



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Επίδραση Αστοχίας Πρανούς Υπαίθριας Εκμετάλλευσης σε Παρακείμενο Οικισμό



Διπλωματική Εργασία

Μιχάλης Ι. Μπόθος

Εξεταστική Επιτροπή:

Γ. Ξηρουδάκης, Επ. Καθηγητής (επιβλέπων),

Εμ. Στειακάκης, Καθηγητής,

Γ. Σαράτσης, ΕΔΙΠ.

Χανιά

06/2025

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας:

Τον κ. Ξηρουδάκη, επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συνεχή καθοδήγηση και άριστη συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Τον κ. Στειακάκη, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την υποστήριξη και την βοήθεια κατά την διάρκεια της εργασίας.

Τον κ. Σαράτση, ΕΔΙΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης για την βοήθεια στο σχεδιασμό.

Τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και βοήθειά τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Δήλωση Συγγραφέα

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία υποβάλλεται σε αξιολόγηση και οι απόψεις που περιέχονται δε σημαίνει αποδοχή των απόψεων της/του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο θεωρητικός υπολογισμός της ελάχιστης ασφαλούς απόστασης πρηνούς εκμετάλλευσης οικισμού σε περίπτωση αστοχίας αλλά και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τη χρήση των μεθόδων που θα εφαρμοστούν. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν τα πρηνή δύο ορυχεία (Βόρειο ορυχείο Μαθιάτη, Corta Atalaya) με τρεις μεθόδους ώστε να υπολογισθεί ο συντελεστής ασφαλείας για διάφορους συνδυασμούς τιμών συνοχής και γωνιών τριβής, και στη συνέχεια να υπολογιστούν οι οριζόντιες αποστάσεις (μήκη) αστοχίας (απόσταση φρύδι-ρωγμή) μέχρι και δύο αστοχίες. Στο ορυχείο Μαθιάτη εφαρμόστηκε η μέθοδος ανάλυσης ορίων βασισμένη στο θεώρημα του άνω ορίου με τον καθορισμό του κινηματικού μηχανισμού της κλίσης και τον υπολογισμό του παραγόμενου έργου κατά την ολίσθηση η δε ενέργεια που καταναλώνεται υπολογίζεται με βάση τη θεωρία ιδανικής πλαστικότητας και το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στο ορυχείο Corta Atalaya εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι των κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας και η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων του Bishop. Η μέθοδος κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας μελετήθηκε από το βιβλίο “Rock Slope Engineering” των Wyllie & Mah με τις προϋποθέσεις ότι τα πρηνή είναι ομογενοποιημένα και η κυκλική επιφάνεια ολίσθησης διέρχεται από το πόδι του πρηνούς. Για την επίλυση της απλοποιημένης μεθόδου Bishop χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο πρόγραμμα HYRCAN με κριτήριο Mohr-Coulomb. Σε όλες τις μεθόδους υπολογίστηκαν οι ΣΑ και για όλους το αποτέλεσμα ήταν μικρότερο της μονάδας υπολογίστηκε η οριζόντια απόσταση της πρώτης και της δεύτερης αστοχίας, οι οποίες στη συνέχεια αθροίστηκαν ώστε να υπολογιστεί η συνολική οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία. Από την εφαρμογή των μεθόδων υπολογίστηκαν και στις δύο περιπτώσεις οι ελάχιστες αποστάσεις σύμφωνα με τις οποίες ένας οικισμός είναι ασφαλής.

Λέξεις κλειδιά : Συντελεστής ασφαλείας, αστοχία, οικισμός, πρηνή, οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία, υπαίθρια εκμετάλλευση

Abstract

The aim of this thesis is the theoretical calculation of the minimum safe distance of a settlement slope in case of failure and the drawing of conclusions about the accuracy of the results from the use of the methods that will be applied. For this purpose, the slopes of two mines (Northern Mathiatis Mine, Corta Atalaya) were studied with three methods in order to calculate the safety factor for various combinations of cohesion values and friction angles, and then to calculate the failure distances (lengths) (crest-crack distance) up to two failures. In the Mathiatis mine, the limit analysis method based on the upper limit theorem was applied by determining the kinematic mechanism of the slope and calculating the work produced during sliding, while the energy consumed is calculated based on the theory of ideal plasticity and the Mohr-Coulomb criterion. In the Corta Atalaya mine, the methods of circular failure diagrams and the simplified Bishop strip method were applied. The method of circular failure diagrams was studied from the book "Rock Slope Engineering" by Wyllie & Mah with the conditions that the slopes are homogenized and the circular slip surface passes through the foot of the slope. To solve the simplified Bishop method, the free program HYRCAN with Mohr-Coulomb criterion was used. In all methods, the SDs were calculated and for those whose result was less than unity, the horizontal distance of the first and second failure was calculated, which were then summed to calculate the total failure distance. From the application of the methods, the minimum distances according to which a settlement is safe were calculated in both cases.

