0.144338	0	0.144338	0	0.144338	0
0.072169	0.358826	0.072169	0.529679	0.072169	1.333372	0.072169	0	0.072169	0	0.072169	0
0.397251	0.217215	0.397251	0.261973	0.397251	0.31712	0.397251	0.370955	0.397251	0.553861	0.397251	0
0.198626	0.277297	0.198626	0.367543	0.198626	0.469821	0.198626	0.600644	0.198626	0.770523	0.198626	0
0.099313	0.334436	0.099313	0.496215	0.099313	0.640045	0.099313	0.891711	0.099313	0	0.099313	0
0.049656	0.381756	0.049656	0.576701	0.049656	0.809942	0.049656	10.23292	0.049656	0	0.049656	0

Πίνακας 55 Υπολογισμός παραμέτρων για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση (0.18g)

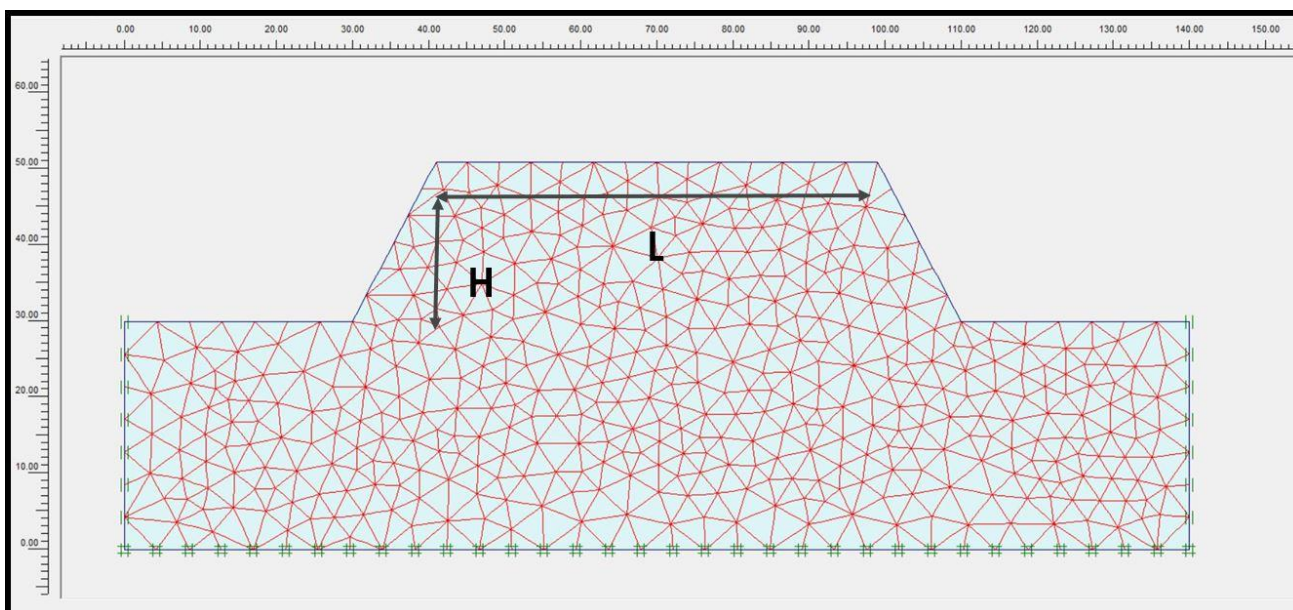


Εικόνα 5.61 Διάγραμμα παραγωγής εκθετικών εξισώσεων για διάφορες τιμές γωνιών κλίσης του πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες για σεισμική επιτάχυνση (0.18g)

Κεφάλαιο 6 Μελέτη ευστάθειας συμμετρικών επιχωμάτων

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής εξετάστηκε κατά πόσο ο συντελεστής ασφαλείας δύο συμμετρικών πρανών επηρεάζεται από την μεταξύ τους απόσταση. Για αυτό το λόγο στο λογισμικό Plaxis δημιουργήθηκε ένα μοντέλο το οποίο αποτελείται από δύο συμμετρικά πρανή.

Οι περιπτώσεις οι οποίες εξετάστηκαν όσον αφορά τον έλεγχο της ευστάθειάς τους υπό στατικές και υπό ψευδοστατικές συνθήκες είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που είδαμε και στην περίπτωση που είχαμε ένα πρανές. Τα συμμετρικά επιχώματα τα οποία εξετάστηκαν ταυτόχρονα για διάφορες περιπτώσεις ύψους, γωνιών κλίσης και γωνιών εσωτερικής τριβής είχαν συνοχή $c=30\text{kN/m}^2$. Τα δύο επιχώματα εξετάστηκαν για ύψη $H=5\text{m}$, 10m , 20m και 40m . Οι περιπτώσεις που πάρθηκαν για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης με το υπέδαφος είναι για $\beta=30^\circ$, 45° και 60° . Όσον αφορά τις γωνίες εσωτερικής τριβής οι τιμές που εξετάστηκαν για $\varphi=5^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$ και $\varphi=40^\circ$. Τα συμμετρικά πρανή στο μοντέλο για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις που να απέχουν μεταξύ τους $L=5H$ και $L=H$, όπου L : είναι η μεταξύ τους απόσταση και H είναι το ύψος τους.



Εικόνα 6.1 Γεωμετρία συμμετρικών πρανών

Πίνακας 6.1 Συντελεστές ασφαλείας για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=5^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30\text{kN/m}^2$ και $L=5H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	2.04	0.41	1.31	0.50
$\alpha=0.08g$	1.75	0	1.08	0
$\alpha=0.12g$	1.48	0	0.92	0
$\alpha=0.18g$	1.18	0	0.62	0

Πίνακας 6.2 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=10^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30\text{ kN/m}^2$ και $L=5H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	2.257	0.545	1.586	0.613
$\alpha=0.08g$	1.966	0	1.337	0
$\alpha=0.12g$	1.825	0	1.227	0
$\alpha=0.18g$	1.58	0	1.09	0

Πίνακας 6.3 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30\text{ kN/m}^2$ και $L=5H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	2.683	0.807	2.116	0.817
$\alpha=0.08g$	2.348	0	1.783	0
$\alpha=0.12g$	2.19	0	1.644	0
$\alpha=0.18g$	1.982	0	1.477	0

Πίνακας 6.4 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30\text{ kN/m}^2$ και $L=5H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	3.099	1.069	2.668	1.019
$\alpha=0.08g$	2.734	0.949	2.265	0.502
$\alpha=0.12g$	2.565	0.675	2.097	0.337
$\alpha=0.18g$	2.343	0.463	1.869	0.227

Πίνακας 6.5 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=5H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	3.598	1.4	3.309	1.192
$\alpha=0.08g$	3.194	1.213	2.801	1.096
$\alpha=0.12g$	3.006	1.104	2.602	1.024
$\alpha=0.18g$	2.733	1.006	2.334	0.939

Πίνακας 6.7 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=5^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	1.986	0.407	1.307	0.508
$\alpha=0.08g$	1.756	0	1.078	0
$\alpha=0.12g$	1.633	0	0.898	0
$\alpha=0.18g$	1.436	0	0.595	0

Πίνακας 6.8 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=10^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	2.208	0.546	1.592	0.624
$\alpha=0.08g$	1.955	0	1.337	0
$\alpha=0.12g$	1.821	0	1.23	0
$\alpha=0.18g$	1.648	0	1.09	0

Πίνακας 6.9 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	2.646	0.798	2.094	0.832
$\alpha=0.08g$	2.343	0	1.769	0
$\alpha=0.12g$	2.185	0	1.633	0
$\alpha=0.18g$	1.979	0	1.462	0

Πίνακας 6.10 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FSp	3.088	1.062	2.62	1.002
$a=0.08g$	2.724	0.928	2.221	0.518
$a=0.12g$	2.554	0.592	2.054	0.346
$a=0.18g$	2.324	0.408	1.836	0.23

Πίνακας 6.11 Συντελεστής ασφαλείας (FS) για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$, δύναμη συνοχής $c=30 \text{ kN/m}^2$ και $L=H$

	$\beta=45^\circ$		$\beta=30^\circ$	$\beta=60^\circ$
	H=5m	H=40m	H=10m	H=20m
FS	3.581	1.375	3.218	1.195
$a=0.08g$	3.133	1.202	2.715	1.042
$a=0.12g$	2.939	1.086	2.515	0.982
$a=0.18g$	2.672	0.979	2.258	0.934

Από τα παραπάνω ενδεικτικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας (FS) δεν επηρεάζεται σημαντικά όσο μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των επιχωμάτων. Η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας θεωρείται αμελητέα. Οι παραπάνω ιδιότητες αναφέρονται ταυτόχρονα και στα δύο επιχώματα. Το Plaxis εξετάζει ξεχωριστά το κάθε επίχωμα άρα η παρουσία του ενός δεν επηρεάζει το άλλο και ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι ίδιος και για τα δύο επιχώματα.