Keywords: Safety factor, failure, settlement, slope, horizontal distance crest-failure, open pit exploitation

Περιεχόμενα

1ο Κεφάλαιο Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Αντικείμενο	1
1.3 Δομή Εργασίας.....	3
2ο Κεφάλαιο Κατολισθήσεις – Κατακρημνήσεις	4
2.1 Κατηγορίες Κατολισθήσεων	6
2.2 Αιτίες των κατολισθήσεων	13
3ο Κεφάλαιο Μηχανισμοί Ολισθήσεων.....	15
3.1 Κυκλική αστοχία	16
3.1.1 Προϋποθέσεις κυκλικής αστοχίας και μέθοδοι ανάλυσης.....	16
3.1.2 Σχήμα επιφάνειας ολίσθησης	18
3.1.3 Παραγωγή κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας	19
3.1.4 Χρήση των κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας	21
3.1.5 Θέση κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και ρωγμή εφελκυσμού	25
3.2 Λεπτομερής ανάλυση ευστάθειας κυκλικών αστοχιών	27
3.2.1 Μέθοδος λωρίδων Bishop	28
3.2.2 Διαδικασία ανάλυσης σταθερότητας	28
3.2.3 Χρήση μη γραμμικού κριτηρίου αστοχίας στην ανάλυση ευστάθειας Bishop	32
3.2.4 Λογισμικό HYRCAN.....	34
3.3 Θεωρήματα Άνω και Κάτω Ορίων της πλαστικότητας.....	38
3.3.1 Εισαγωγή.....	38
3.3.2 Περιγραφή Ανάλυσης ορίων βασισμένη στο θεώρημα του Άνω Ορίου σε συνθήκες στράγγισης.	39
4ο Κεφάλαιο Μελέτη Αστοχίας Ορυχείων.....	44
4.1 Μελέτη σταθερότητας στο Βόρειο Μεταλλείο Μαθιάτη με την Ανάλυση ορίων βασιζόμενη στο θεώρημα του Άνω Ορίου.	44
4.2 Μελέτη σταθερότητας Μεταλλείου Corta Atalaya.	56
Α) Μελέτη με χρήση κυκλικών διαγραμμάτων και με δεδομένα:.....	57
Β) Μελέτη με χρήση απλοποιημένης μεθόδου BISHOP μέσω λογισμικού HYRCAN	65
5ο Κεφάλαιο Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	73
Βιβλιογραφία	75

1ο Κεφάλαιο Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Η εργασία έχει σαν στόχο την μελέτη επίδρασης αστοχίας πρανούς υπαίθριας εκμετάλλευσης σε παρακείμενο οικισμό.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί η περίπτωση της κυκλικής αστοχίας σε πρανή του εγκαταλελειμμένου βόρειου μεταλλείου στον **Μαθιάτη** της Κύπρου και του ήδη εκμεταλλευμένου ορυχείου **Corta Atalaya** στην Ισπανία, καθώς και τα δύο πληρούν τις προϋποθέσεις εφαρμογής της.

Στο βόρειο μεταλλείο του **Μαθιάτη**, τα πρανή αποτελούνται από δύο στρώματα , το ένα από υγιές πέτρωμα και αποθέσεις στείρων και το άλλο τμήματα πρανών από υγιές πέτρωμα.

Το πέτρωμα είναι οφιολιθικό δεδομένου ότι τα ηφαιστιογενή κοιτάσματα Cu-Zn (Τύπου Κύπρου) συνδέονται με οφιολιθικά πετρώματα και ιδιαίτερα με το τμήμα των βασικών λαβών των οφιολίθων (Χρηστίδης 2015).

Τα πρανή του **Corta Atalaya** αποτελούνται από ηφαιστειακά ή ηφαιστιογενή πετρώματα τής λεγόμενης “Φραγμένης Ζώνης του Rio Tinto” με κυρίαρχα πετρώματα Ανδεσίτες, Ρυόλιθους, Σχιστόλιθους καθώς και πυριτικές Φραγμένες Φλέβες.

1.2 Αντικείμενο

Το πως επηρεάζεται ένας οικισμός από μία παρακείμενη υπαίθρια εκμετάλλευση έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές, όπως οι Huini Wang et al (13/05/2022) που μελέτησαν μέσω δορυφόρων και ραντάρ διαφορές στη υψομετρία σημείων σε υπόγειο λατομείο (Daye City, Κίνα), οι Hossain Mohammad Arifeen et al (9/12/2021) οι οποίοι μελέτησαν το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα ενός ανθρακωρυχείου στο Μπαγκλαντές και οι Griselda Vázquez-Quintero et al (27/04/2025) το πως έχει επηρεάσει περιβαντολογικά, οικονομικά και κοινωνικά τους κατοίκους του Analos στην Chihuahua (Μεξικό) που είναι ένας οικισμός γύρω από ένα μεταλλείο. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ασφάλεια ενός οικισμού παρακείμενου σε μία υπαίθρια εκμετάλλευση. Για να προσδιοριστεί η ασφάλεια ως αναφορά τον συντελεστή ασφαλείας και την απόσταση της αστοχίας

χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικές μέθοδοι. Από αυτές τις μεθόδους εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια και τη χρηστικότητα της κάθε μεθόδου. Παρόμοια και κάποιοι ερευνητές έχουν μελετήσει διάφορες μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανούς όπως ο Javad Vaze Mobaraki (30/01/2021), οι Sami Ullah et al (28/05/2020) και οι Muhammad Israr Khan et al (17/06/2020). Οι διαφορές της παρούσας εργασίας με τις παραπάνω μελέτες επικεντρώνονται στον τρόπο διεξαγωγής των μετρήσεων και στην επικέντρωση του υπολογισμού της απόστασης αστοχίας καθώς και του συντελεστή ασφαλείας.