Για τα σεισμικά αποτελέσματα ενδεχομένως δεν υπήρξε διαφορά, πιθανώς λόγω της χρήσης της ψευδοστατικής μεθόδου διότι δεν μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα συντονισμού στα πρανή.

Κεφάλαιο 7 Εφαρμογή σε πρανές της Ικαρίας

Η Ικαρία βρίσκεται στο ανατολικό Αιγαίο με έκταση περίπου 270 τετραγωνικά χιλιόμετρα από τα οποία τα 160 τετραγωνικά χιλιόμετρα αποτελεί η ακτογραμμή της. Η Ικαρία βρίσκεται ανατολικά της Μυκόνου και δυτικά της Σάμου με βόρειο πλάτος $37^{\circ}40'40''$ και ανατολικό μήκος $26^{\circ}21'55''$. Νότια του νησιού βρίσκεται το σύμπλεγμα των νησιών Φούρνοι. Διοικητικά το νησί ανήκει στην περιφέρεια βορείου αιγαίου, ενώ αποτελεί το Δήμο Ικαρίας, με πρωτεύουσα τον Άγιο Κήρυκο. Ο πληθυσμός του νησιού με βάση την απογραφή του 2011 προσδιορίστηκε στους 8423 κατοίκους.

Η Ικαρία είναι γενικά ορεινό νησί, με έντονη γεωμορφολογία και αρκετές αντιθέσεις μεταξύ γυμνών απότομων βράχων και πράσινων πεδιάδων. Διασχίζεται από την οροσειρά του Αθέρα (Πράμνος), με διεύθυνση Α-Δ που εντοπίζεται στο κέντρο του νησιού με υψηλότερη κορυφή του είναι 1041 μέτρα (κορυφή Φαρδύ).

Η ακτογραμμή του νησιού παρουσιάζει γενικά μικρό οριζόντιο διαμελισμό με ελάχιστες εγκολπώσεις, ενώ δεν υπάρχουν αξιόλογοι όρμοι και φυσικά λιμάνια. Η βαθυμετρία του νησιού παρουσιάζει πολλές ασυμμετρίες, που φτάνουν μέχρι 1000 μέτρα βάθους στο βόρειο

τμήμα του νησιού. Το κλίμα του νησιού είναι σχετικά ήπιο, τύπου παράκτιου μεσογειακού, με αρκετές βροχοπτώσεις το χειμώνα και με πολύ ζέστη και ξηρασία τους καλοκαιρινούς μήνες. Όσον αφορά το κλίμα το κύριο χαρακτηριστικό του νησιού είναι οι ισχυροί άνεμοι που δρουν όλο το χρόνο, κατά τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες.

Στο νησί υπάρχει ένα εκτεταμένο υδρογραφικό δίκτυο, με πλούσια βλάστηση πέριξ του, με μεγάλη βιοποικιλότητα και αφθονία νερών. Στο νησί υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οικοτόπων που προστατεύονται από εθνικές και διεθνείς συμβάσεις. Τέλος λόγω της έντονης γεωμορφολογίας του νησιού αρκετά συχνά παρατηρούνται έντονες κατολισθήσεις κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες.



7.1 Γεωλογική δομή

Η γεωλογία του νησιού χαρακτηρίζεται από πετρώματα με ιδιαίτερους σχηματισμούς και γεωμορφές, με χαρακτηριστικές τεκτονικές και μικροτεκτονικές δομές, και με πλούτο ορυκτών και απολιθωμάτων.

Η Ικαρία, μαζί με τη Σάμο και το σύμπλεγμα των νήσων Φούρνοι ανήκει στο ανατολικό τμήμα της Απτικο-κυκλαδικής μάζας και αποτελείται κυρίως, από κρυσταλλοσχιστώδη, μεταμορφωμένα ή ημιμεταμορφωμένα πετρώματα.

Οι τρεις γεωτεκτονικές ενότητες από τις οποίες αποτελείται η Ικαρία είναι:

- Η κατώτερη ενότητα (ή ενότητα Ικαρίας) που συνίσταται από ένα γνευσιακό υπόβαθρο και αποτελείται από ορθογνευσίους και παραγνευσίους στο οποίο αναπτύσσεται σχηματισμός μαρμάρων σχιστολίθων. Επικείμενα του υποβάθρου απαντώνται με τα ιζήματα πλατφόρμας, όμοια με την κατώτερη ενότητα των Κυκλάδων και την Πελαγονική ζώνη της ηπειρωτικής Ελλάδας. Μέσα στα μεταμορφωμένα αυτά πετρώματα έχουν διεισδύσει, κατά το Μειόκαινο, οι γρανίτες των Ραχών στα δυτικά και του Ξυλοσύρτη στα ανατολικά. Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί της ενότητας είναι ο σχηματισμός Πετροπουλίου, ο Δολομίτης Πούντας, το ανώτερο μάρμαρο Πούντας, οι γνεύσιοι Πλαγιάς και το κατώτερο μάρμαρο Νίκαρη. Με βάση τις ορυκτολογικές παραγενέσεις, απαντώνται συνθήκες κατώτερης αμφιβολιτικής φάσης σε αυτήν την ενότητα.
- Η ενδιάμεση ενότητα (ή Ενότητα της Μεσσαρίας), η οποία περιλαμβάνει μάρμαρα και φυλλίτες. Με βάση τις ορυκτολογικές παραγενέσεις, απαντώνται συνθήκες κατώτερης πρασινοσχιτολιθικής φάσης. Η ενότητα αυτή συσχετίζεται με την ενότητα Δρυός (νότια Πάρος), λόγω παρόμοιου βαθμού μεταμόρφωσης καθώς και από τον τύπο των πετρωμάτων των οποίων υπέρκεινται (αμφιβολιτικής φάσης). Η ενότητα Μεσσαρίας είναι τεκτονικά τοποθετημένη επί της ενότητας Ικαρίας.
- Ανώτερη τεκτονική ενότητα (ή Ενότητα Κεφαλάς) η οποία αποτελείται από μολασσικούς οφιολιθικούς σχηματισμούς (ηφαιστειακά ιζηματογενή οφιολιθικά ολισθοστρώματα) συμπαρασύροντας ανακρυσταλλωμένους λευκόροους ασβεστόλιθους, όπως αυτούς που εμφανίζονται στο ύψωμα Κεφάλα (κεντρικό τμήμα της νήσου). Οι σχηματισμοί αυτοί της Ικαρίας βρίσκονται επωθημένοι επί των μάρμαρο-σχιστολιθικών σχηματισμών της κατώτερης ενότητας, όπως στην περιοχή της Κεφαλάς. Η ανώτερη τεκτονική ενότητα Κεφαλάς αποτελεί ένα τεκτονικό παράθυρο έκτασης 1.5km². Με βάση τις ορυκτολογικές παραγενέσεις απαντώνται συνθήκες χαμηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Νεότεροι σχηματισμοί (νεογενούς ηλικίας κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ψαμμούχες μάργες και μάργες με κροκαλολατυποπαγείς αναβαθμίδες του Τεταρτογενούς τοπικά, συμπληρώνουν τη γεωλογική εικόνα του νησιού.

Τα ιζηματογενή πετρώματα στην Ικαρία είναι ελάχιστα. Διλουβιακά λατυποπαγή πετρώματα βρίσκονται Β.Α. και τριαδικός ασβεστόλιθος βρίσκεται ανατολικά του Ευδήλου. Από τεκτονικής πλευράς, η Ικαρία περιγράφεται από 4 κύριες παραμορφωτικές φάσεις.

Το δυτικό τμήμα της Ικαρίας αποτελείται γνευσιακό γρανίτη της Νάξου και της Μυκόνου. Ο γρανίτης δυτικής Ικαρίας είναι ηλικίας κατώτερου μειόκαινου και αποτελεί το μεγαλύτερο πλουτώνιο σώμα του Αιγαίου.

Το ανατολικό τμήμα της Ικαρίας αποτελείται από γνεύσιο, μοσχοβιτικό σχιστόλιθο, μάρμαρο και ημιμεταμορφωμένο αργιλικό σχιστόλιθο. Τα πετρώματα του ανατολικού τμήματος διαχωρίζονται από μια μεγάλη γρανιτική φλέβα. Η επαφή του γρανίτη με την κατώτερη ενότητα είναι τεκτονική και συνοδεύεται από διάφορα παραμορφωτικά ακόλουθα φαινόμενα. Στο Ν.Α. τμήμα του νησιού βρίσκονται στρώματα της θαλάσσιας φάσεως του κατώτερου πλειόκαινου.