Η περίπτωση της κυκλικής αστοχίας αφορά «μια ρωγματομένη ή κατακερματισμένη βραχομάζα, στην οποία η θραύση ορίζεται από μία επιφάνεια κυκλικού τομέα» (Στειακάκης 2019)

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα μια κυκλική αστοχία προκύπτουν όταν μεμονωμένα σωματίδια σε ένα έδαφος ή μία βραχώδη μάζα είναι πολύ μικρά σε σύγκριση με το μέγεθος του πρανούς. (Wyllie & Mah, 2005)

Η ανάλυση ευστάθειας της κυκλικής αστοχίας πραγματοποιείται :

α) Για το μεταλλείο στον **Μαθιάτη** με ανάλυση ορίων βασισμένη στο θεώρημα του άνω ορίου της πλαστικότητας (**Chen, 1975**) η οποία προϋποθέτει ότι το έδαφος έχει μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά και ικανοποιεί το κριτήριο απόδοσης Coulomb και τον σχετικό κανόνα ροής (**Steiakakis et al. 2023**) σε δύο στρώματα.

β) Για το ορυχείο της **Corta Atalaya**

- με χρήση κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας σε πλήρως αποστραγγισμένο πρανές, με την προϋπόθεση ότι το υλικό που σχηματίζει το πρανές θα πρέπει να είναι ομοιογενές με ομοιόμορφες ιδιότητες αντοχής διάτμησης κατά μήκος της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης που διέρχεται από το πόδι του πρανούς. (Wyllie-Mah, 2005)
- Με την απλοποιημένη μέθοδο λωρίδων **Bishop** με το κριτήριο αστοχίας **Mohr-Coulomb** η οποία υποθέτει μια κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, οι πλευρικές δυνάμεις είναι οριζόντιες και η

ανάλυση ικανοποιεί τις κατακόρυφες δυνάμεις και τη συνολική ισορροπία ροπών (Wyllie & Mah, 2005)

Η εφαρμογή της γίνεται μέσω χρήσης του λογισμικού **HYRCAN**, (**Roozbeh 2024**), **Geowizard.org**.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να εντοπιστούν οι τυχόν οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία στα πρηνή των μεταλλείων **Μαθιάτη** και **Corta Atalaya** για την αποφυγή κινδύνων κατάρρευσης οικισμών που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν, εφαρμόζοντας τις παραπάνω αναλύσεις.

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται ως εξής :

Στο **πρώτο** κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί των κατολισθήσεων-κατακρημνίσεων, περιγράφονται οι κατηγορίες των κατολισθήσεων και οι αιτίες που τις δημιουργούν.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο αναφέρονται τα είδη αστοχιών με εξειδίκευση στην κυκλική αστοχία. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την ανάλυση της ευστάθειας με τη θεωρητική ανάπτυξη της ανάλυσης ορίων βασισμένη στο θεώρημα του άνω ορίου, της χρήσης των κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας και της απλοποιημένης μεθόδου λωρίδων **Bishop**. Επίσης περιγράφεται η εφαρμογή των μεθόδων λωρίδων **Bishop** με χρήση του λογισμικού **HYRCAN**.