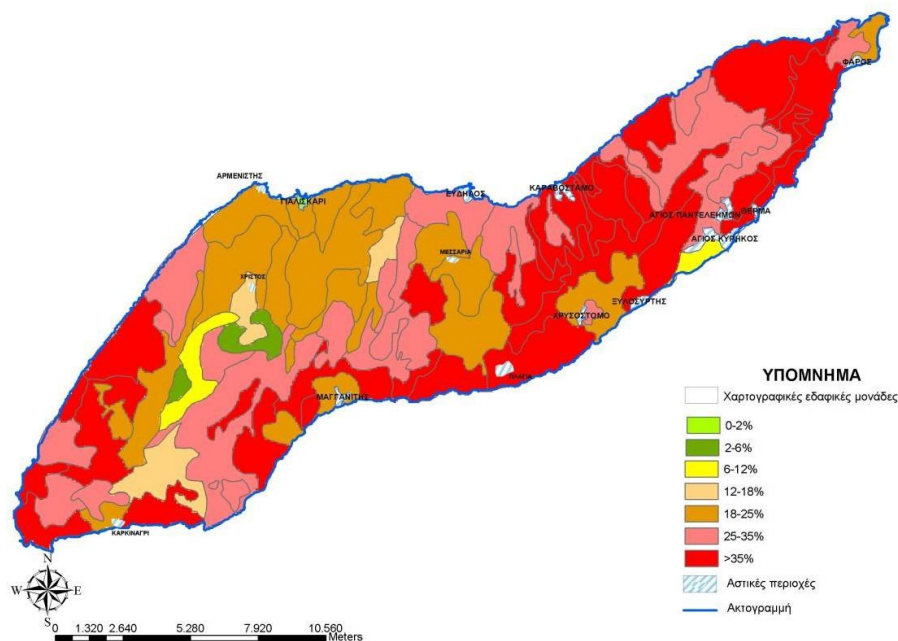
Ορισμένα από τα κυριότερα ορυκτά των πετρωμάτων της Ικαρίας είναι ο λειμωνίτης, η σμύριδα, ο κυανίτης, ο ανδαλουσίτης, ο σιλλιμανίτης, ο τουρμαλίνης, ο βιοτίτης, ο χλωρίτης, ο τιτανίτης, ο ιλμενίτης, ο αιματίτης, το ρουτίλιο, ο απατίτης, το ζirkόνιο, το κορούνδιο και άλλα.

Οι κατολισθήσεις είναι αρκετά συχνές στην Ικαρία. Στις κατολισθήσεις συμβάλλουν η γεωλογική δομή του νησιού και η σχετικά μικρή ηλικία των περισσότερων σχηματισμών, η δράση τεκτονικών δυνάμεων, η γεωμορφολογική εξέλιξη, η φυτοκάλυψη και οι υψηλές βροχοπτώσεις. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επιδρά σημαντικά στην πρόκληση κατολισθήσεων (σε μεγαλύτερη ή μικρότερη έκταση) είναι η ανθρώπινη παρέμβαση η οποία σχετίζεται με την χρήση γης. Τα κατολισθητικά φαινόμενα έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις για το νησί, επειδή κάθε χρόνο καταστρέφονται τμήμα δρόμων, με αποτέλεσμα να αποκόπτεται η επικοινωνία μεταξύ των οικισμών. Οι κατολισθήσεις για το νησί της Ικαρίας πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν, εξαιτίας της συχνότητάς τους, ώστε να προστατεύεται η ανάπτυξη του νησιού.

Οι κατολισθήσεις εντάσσονται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών και είναι απόρροια κατάλυσης ισορροπίας εδαφικών ή βραχωδών πρानών, φυσικών ή τεχνητών. Αποτελούν μέρος των φυσικών διεργασιών εξέλιξης του γήινου ανάγλυφου, ωστόσο μπορούν να προκληθούν και από εξωτερικές παρεμβάσεις με την έμμεση ή άμεση συμβολή του ανθρώπου (Βολιώτη, 2009). Τα περισσότερα πρानή στην επιφάνεια της γης έχουν περιέλθει σε μια κατάσταση ισορροπίας, όπως αυτή έχει διαμορφωθεί κατά τη διάρκεια της γεωμορφολογικής εξέλιξης του πρானός (αποφορτίσεως λόγω διαβρώσεων, μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών, παλαιές μετακινήσεις κ.λπ.) (Τσέργα, 2007). Η κατολισθηση εκφράζει το αποτέλεσμα αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους και είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την πλήρη παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου.

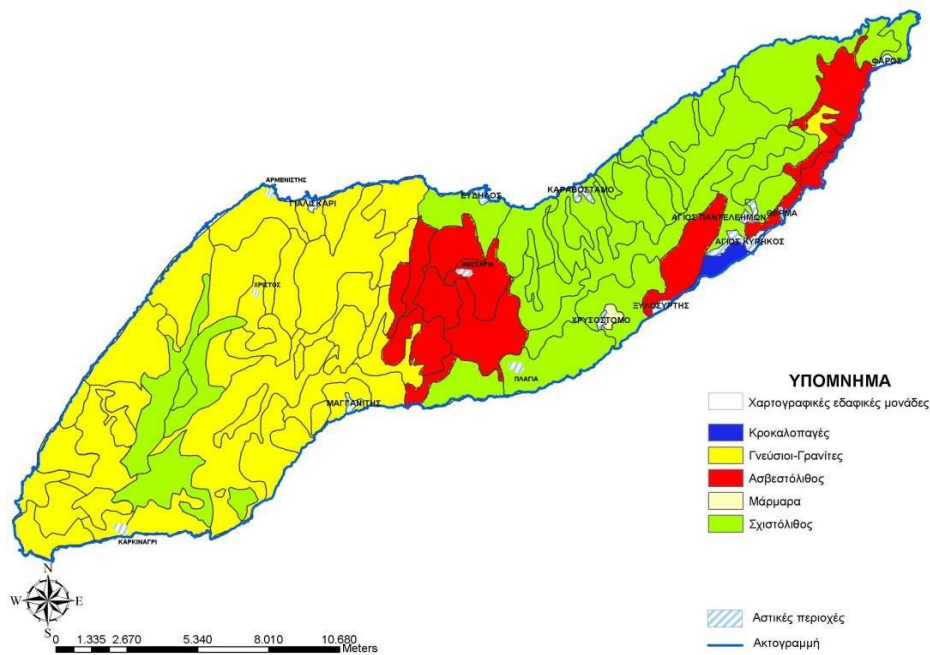
Η κατολισθητική επικινδυνότητα μιας περιοχής αποτελεί ουσιαστική παράμετρο στη συνολική εκτίμηση της γεωλογικής – γεωτεχνικής καταλληλότητας της. Η κατανόηση του μηχανισμού της είναι σημαντική για την πρόβλεψη και αντιμετώπιση, είτε με την πλήρη αποσόβηση του κινδύνου είτε με την κατάρτιση κατάλληλων μέτρων προστασίας και αποκατάστασης. Πρόκειται για ένα πολυμεταβλητό - πολυπαραμετρικό πρόβλημα η επίλυση του οποίου απαιτεί την συνδρομή των επιστημονικών κλάδων της Γεωλογίας, της Τεχνικής Γεωλογίας, της Βραχομηχανικής, της Εδαφομηχανικής και Εδαφοδυναμικής, σε συνδυασμό με την εφαρμογή εργαλείων ανάλυσης χώρου, όπως τα Γεωγραφικά Συστήματα

Πληροφοριών (ΓΣΠ) και εργαλείων υπολογιστικής νοημοσύνης, όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) (Βολιώτη, 2009).

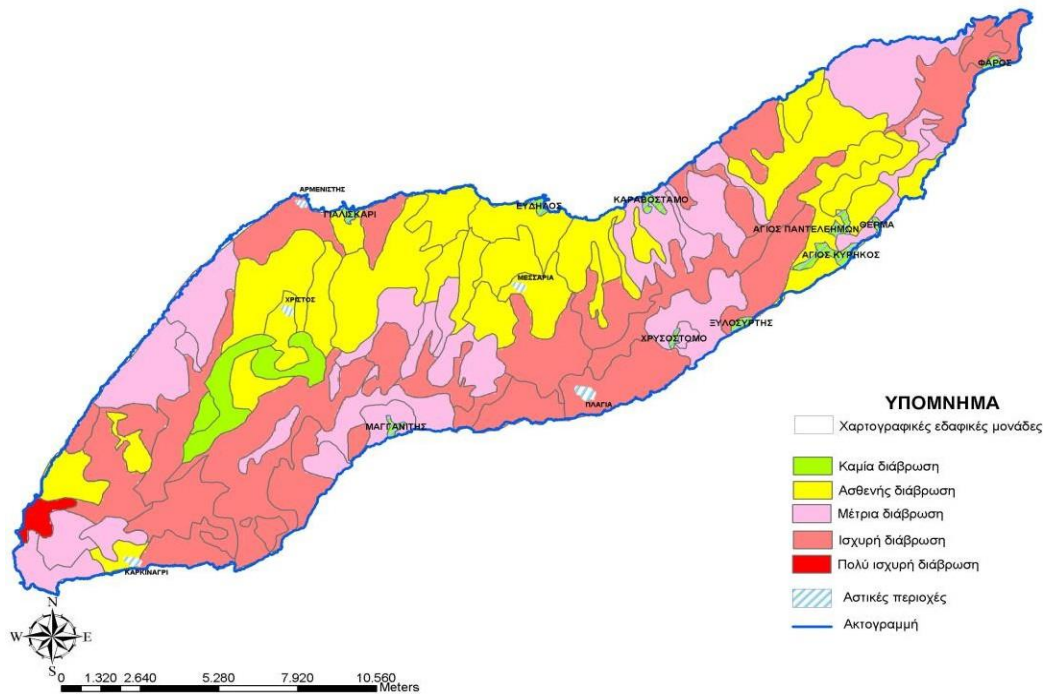


Εικόνα 7.1 Κατανομή των κλάσεων κλίσης εδαφών

Η Ικαρία είναι ένα έντονης γεωμορφολογίας νησί και αυτό είναι εύκολα κατανοητό από τον παραπάνω χάρτη.