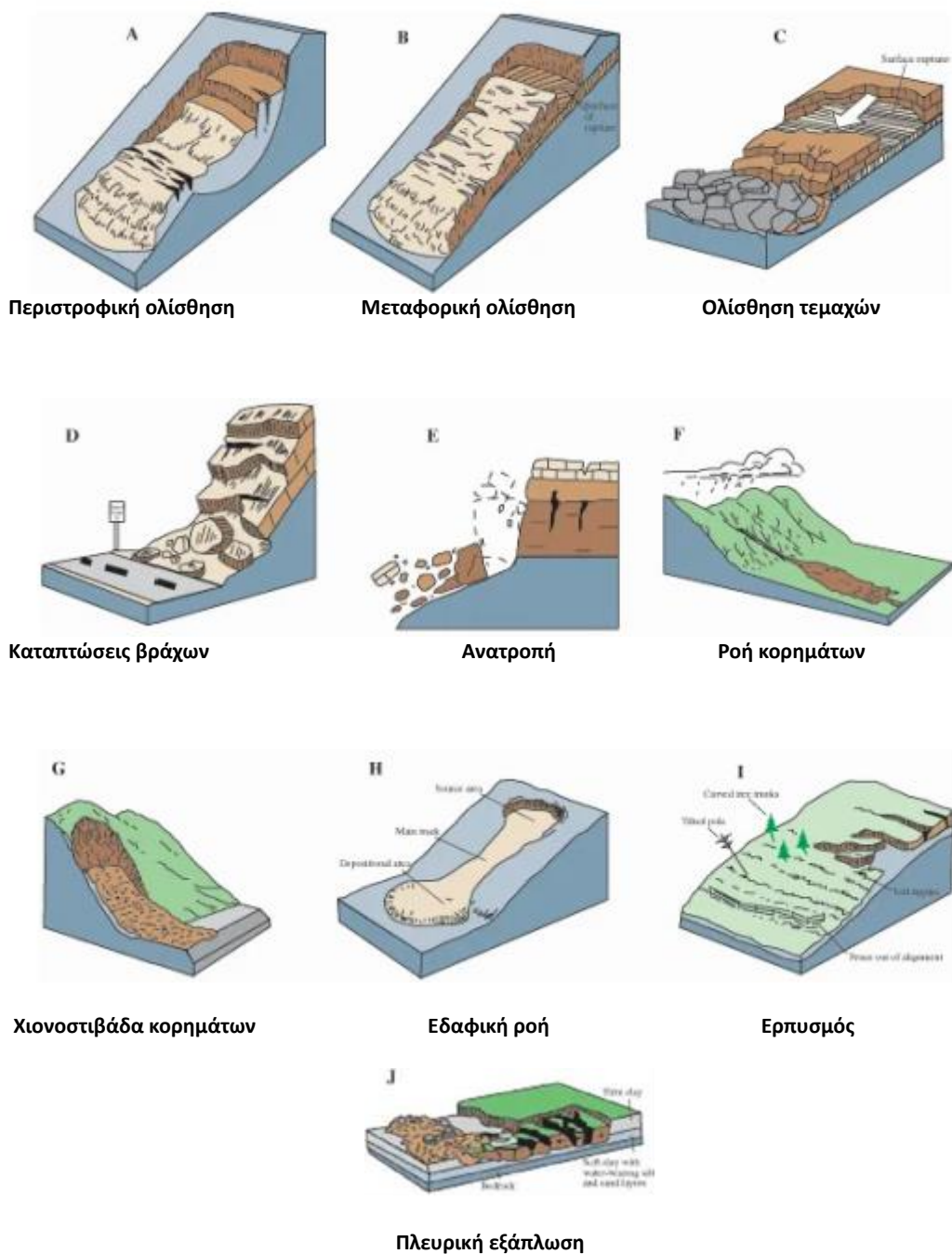
Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναπτύσσονται οι μελέτες των ορυχείων, στο **Μαθιάτη** με ανάλυση ορίων βασισμένη στο θεώρημα του άνω οριακού θεωρήματος της ιδεατής πλαστικότητας και του **Corta Atalaya** με χρήση κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας και την απλοποιημένη μέθοδο λωρίδων **Bishop** με χρήση του λογισμικού **HYRCAN**.

Τέλος στο **τέταρτο** κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη των πρηνών των μεταλλείων καθώς και οι προτάσεις για την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

2ο Κεφάλαιο Κατολισθήσεις – Κατακρημνήσεις

Οι κατολισθήσεις είναι μετακινήσεις βράχων ή εδαφών που λαμβάνουν χώρα σε κεκλιμένες μορφολογικά επιφάνειες, με την επίδραση της βαρύτητας. Οι πιο κοινοί τύποι κατολισθήσεων είναι **η πτώση, η ολίσθηση και η ροή**.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κατολισθήσεων, οι οποίοι ταξινομούνται με βάση το είδος του υλικού που εμπλέκεται και τον τρόπο με τον οποίο κινούνται. Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους τύπους κατολισθήσεων είναι:



Σχήμα 2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση τύπων ολισθήσεων (Λουπασάκης, 2014)

Η επικινδυνότητα μιας κατολίσθησης, εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται. Ο Varnes (1978) διακρίνει τις κατολισθήσεις, με βάση την ταχύτητα εξέλιξή τους, σε αργές, μέτριες και γρήγορες (πίνακας 2.1). (2005)

Πίνακας 2.1 . Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης των πρανών (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985)

Ταχύτητα μετακίνησης		Χαρακτηρισμός της μετακίνησης
3m/sec		εξαιρετικά γρήγορη
0,3m/min		πολύ γρήγορη
1,5m/d		γρήγορη
1,5m/μήνα		μέτρια
1,5m/χρόνο		αργή
0,6m/χρόνο		πολύ αργή
		εξαιρετικά αργή

Είναι γεγονός ότι πολλές κατολισθήσεις, ανεξάρτητα του μεγέθους τους παρουσιάζουν κατά την διάρκεια της εξέλιξης τους μικτούς χαρακτήρες, δηλαδή τμήματα (ή και το σύνολο) της κατολισθαίνουσας μάζας κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες μετακίνησης.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων αφορά το μέγεθος μετακίνησης της κατολισθαίνουσας μάζας, το οποίο επηρεάζει αποφασιστικά της κατασκευές και τα τεχνικά έργα που γίνονται για την προστασία των πρανών. Η μετακίνηση μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά χιλιόμετρα και θα πρέπει πάντα να εξετάζεται με συνδυασμό με την ταχύτητα εξέλιξης και τις διαστάσεις (σε όγκο) της κατολίσθησης. Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι οι κατολισθήσεις μεγάλης έκτασης, δεν αφορούν συνήθως μια κατολίσθηση, αλλά σμήνος μικρών και μεγάλων ομοειδών κατολισθήσεων, οι οποίες επειδή βρίσκονται κάτω από τους

ίδιους ή παρεμφερείς μηχανισμούς γένεσης, εξελίσσονται ομαδικά ή αλυσιδωτά (Στειακάκης 2019, Μονόπωλης 1995).