Εικόνα 7.2 Κατανομή μητρικών υλικών των εδαφών που σχηματίστηκαν στην Ικαρία



Εικόνα 7.3 Χάρτης κινδύνου διάβρωσης εδαφών Ικαρίας με βάση τις υπάρχουσες φυσικές και διαχειριστικές συνθήκες

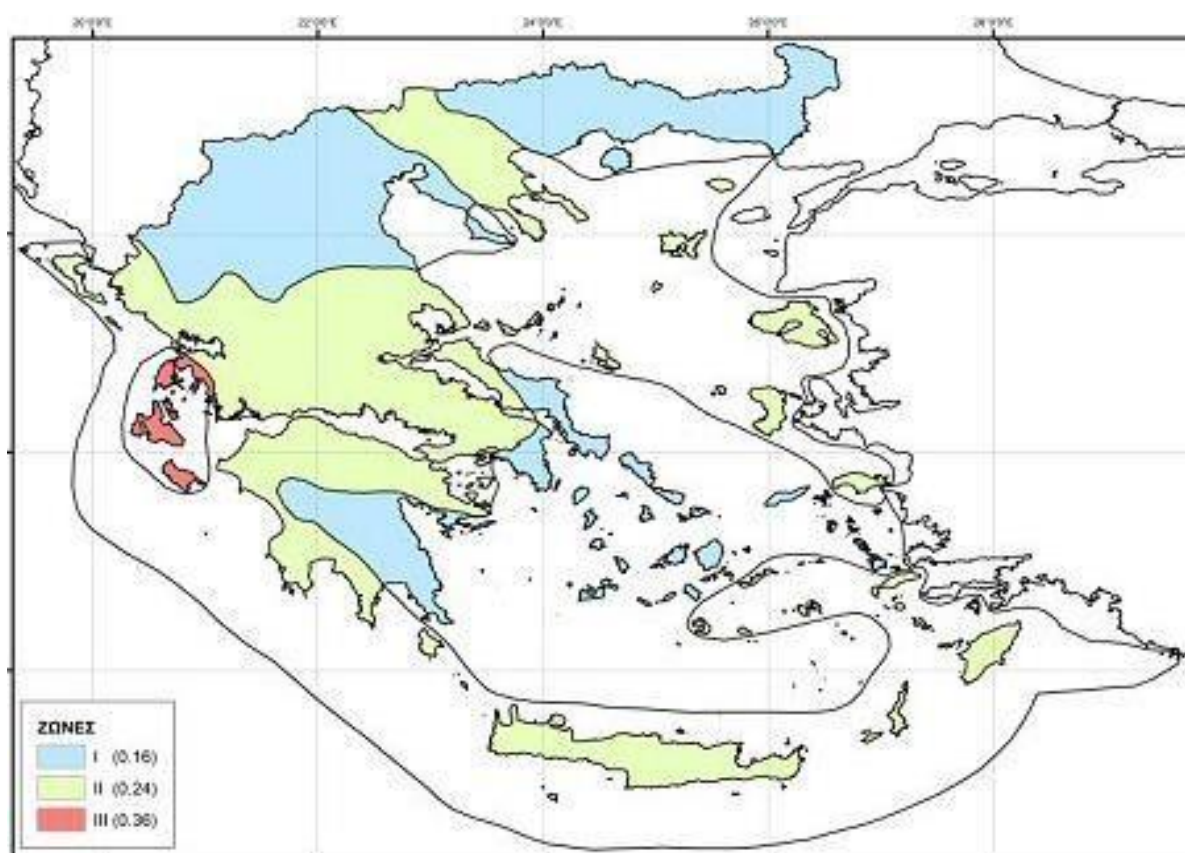
7.2 Υδατικοί πόροι

Η Ικαρία χαρακτηρίζεται από πλούσιους υδατικούς πόρους στους οποίους συμπεριλαμβάνονται υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες και πολλές άλλες πηγές σε όλο το νησί. Για ύδρευση χρησιμοποιούνται 65 πηγές και για άρδευση χρησιμοποιούνται περίπου 290 πηγές. Σχεδόν όλα τα χωριά έχουν και τις δικές τους πηγές. Η αφθονία υπόγειων υδάτων, σε συνδυασμό με τη γεωτεκτονική δομή του νησιού, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών σπηλαίων.

Οι επιφανειακές απορροές του νερού είναι μεγαλύτερες από το υπόγειο δυναμικό του και για την ορθολογική διαχείριση αυτού του νερού έχουν κατασκευαστεί αρκετοί ταμιευτήρες:

- Το φράγμα στο Πέζι, κατασκευάστηκε το 1995, έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 1.000.000 κυβικά μέτρα, τροφοδοτείται από το χείμαρρο Πέζι και χρησιμοποιείται για να καλύψει ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης στην ευρύτερη περιοχή των Ραχών.
- Η λιμνοδεξαμενή στο Χριστό Αγ. Κηρύκου, κατασκευάστηκε το 2001, έχει χωρητικότητα 80.000 κυβικών μέτρων και χρησιμοποιείται για να καλύψει ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης στην ευρύτερη περιοχή του Αγ. Κηρύκου
- Σχεδιάζεται ακόμα η κατασκευή μικρών ταμιευτήρων τις θέσεις Λυδί, Κυπαρίσσι, Πλατανωπή Ευδήλου, Λαγκαδά και Κουνιάδοι, καθώς και δύο φραγμάτων στο Περδίκι και τα Θέρμα, κάτι που θα συμβάλλει σημαντικά στην αξιοποίηση των υδατικών πόρων της Ικαρίας

7.3 Σεισμικοτεκτονικές συνθήκες του νησιού και της περιοχής μελέτης



Εικόνα 7.4 Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του ελλαδικού χώρου

(Πηγή: ΟΑΣΠ, 2003)

Βάση του ελληνικού αντισεισμικού κανονισμού (ΕΑΚ 2000) η Ικαρία κατατάσσεται στην πρώτη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (ζώνη I 0.16)

Με βάση τις νέες έρευνες Ελλήνων επιστημόνων στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου ανάμεσα στη Σκύρο, στη Λέσβο και στον Άγιο Ευστράτιο έχουν εντοπιστεί συνολικά 19 μεγάλα ενεργά ρήγματα, μήκους άνω των επτά χιλιομέτρων το καθένα, τα οποία είναι ικανά να δώσουν ισχυρούς σεισμούς μεγέθους 6,1 μέχρι και 7,4 βαθμούς της κλίμακας ρίχτερ. Τα οκτώ από τα παραπάνω ρήγματα μπορεί να δώσουν σεισμούς άνω των 7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ.

Με βάση τις εκτιμήσεις των ερευνητών, σε μια σχετική δημοσίευση στο περιοδικό *Marine Geology*, εκτός από το ρήγμα του Αγίου Ευστρατίου που προκάλεσε σεισμό μεγέθους 7,1 βαθμών το 1968, με αποτέλεσμα να χαθούν 20 ανθρώπινες ζωές και τρία ακόμη ρήγματα που έδωσαν μικρότερους σεισμούς τα 30 τελευταία χρόνια, τα υπόλοιπα ρήγματα είναι δυνατόν να δώσουν μεγάλο σεισμό μεγέθους 6,1 έως 7,1 βαθμών, χωρίς όμως να είναι δυνατόν να προσδιορισθεί χρονικά εάν αυτός θα συμβεί σε μερικά χρόνια ή σε δεκάδες χρόνια.

Η τριγωνική λεκάνη της Σκύρου, που κυμαίνεται σε βάθη 600 έως 1050 μέτρων, έχει παρόμοια τεκτονική δομή με εκείνη της γειτονικής λεκάνης του βορείου αιγαίου, αλλά με μικρότερες διαστάσεις και πιο αργούς ρυθμούς παραμόρφωσης.