Οι μηχανικοί και οι ερευνητές χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για να εξασφαλίσουν τον ασφαλή σχεδιασμό ενός πρανούς. Η επιλογή της καταλληλότερης προσέγγισης εξαρτάται από διάφορα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων των γεωτεχνικών παραμέτρων και των συνθηκών που επικρατούν (σεισμική δραστηριότητα και παρουσία νερού) στην περιοχή μελέτης.

2.1 Κατηγορίες Κατολισθήσεων

Από πολλούς ερευνητές (Heim 1885, Penta 1954, Desio 1961, Zaruba-Menci 1967, 1970) έχει επιχειρηθεί η ταξινόμηση των κατολισθήσεων είτε με βάση παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση του φαινομένου, είτε με βάση διάφορες παραμέτρους της κατολίσθησης που μπορούν να μετρηθούν.

Ο Varnes (1978) έδωσε μια ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση τη γεωλογική σύσταση των σχηματισμών που κατολισθαίνουν, το είδος της κίνησης και τις αιτίες εκδήλωσης τους (υγρασία γεωυλικών, μορφολογία πρανούς κ.ά.).

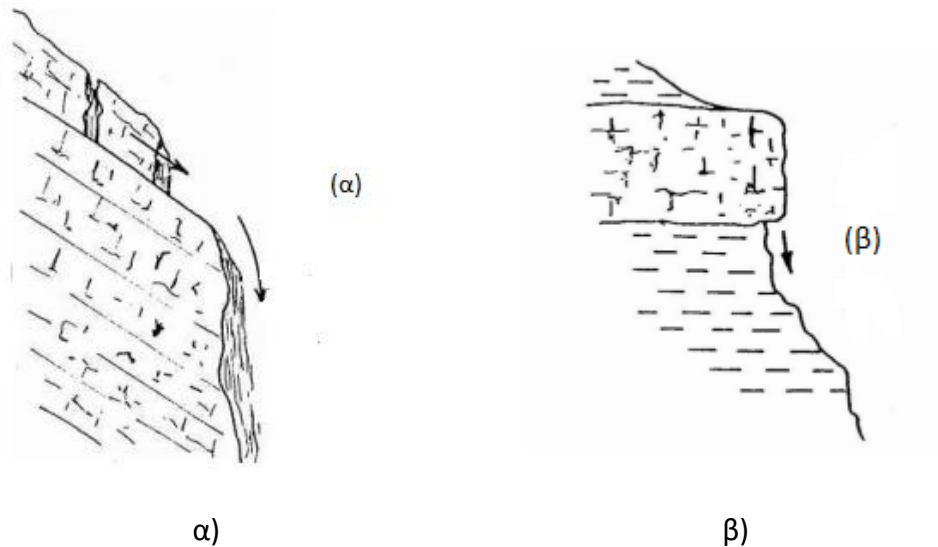
Γενικά στους βασικούς τύπους κατολισθήσεων περιλαμβάνονται: α) οι πτώσεις, β) οι ανατροπές, γ) οι ολισθήσεις (περιστροφικές και επίπεδες – μεταθετικές), δ) οι πλευρικές εξαπλώσεις, ε) οι ροές, στ) ο ερπυσμός και ζ) οι σύνθετες μετακινήσεις.

Α) Πτώσεις. Θεωρούνται οι ελεύθερες πτώσεις τμημάτων πετρώματος, ή πολύ σκληρού εδάφους (Σχ. 2.2), τα οποία αποσπώνται απότομα από κλίσεις με μεγάλη κλίση. (Καροτσιέρης 1993) Πολλές φορές εκδηλώνεται αρχικά μια ολίσθηση της εδαφικής μάζας ή του βραχώδους τεμάχους και στη συνέχεια ακολουθεί η πτώση (Σχ. 2.2α).

Εκτός από τη μεγάλη κλίση του πρανούς, στην εκδήλωση των πτώσεων συντελούν:

- η ευνοϊκή διάταξη των ασυνεχειών (επίπεδα στρώσης, διακλάσεις, ρήγματα) σε σχέση με τη μορφολογία
- η πυκνότητα των ασυνεχειών,
- η υποσκαφή και
- η δράση του νερού (σε υγρή ή στερεή φάση).

Μια πολύ συνηθισμένη περίπτωση πτώσεων προκύπτει από την υποσκαφή της βάσης ενός γεωλογικού στρώματος, το οποίο βρίσκεται πάνω από ένα άλλο πιο ευαποσάθρωτο (Σχ 2.2β). Όταν η υποσκαφή προχωρήσει αρκετά, τότε το τμήμα του υπερκειμένου πετρώματος που προεξέχει, αποκόπτεται και πέφτει λόγω του βάρους του, ή και με την επίδραση του νερού.



Σχήμα 2.2.α) Πτώση βράχου που έπεται ολίσθησης και β) Πτώση βράχου λόγω υποσκαφής
(Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993)

Β) Ανατροπές. Η ανατροπή (Σχ. 2.3) προκύπτει από περιστροφική κίνηση ενός ή περισσότερων τεμαχίων, γύρω από ένα άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους τους. Προκαλείται με τη βαρύτητα και τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή και από το νερό το οποίο βρίσκεται μέσα στις ρωγμές του πετρώματος.



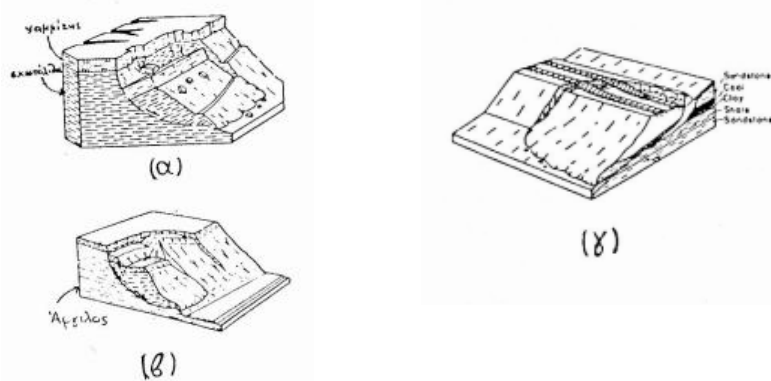
Σχήμα 2.3. Κατολίσθηση βράχου με ανατροπή (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993).

Γ) Ολισθήσεις. Οι ολισθήσεις διακρίνονται οι περιστροφικές και οι μεταθετικές ολισθήσεις. Η μετακίνηση προκύπτει από διατμητική παραμόρφωση των

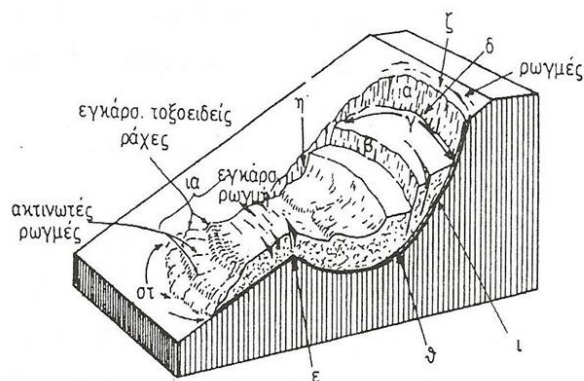
σχηματισμών και μετατόπιση κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, που μπορεί να είναι ορατές ή να τεκμαίρονται. Η κίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή η διατμητική θραύση μπορεί να μην αναπτύσσεται ταυτόχρονα σ' όλη την επιφάνεια αστοχίας, αλλά να επεκτείνεται σταδιακά αρχίζοντας από μια περιοχή τοπικής θραύσης.

Περιστροφικές ολισθήσεις (Rotational slides)

Η πιο συνηθισμένη μορφή περιστροφικής ολίσθησης είναι η κάθηση (slump) (Σχ. 2.4, 2.5). Πρόκειται για ολίσθηση ως προς μια κοίλη επιφάνεια θραύσης. Οι καθήσεις, απλές ή σε συνδυασμό με άλλους τύπους κίνησης, αφορούν ίσως το μεγαλύτερο ποσοστό μετακινήσεων των πρανών. Αν η ολίσθηση εκτείνεται σε αρκετό μήκος παράλληλα με το πρανές, τότε η επιφάνεια θραύσης πλησιάζει σε σχήμα ένα τομέα κυλίνδρου που ο άξονας του είναι παράλληλος προς το πρανές. (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985)



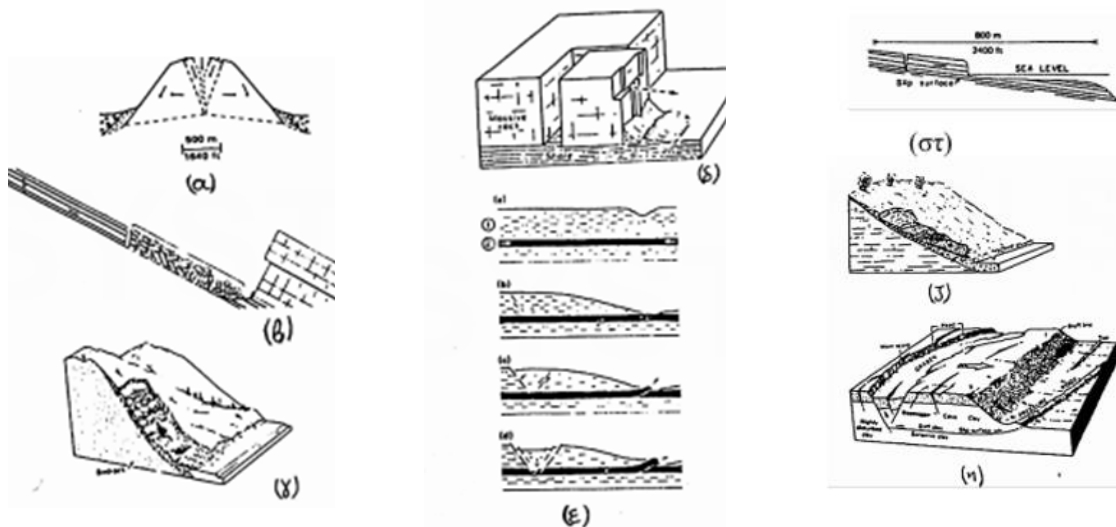
Σχήμα 2.4. Περιστροφικές ολισθήσεις (α) βράχων (εξαιρετικά μέχρι μέτρια μικρή ταχύτητα, (β) γαιών, (γ) επίχωσης που ελέγχεται από θραύση στο υποκείμενο έδαφος (καθήσεις) (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985)