Η ενεργοποίηση των ρηγμάτων στην περιοχή της λεκάνης της Σκύρου και η έναρξη καταβύθισης της περιοχής άρχισε πριν από λίγες εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, για αυτό και στον πυθμένα της ρηχής πλατφόρμας γύρω από τη λεκάνη συναντάται απευθείας το παλιό αλπικό υπόβαθρο, με λίγα μόνο πρόσφατα ιζήματα πάχους μερικών δεκάδων μέτρων.

Στην Ικαρία εντοπίζονται τρία κύρια συστήματα ρηγμάτων, με διεύθυνση Δ.ΒΔ-Α.ΝΑ, ΑΔ έως Δ.ΝΔ-Α.ΒΑ (παράλια ρήγματα) και Β-Δ έως Β.ΒΔ-Ν.ΝΔ, κάθετο στο προηγούμενο. Οι διακλάσεις στα πετρώματα του υποβάθρου παρουσιάζουν διευθύνσεις Β-Δ και Α-Δ, δηλαδή είναι παρόμοια με το σύστημα ρηγμάτων των περιοχών των πηγών, ενώ στην ευρύτερη περιοχή των πηγών εντοπίζονται δύο παράλια ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ, καθώς και αρκετά ρήγματα Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ έως Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ. Στη διασταύρωση αυτών των ρηγμάτων εκδηλώνεται η ανάβλυση των πηγών.

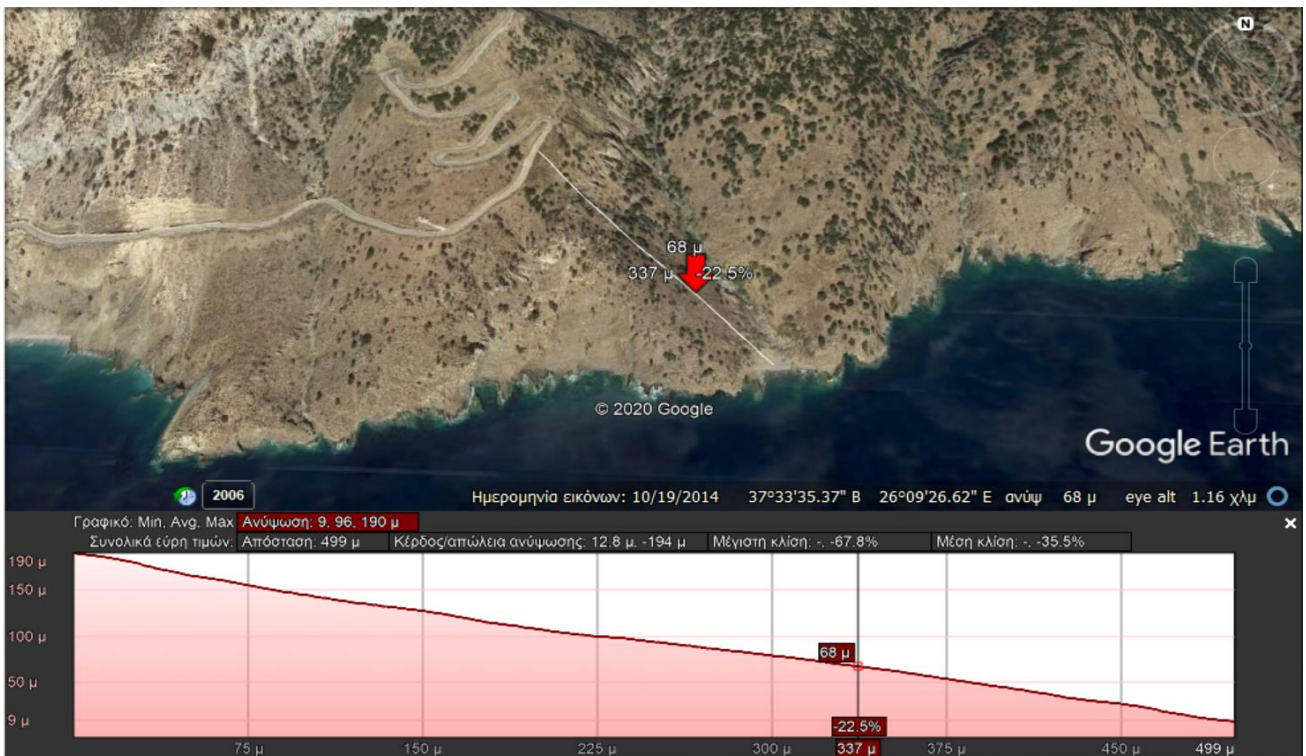
7.4 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά Στοιχεία της περιοχής μελέτης

Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται στο δήμο Ικαρίας, 3.2 χιλιόμετρα ανατολικά από τον οικισμό Μαγγανιτίου και 3.3 χιλιόμετρα δυτικά από τον οικισμό Πλαγιάς. Η περιοχή του έργου βόρεια συνδέεται με το οδικό δίκτυο του νησιού με υψόμετρο 185μ (500μ από τη θάλασσα) και νότια οριοθετείται από την ακτογραμμή. Κατά συνέπεια είναι έντονης κλίσης με μέση κλίση της τάξης των 35 μοιρών.

Οι υψομετρικές καμπύλες δημιουργήθηκαν, από δεδομένα εκατοντάδων σημείων του Google Earth, με το πρόγραμμα QGis. Η μέθοδος είναι προσεγγιστική όμως αναπαριστά πολύ καλά τη φυσική πραγματικότητα καθώς δεν βρέθηκαν αναλυτικά δεδομένα για την ακριβή υψομετρία της περιοχής.



Εικόνα 7.5 Υψομετρικές καμπύλες της υπό μελέτη περιοχής

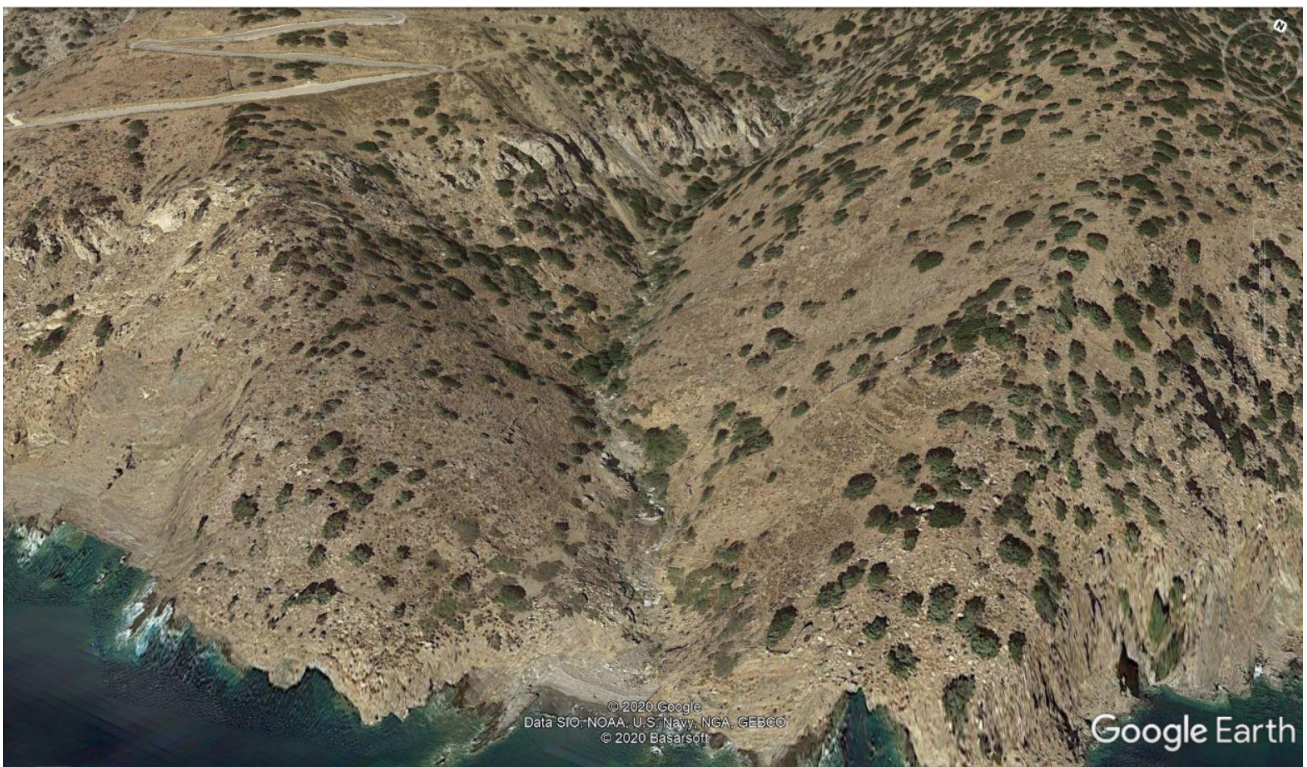


Εικόνα 7.6 Τοποθεσία της περιοχής μαζί με τα υψομετρικά χαρακτηριστικά



Εικόνα 7.7 Χάρτης με την οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου ενδιαφέροντος και του οδικού δικτύου της περιοχής

Η οριζόντια απόσταση του οδικού δικτύου μέχρι το σημείο ενδιαφέροντος είναι 400 μέτρα. Άρα μπορεί να θεωρηθεί μια κλίση πρανούς των 26,6 μοιρών.



Εικόνα 7.8 Τρισδιάστατη άποψη περιοχής

7.5 Γεωτεχνικοί Παράμετροι Σχεδιασμού

Αυτοψία και τοπογραφική αποτύπωση περιοχής του έργου

Ταξινόμηση εδαφών

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας γεωτεχνικού σχεδιασμού απαιτεί την εκτίμηση της πολυπλοκότητας και της επικινδυνότητας του έργου. Έτσι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

1. Οι συνθήκες του υπεδάφους
2. Οι συνθήκες των υπογείων υδάτων
3. Η σεισμικότητα της περιοχής
4. Οι επιδράσεις από το περιβάλλον (όπως η υδρολογία, τα επιφανειακά νερά, οι κίνδυνοι συνιζήσεων, κ.α.)
5. Οι συνθήκες σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής (όπως οι γειτονικές κατασκευές, τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, η κυκλοφορία, κ.λπ.)
6. Η ευαισθησία και το μέγεθος της κατασκευής

Σκοπός της γεωτεχνικής διερεύνησης είναι η πρόγνωση των γεωτεχνικών συνθηκών που θα συναντηθούν. Η μελέτη του έργου θα στηριχθεί στις συνθήκες αυτές για την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης, για τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και για την εκτίμηση του μεγέθους των υπερεκκαφών. Από την ορθή προεκτίμησή τους θα εξαρτηθεί η επιτυχία του έργου.

Η γεωμάζα διακρίνεται αδρά σε έδαφος και σε πέτρωμα (βράχο-βραχομάζα). Ο διαχωρισμός αυτός δύναται βασίζεται σε συμβατικές απαιτήσεις, στην αντοχή της ή και στη μηχανική της απόκριση. Συμβατικά, έδαφος είναι η γεωμάζα που δύναται να εκσκαφτεί με κοινά συμβατικά χωματοουργικά μηχανήματα, ενώ πέτρωμα ονομάζεται η γεωμάζα που δεν μπορεί να εκσκαφτεί με τα μηχανήματα αυτά. Με βάση τη μονοαξονική αντοχή της γεωμάζας, ονομάζεται ως έδαφος όταν η μονοαξονική της αντοχή είναι μικρότερη από 1 MPa, και ως πέτρωμα όταν είναι μεγαλύτερης αντοχής.

Πέτρωμα- βραχομάζα

Το πέτρωμα χαρακτηρίζεται με βάση τον τύπο του, τον πατρολογικό, πετρογραφικό και ορυκτολογικό του χαρακτηρισμό, την ορυκτολογική του σύσταση, το βαθμό αποσάθρωσής του, την αντοχή του και τον τεκτονισμό του, εκ των οποίων ο τελευταίος έχει καθοριστική σημασία στα σκληρά πετρώματα.

Χαρακτηρισμός βραχωδών σχηματισμών, σύμφωνα με τους Deereetal. (1970)ή το GSI

1. Σκληρό και συμπαγές
2. Σκληρό διαστρωμένο ή σχιστώδες
3. Μαζώδες, μέτρια κερματισμένο
4. Μέτρια κερματισμένο και με ενστρώσεις
5. Πολύ κερματισμένο με στρώσεις, και διαρρηγμένο
6. Πλήρως θρυμματισμένο
7. Χάλικες και άμμοι
8. Συνθλιβόμενο σε μέτριο βάθος
9. Συνθλιβόμενο σε μεγάλο βάθος
10. Διογκούμενο

Το πρανές αποτελείται από εδαφικό υλικό κατακερματισμένου βράχου. Ο συντελεστής του Young E του εδαφικού υλικού ισούται με $E=1.300.000 \text{ kN/m}^2$ και ο λόγος του Poisson $\nu=0.3$. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής του Young E τόσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές. Σχετικά τον λόγο Poisson (ν) όσο η τιμή του πλησιάζει την τιμή μηδέν τόσο μεγαλύτερη σκληρότητα παρουσιάζει το υλικό από το οποίο αποτελείται το πρανές. Ο λόγος Poisson για το νερό ισούται $\nu=0.5$. Η ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων για το ημιβραχώδες εδαφικό υλικό από το οποίο αποτελείται το πρανές ισούται με $v_s=500\text{m/s}$. Επιπλέον, η συνοχή του εδαφικού υλικού είναι $c=30 \text{ kN/m}^2$ και η γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$. Ο κίνδυνος κατολίσθησης του πρανούς μειώνεται για μεγαλύτερη τιμή δύναμης συνοχής και για μεγαλύτερη γωνία εσωτερικής τριβής, άρα ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος.

7.6 Υπολογισμοί ευστάθειας πρανούς

Στην εφαρμογή προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς της υπό μελέτη περιοχής. Για την εφαρμογή ελήφθησαν υπόψιν διάφοροι παράμετροι σχετικά με το ειδικό βάρος, τη δύναμη συνοχής, τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές. Επιπλέον στους υπολογισμούς εξετάστηκε ολόκληρη η περιοχή με ύψος πρανούς $H=200\text{m}$ και στη συνέχεια χωρίστηκε σε μικρότερες περιοχές με βάση τη μείωση του ύψους του πρανούς, οι τιμές των υψών που εξετάστηκαν σε αυτή την περίπτωση ήταν για $H=5\text{m}$, 10m , 20m και 40m . Επιπλέον, για όλες τις περιπτώσεις των υψών των πρανών που πάρθηκαν κατά την διάρκεια των υπολογισμών στο λογισμικό του Plaxis, εξετάστηκε κατά πόσο η τιμή της δύναμης συνοχής του εδαφικού υλικού επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς. Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε για διάφορες δυνάμεις συνοχής του εδαφικού υλικού όπως για $c=30\text{kN/m}^2$, 60kN/m^2 και 100kN/m^2 . Τέλος, εξετάστηκε και κατά πόσο ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς επηρεάζεται και από τη γωνία κλίσης του πρανούς. Η μέση κλίση της περιοχής μελέτης είναι $26,6$ μοίρες, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν και άλλες τιμές σχετικά με τη γωνία κλίσης για το υπό εξέταση πρανές, όπως $\beta=30^\circ$, 35° , 45° και 60° .

Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας προσδιορίστηκε για στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Στις ψευδοστατικές συνθήκες ως γωνία κλίσης του πρηνούς θεωρήθηκε η τιμή 26,6° ενώ οι ψευδοστατικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και στο πρώτο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας (0.08g, 0.12g και 0.18g), ενώ ο συντελεστής ασφαλείας προσδιορίστηκε μέσω του λογισμικού του Plaxis.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους.

Στατικές συνθήκες

<i>Parameters</i>				<i>FoS (Plaxis)</i>				
γ	c	H	phi	26.6	30	35	45	60
20	30	5	30		3,68	3,28	2,86	2,39
20	30	10	30		2,56	2,24	1,89	1,47
20	30	20	30		1,86	1,64	1,34	1,01
20	30	40	30		1,53	1,29	1,00	0,76
20	30	200	30	1,33		0,98		

<i>Parameters</i>				<i>FoS (Plaxis)</i>				
γ	c	H	phi	26.6	30	35	45	60
20	60	5	30		5,66	5,21	4,60	3,90
20	60	10	30		3,68	3,27	2,84	2,30
20	60	20	30		2,49	2,24	1,93	1,46
20	60	40	30		1,89	1,64	1,34	1,05
20	60	200	30	1,44		1,09		

<i>Parameters</i>				<i>FoS (Plaxis)</i>				
γ	c	H	phi	26.6	30	35	45	60
20	100	5	30		8,19	7,63	6,84	5,84
20	100	10	30		5,03	4,55	4,01	3,32
20	100	20	30		3,22	2,94	2,53	1,99
20	100	40	30		2,30	2,04	1,71	1,35
20	100	200	30	1,58		1,19		

Πίνακας 7.1 Προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας μέσω του λογισμικού Plaxis