Σχήμα 2.5. Τυπική κατολίσθηση τύπου κάθησης στην οποία διακρίνονται τα επιμέρους τμήματα και χαρακτηριστικά στοιχεία (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993)

Επίπεδες ή μεταθετικές ολισθήσεις (Translational slides)

Στις επίπεδες ή μεταθετικές ολισθήσεις η μάζα μετακινείται ως προς μια κατά προσέγγιση επίπεδη ή ομαλά κυματοειδή επιφάνεια, με πολύ μικρή περιστροφική κίνηση ή κάμψη (Σχ. 2.6) (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985). Μια μεταθετική ολίσθηση χαρακτηρίζεται σαν: α) ολίσθηση τεμάχους (block slide), όταν η κινούμενη μάζα αποτελείται από μια μόνο μονάδα που δεν είναι έντονα παραμορφωμένη ή από λίγες στενά συνδεδεμένες ομάδες και β) κερματισμένη ολίσθηση όταν η μετακινούμενη μάζα αποτελείται από πολλές ημιανεξάρτητες μονάδες (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985). Η κίνηση στις μεταθετικές ολισθήσεις ελέγχεται συνήθως από επιφάνειες ασυνεχειών (όπως τα επίπεδα στρώσης, τα ρήγματα, τις ρωγμές) και τη διαφοροποίηση της διατμητικής αντοχής μεταξύ των επιφανειών αυτών (Στειακάκης 2019).



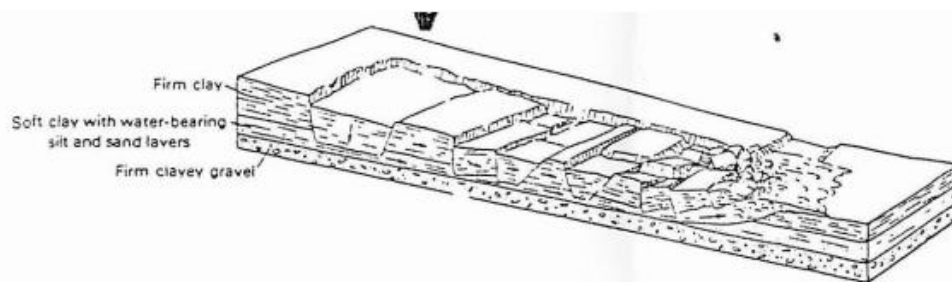
Σχήμα. 2.6 Μεταθετικές ολισθήσεις α) Βράχων (Beck 1967), β) Τεμαχών βράχων, γ) αποσαθρωμάτων (Ταχύτητα μικρή μέχρι μεγάλη), δ) Βράχων σε λατομείο (Vranes 1958,1976), ε) ανάπτυξη ολισθήσεων σε οριζόντια στρώματα αργιλόλιθων και κάρβουνου που προκαλείται από τη χαλάρωση των οριζόντιων τάσεων, στ) μεταθετική ολίσθηση στο Point Fermin (California) μέγιστη ταχύτητα μετακίνησης 3cm/εβδομάδα (Miller1931-Varnes 1958), ζ) ολίσθηση αποσαθρωμάτων εδάφους που αποσυντίθεται (Kessel 1943, Varnes 1958), η) ολίσθηση τεμάχους γής (Hansen 1965) (Στειακάκης 2019, Καλλέργης, Κούκης, 1985).

Δ) Πλευρικές εκτάσεις/εξαπλώσεις (Lateral spreads). Η κίνηση που επικρατεί στις κατολισθήσεις του τύπου αυτού είναι η πλευρική εξάπλωση του γεωυλικού η οποία διευκολύνεται από τις διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές (Σχ. 2.7).

Διακρίνονται δύο τύποι πλευρικών εξαπλώσεων:

- Αυτές στις οποίες δεν υπάρχει μια σαφώς καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης ή ζώνη πλαστικής ροής που να ελέγχει τη κίνηση και
- Εκείνες στις οποίες προκαλείται κατακερματισμός και εξάπλωση του συνεκτικού γεωυλικού.

Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου είναι πιθανόν να περιλαμβάνουν ενδείξεις περιστροφής, μετάθεσης αλλά και ροής και ως εκ τούτου οι πλευρικές εκτάσεις μπορεί να θεωρηθούν και σαν σύνθετες μετακινήσεις. (Στειακάκης 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985)



Σχήμα 2.7 Πλευρικές εκτάσεις (Στειακάκης 2019, Varnes, 1978)