FoS (Plaxis)					FoS(Taylor)				
26.6	30	35	45	60	26,6	30	35	45	60
	3,68	3,28	2,86	2,39		300,00	30,00	12,00	5,00
	2,56	2,24	1,89	1,47		150,00	15,00	6,00	2,50
	1,86	1,64	1,34	1,01		75,00	7,50	3,00	1,25
	1,53	1,29	1,00	0,76		37,50	3,75	1,50	0,63
1,33		0,98				7,50	0,75	0,30	0,13
FoS (Plaxis)					Taylor				
26.6	30	35	45	60	26,6	30	35	45	60
	5,66	5,21	4,60	3,90		600,00	60,00	24,00	10,00
	3,68	3,27	2,84	2,30		300,00	30,00	12,00	5,00
	2,49	2,24	1,93	1,46		150,00	15,00	6,00	2,50
	1,89	1,64	1,34	1,05		75,00	7,50	3,00	1,25
1,44		1,09				15,00	1,50	0,60	0,25
FoS (Plaxis)					Taylor				
26.6	30	35	45	60	26,6	30	35	45	60
	8,19	7,63	6,84	5,84		1000,00	100,00	40,00	16,67
	5,03	4,55	4,01	3,32		500,00	50,00	20,00	8,33
	3,22	2,94	2,53	1,99		250,00	25,00	10,00	4,17
	2,30	2,04	1,71	1,35		125,00	12,50	5,00	2,08
1,58		1,19				25,00	2,50	1,00	0,42

Πίνακας 7.2 Σύγκριση συντελεστής ασφαλείας μέσω του λογισμικού του Plaxis και του διαγράμματος Taylor υπό στατικές συνθήκες

Ψευδοστατικές συνθήκες

Parameters					FoS with accelerations			
					0	0.08	0.12	0.18
γ	c	H	phi		26.6	26.6	26.6	26.6
20	30	5	30		3,86	3,21	2,93	2,57
20	30	10	30		2,72	2,27	2,09	1,86
20	30	20	30		2,08	1,73	1,59	1,40
20	30	40	30		1,70	1,41	1,30	1,14
20	30	200	30		1,33	1,09	1,00	0,753
γ	c	H	phi		26.6	26.6	26.6	26.6
20	60	5	30		5,90	4,86	4,45	3,86
20	60	10	30		3,87	3,20	2,94	2,59
20	60	20	30		2,72	1,85	2,09	1,85
20	60	40	30		2,08	1,73	1,60	1,40
20	60	200	30		1,44	1,18	1,09	0,91
γ	c	H	phi		26.6	26.6	26.6	26.6
20	100	5	30		8,43	6,84	6,229	5,15
20	100	10	30		5,24	4,32	3,96	3,51
20	100	20	30		3,50	2,91	2,67	2,36
20	100	40	30		2,51	2,10	1,92	1,70
20	100	200	30		1,58	1,30	1,18	1,03

Πίνακας 7.3 Συντελεστής ασφαλείας του πρανούς για ψευδοστατικές συνθήκες

Οι τελικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την ανάλυση του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για την υπό μελέτη περιοχή παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Οι παράμετροι που θεωρήθηκαν σταθεροί είναι το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού ($\gamma=20\text{kN/m}^3$), η γωνία εσωτερικής τριβής ($\phi=30^\circ$) και η γωνία κλίσης του πρανούς ($\beta=26.6^\circ$). Ενώ οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας είναι το ύψος του πρανούς για τιμές $H=5\text{m}$, 10m , 20m , 40m και 200m , η δύναμη συνοχής του εδαφικού υλικού $c=30\text{ kN/m}^2$, 60 kN/m^2 και 100 kN/m^2 . Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας υπο ψευδοστατικές συνθήκες είναι οι $0.08g$, $0.12g$ και $0.18g$.

Πίνακας 7.4 Συντελεστής ασφαλείας (FS) του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για ύψος $H=5\text{m}$

	$C=30\text{kN/m}^2$	$C=60\text{kN/m}^2$	$C=100\text{kN/m}^2$
FSp	3.86	5.90	8.43
$a=0.08$	3.21	4.86	6.84
$a=0.12$	2.93	4.45	6.229
$a=0.18$	2.57	3.86	5.15

Πίνακας 7.5 Συντελεστής ασφαλείας (FS) του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για ύψος H=10m

	C=30kN/m ²	C=60kN/m ²	C=100kN/m ²
FSp	2.72	3.87	5.24
a=0.08	2.27	3.20	4.32
a=0.12	2.09	2.94	3.96
a=0.18	1.86	2.59	3.51

Πίνακας 7.6 Συντελεστής ασφαλείας (FS) του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για H=20m

	C=30kN/m ²	C=60kN/m ²	C=100kN/m ²
FSp	2.08	2.72	3.50
a=0.08	1.73	1.85	2.91
a=0.12	1.59	2.09	2.67
a=0.18	1.40	1.85	2.36

Πίνακας 7.7 Συντελεστής ασφαλείας (FS) του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για H=40m

	C=30kN/m ²	C=60kN/m ²	C=100kN/m ²
FSp	1.70	2.08	2.51
a=0.08	1.41	1.73	2.10
a=0.12	1.30	1.60	1.92
a=0.18	1.14	1.40	1.70

Πίνακας 7.8 Συντελεστής ασφαλείας (FS) του πρανούς υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες για H=200m

	C=30kN/m ²	C=60kN/m ²	C=100kN/m ²
FSp	1.33	1.44	1.58
a=0.08	1.09	1.18	1.30
a=0.12	1	1.09	1.18
a=0.18	0.753	0.91	1.03

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές των δυνάμεων συνοχής τόσο για στατικές όσο και για ψευδοστατικές συνθήκες. Ενώ όσο αυξάνεται ο ψευδοστατικός συντελεστής τόσο μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας για όλες τις τιμές των δυνάμεων συνοχής.

Κεφάλαιο 8 Γενικά συμπεράσματα και προεκτάσεις

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία δεν είχε μόνο ένα στόχο. Έγιναν πλήθος αριθμητικών αναλύσεων, συγκρίσεων, πειραμάτων και εφαρμογών με κύριο εργαλείο το λογισμικό Plaxis και τα αποτελέσματα του Συντελεστή Ασφαλείας. Η ευστάθεια των πρανών καθορίζεται από τον συντελεστή ασφαλείας σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 και γι' αυτό τα αποτελέσματα των αναλύσεων ήταν οι τιμές του FS.

Αρχικά έγιναν αναλύσεις στο Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων για πλήθος εδαφικών υλικών και γεωμετρίας πρανών υπό στατικές συνθήκες. Υπολογίστηκαν οι Συντελεστές Ασφαλείας και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με τη μέθοδο Taylor (1937). Στις περισσότερες επιλύσεις που διεξήχθησαν ο συντελεστής ασφαλείας είχε σημαντική διαφορά συγκρινόμενος με τους συντελεστές ασφαλείας που προέκυπταν με τη μέθοδο Taylor. Επιπροσθέτως, ο συντελεστής ασφαλείας με τη μέθοδο Taylor, είχε σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη τιμή από τον συντελεστή ασφαλείας που προέκυπτε από τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, παρατηρούνταν δηλαδή πιο συντηρητικοί συντελεστές ασφαλείας στη μέθοδο Taylor. Η διαφορά ήταν μεγαλύτερη σε πρανή με μικρές γωνίες κλίσης (β), μεγάλης γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) και μικρού ύψους πρανούς (H), δηλαδή σε πρανή που είναι δύσκολο να αστοχήσουν και έχουν υψηλούς συντελεστές ασφαλείας. Εν αντιθέσει, σε πρανή με μεγάλες γωνίες κλίσεως (β), μικρής γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) και μεγάλου ύψους πρανούς (H), δηλαδή σε πρανή που είναι επιρρεπή στο να αστοχήσουν, οι αποκλίσεις μεταξύ των συγκρινόμενων συντελεστών ασφαλείας των δύο μεθόδων μειώνονταν σημαντικά και σε συνθήκες οριακής ισορροπίας δηλαδή ($FS=1$) ή σε περιπτώσεις πολύ κοντά της οριακής ισορροπίας οι δύο μέθοδοι σχεδόν ταυτίζονταν μεταξύ τους.

Έπειτα κατασκευάστηκαν **νέα διαγράμματα** και εξισώσεις από τους υπολογισμένους FS και έγινε μία τυπική σύγκριση αυτών με το πρώτο νομογράφημα Hoek & Bray (1977). Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά καθώς μετά από εφαρμογές και των δύο εξήχθησαν κοινά αποτελέσματα.

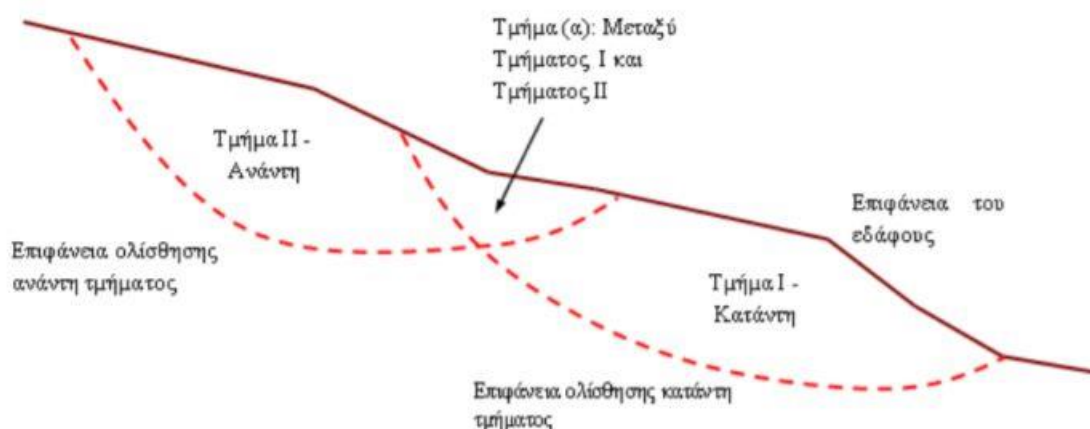
Επόμενο βήμα ήταν η μελέτη της ευστάθειας (των ίδιων συνθηκών με πριν) πρανών υπό σεισμικές συνθήκες και να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα και εξισώσεις, που θα αποτελούν ένα γρήγορο και εύκολο εργαλείο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας. Οι αναλύσεις έγιναν με τη ψευδοστατική μέθοδο και για τρεις κατηγορίες επιταχύνσεων (0.08g, 0.12g, 0.18g). Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και ήταν προφανή, δηλαδή όσο αυξανόταν η σεισμική επιτάχυνση, ο συντελεστής ασφαλείας μειωνόταν. Με τα νέα διαγράμματα και εξισώσεις που δημιουργήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένες παραμέτρους, μπορεί κάποιος να υπολογίσει προσεγγιστικά και με γρήγορο έναν αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας.

Επόμενος στόχος ήταν η έρευνα του κατά πόσο επηρεάζεται ο Συντελεστής Ασφαλείας όταν τα πρανή είναι συμμετρικά (επιχώματα). Έγιναν αναλύσεις για διαφορετικά εδαφικά υλικά και γεωμετρίες αλλά οι δύο κατηγορίες που εξετάστηκαν ήταν για απόσταση μεταξύ των συμμετρικών πρανών $L=H$ και $L=5H$. Επίσης να αναφέρουμε ότι εξετάστηκαν στατικά και σεισμικά όλες οι περιπτώσεις. Μετά από σύγκριση των FS των πρανών και των συμμετρικών επιχωμάτων δεν βρέθηκε κάποια διαφορά άξια αναφοράς. Αυτό ίσως οφείλεται επειδή χρησιμοποιήθηκε η ψευδοστατική μέθοδος και δεν παρατήρηση της επίδρασης της συχνότητας του σεισμού.

Τέλος αναλύθηκε στο πρόγραμμα ένα πραγματικό πρανές που βρίσκεται στην Ικαρία. Μελετήθηκαν τρεις κατηγορίες εδαφικών υλικών με διαφορετική συνοχή επειδή ο βαθμός απομείωσης είναι διαφορετικός στην έκταση της περιοχής. Προσομοιάστηκε μια ενιαία γωνία κλίσης πρανούς για ολόκληρη την περιοχή και άλλες για μικρότερα τμήματα. Κυρίως, ο στόχος αυτής της εφαρμογής ήταν η εξαγωγή FS από το πρόγραμμα, και επιπλέον από τις εμπειρικές μεθόδους νομογραφημάτων. Το αποτέλεσμα ήταν, η εμφανώς ικανοποιητική εφαρμογή των **νέων διαγραμμάτων**, διότι τα αποτελέσματα που δίνουν ομοιάζουν πολύ μιας αριθμητικής ανάλυσης.

Προεκτάσεις

Αρχικός προσωπικός στόχος της εργασίας μου ήταν η έρευνα ευστάθειας της πλαγιάς της Ικαρίας πριν και μετά τη διάνοιξη αγροτικού δρόμου. Όπως είναι γνωστό σε ένα δεδομένο πρανές μετά τη διάνοιξη ενός αγροτικού δρόμου οι κλίσεις ανάντη και κατόντη αυτού αυξάνουν. Υπολογίζοντας τον όγκο των μετακινούμενων εδαφικών υλικών και την αύξηση της κλίσης θα μπορούσαμε να μοντελοποιήσουμε τα δεδομένα σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και να υπολογίσουμε τους συντελεστές ασφαλείας τους. Με τελικό στόχο τη παρατήρηση της διαφορά τους σε διάφορες περιπτώσεις.



Εικόνα 8.1 Απεικόνιση δύο επιφανειών ολίσθησης, κατόντη και ανάντη τμήματος πρανούς.

Όμως επειδή είχε περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον η προσομοίωση της ευστάθειας πλήθος κατηγοριών εδαφικών πρανών ασχοληθήκαμε με αυτό και εξήγαγα νέα διαγράμματα. Άρα θα μπορούσε να μελετηθεί κατά πόσο μπορεί να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας μετά τη διάνοιξη ενός αγροτικού δρόμου.

Επιπρόσθετα αυτές οι εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες των διαγραμμάτων τόσο υπό στατικές αλλά και σεισμικές συνθήκες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από κάποιον που θα ασχοληθεί, για παράδειγμα, με την αυτοματοποίηση της ασφαλέστερης διαδρομής ενός δρόμου ή αγωγού μέσα από ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Μια άλλη προέκταση θα ήταν βάση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας που υπολογίστηκαν για στατικές και σεισμικές συνθήκες να κατασκευαστούν σε κατάλληλο λογισμικό πιο σύνθετα και ακριβή νομογραφήματα.

Επίσης να εξεταστεί η επίδραση του νερού στη ευστάθεια του πρανούς υπό στατικές συνθήκες και να προσδιοριστούν οι επιπλέον υδροστατικές ωθήσεις. Και να αναλυθεί η επίδραση του συντελεστή ασφαλείας των πρανών για διαφορετικές τιμές της συνοχής σε συνδυασμό με τα διάφορα ύψη και τις διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης και εσωτερικής τριβής.

Η Ελλάδα λόγω της ιδιαίτερης γεωτεκτονικής της θέσης, χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμορφολογία και υψηλή σεισμικότητα όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι δύο αυτοί παράγοντες μπορούν να διαταράξουν την ευστάθεια των πρανών και να προκληθούν σημαντικές αστοχίες. Επομένως, η ενδεδειγμένη μελέτη της ευστάθειας των πρανών, ώστε να μπορούν να διέλθουν οι αγωγοί με ασφάλεια από την περιοχή, θα αποτελέσει μείζον ζήτημα για τους γεωτεχνικούς. Για αυτούς τους λόγους η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα μπορούσε να διευρυνθεί και να επεκταθεί.

Βιβλιογραφία

- 1) Κανακίδης Γ. (2018), "Μελέτη Τρωτότητας Ενεργειακών Δικτύων Λόγω Αστάθειας Εδαφικών και Βραχώδων Πρανών υπό Στατικές και Σεισμικές Συνθήκες", Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε)
- 2) Psarropoulos P.N., Antoniou A. A., (2015), "Protecting on shore pipelines from geohazard of seismic slope instability", 10th Pipeline Technology Conference 2015, Hannover, Germany
- 3) Turner & Schuster, 1996).
- 4) Barnes G., (2005), "Εδαφομηχανική", Κλειδάριθμος, Αθήνα
- 5) Καββαδάς, Μ., (2005), "Στοιχεία Εδαφομηχανικής", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- 6) Μίχα Ι., (2017), "Ανάπτυξη αυτόματου εργαλείου σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών για την εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων με στόχο τη βελτιστοποίηση χάραξης αγωγών και τη διευκόλυνση της ενόργανης παρακολούθησής του", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- 7) Plaxis, (2002), "2D-Version 8", A.A. Balkema Publishers, Netherlands
- 8) <https://sites.agu.org/> (American Geophysical Union)
- 9) www.usgs.gov (U.S. Geological Survey)
- 10) Makdisi F.I., and Seed H.B. 1978, "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. GT7, pp. 849-867
- 11) ΟΑΣΠ, ΣΠΜΕ, (2001), "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000", Αθήνα
- 12) Σακελλαρίου Μ., (2008), "Γεωτεχνική Μηχανική", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 149-192
- 13) Χαραλάμπους Σ., Σακελλαρίου Μ., (2005), "Εκτίμηση της ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρανών σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Έμφαση σε έργα Οδοποιίας", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005
- 14) Γιάσογλου Ν., Κοσμάς Κ., Κούβαρης Γ., Καίρης Ορ. (2009), "Η Ερημοποίηση και η Αντιμετώπισή της στην Ικαρία"
- 15) Kramer, S.L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall, 1996