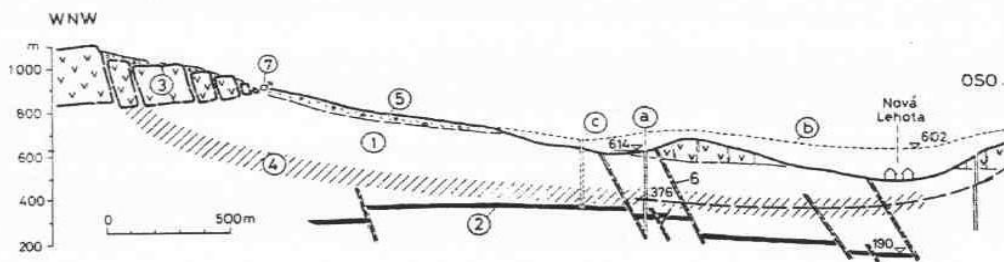
Ε) Ροές (Flows). Πρόκειται για κατολισθήσεις στις οποίες παρατηρείται σχετική μετακίνηση των συστατικών της κινούμενης μάζας, η οποία μοιάζει με ένα παχύρευστο υγρό μεγάλου ιξώδους. Εκδηλώνεται μεγάλη παραμόρφωση του γεωυλικού και έντονη διαφοροποίηση της εσωτερικής του δομής. Οι επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μάζα δεν είναι συνήθως ορατές, ενώ η ταχύτητα μετακίνησης είναι τις περισσότερες φορές γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη (1,5 m/day – 3 m/day). Ροές εκδηλώνονται τόσο σε συνεκτικά (αργιλικά), όσο και σε ψαθυρά (αμμώδη) εδάφη. Επίσης, ροές εμφανίζονται και στα πλευρικά κορήματα που βρίσκονται σε απότομες πλαγιές.

Παράδειγμα εκδήλωσης ροής αποτελεί η κατολίσθηση που λαμβάνει χώρα όταν σημαντικές ποσότητες νερού εισχωρήσουν σε αργιλομιγή εδάφη, στα οποία διαμορφώνεται μια κατάσταση λίγο έως πολύ κοντά στο όριο υδαρότητας τους. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού και στην περίπτωση που η κλίση του πρανούς είναι ευνοϊκή, αρχίζει η ροή του γεωυλικού. Μια χαρακτηριστική περίπτωση ροής εμφανίζεται στις ευαίσθητες αργίλους, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί από πτώση βράχων (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993)

ΣΤ) Ερπυσμός. Μερικές από τις μετακινήσεις που χαρακτηρίζονται σαν ροές, αναφέρονται από πολλούς συγγραφείς σαν ερπυσμός (creep). Ο Varnes (1976), αναφέρει ότι ο όρος «ερπυσμός» πρέπει να περιοριστεί στις αργές και συνεχείς παραμορφώσεις των γεωυλικών. (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985)

Όμως υπάρχουν διαφορετικές απόψεις σχετικά με τη φύση του ερπυσμού οι οποίες, έχουν οδηγήσει σε σύγχυση. Η κατάσταση περιπλέκεται και από το γεγονός ότι ερπυσμός μπορεί να εκδηλωθεί σε διάφορους τύπους κατολισθήσεων (ανατροπές, ολισθήσεις, εκτάσεις και ροές). Ο Ter Stepanian (1980), μελετώντας το φαινόμενο, αναφέρει ότι ο ερπυσμός των πρανών αφορά μια αργή (μακράς διάρκειας) παραμόρφωση, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις προηγείται της κατολίσθησης. Ορίζει σαν ερπυσμό την παραμόρφωση που υφίσταται μια εδαφική μάζα σαν ενιαίο (συνεχές) σώμα. Εμφανίζεται σε εδάφη με μεγάλες δυνάμεις επαφής μεταξύ των κόκκων, σε αντίθεση με τα μη συνεκτικά (επιφανειακά) στρώματα, στα οποία η παραμόρφωση οφείλεται στη σχετική μετακίνηση των μεμονωμένων κόκκων που προκαλείται με τη βαρύτητα.

Στο Σχ. 2.8 παρουσιάζεται ένα πρανές από την περιοχή της Κεντρικής Σλοβακίας με τυπική κίνηση ερπυσμού (Στειακάκης, 2019, Zaruba and Menci, 1982). Το πρανές διαμορφώνεται σε ηφαιστειακούς σχηματισμούς που καλύπτονται από τεταρτογενείς αποθέσεις. Ο ερπυσμός που προκλήθηκε λόγω της έντονης μορφολογίας, έχει προκαλέσει αστοχίες, η εξέλιξη των οποίων είναι αρκετά γνωστή από το παρελθόν. Όσον αφορά την ανάλυση του φαινομένου, ο ερπυσμός στη ρεολογία των ιξωδοπλαστικών υλικών υποδηλώνει την αργή αύξηση της παραμόρφωσης των υλικών με το χρόνο (κάτω από τη δράση σταθερών τάσεων που υπερέχουν συγκεκριμένου μεγέθους-ορίου), χωρίς η παραμόρφωση αυτή να φτάνει την τιμή που αντιστοιχεί στην αντοχή. Ο ερπυσμός εκδηλώνεται είτε στην περίπτωση που το όριο ερπυσμού (διατμητική τάση του γεωυλικού, μετά την οποία εμφανίζεται ερπυσμός) είναι μικρό, είτε στην περίπτωση που ο βαθμός ενεργοποίησης (ο λόγος της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης προς την διατμητική αντοχή) της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού είναι υψηλός. Και οι δύο περιπτώσεις είναι δυνατόν να εμφανιστούν στα πρανή.



Σχήμα 2.8. Σχηματική τομή σε θέση που εκδηλώνεται ερπυσμός, στην λιγνιτοφόρα λεκάνη Handlova, Σλοβακία (1-αργιλόλιθος, 2-γαιάνθρακας, 3-ανδεσίτης, 4-θεωρούμενη ζώνη διάτμησης, 5-πλευρικά κορήμματα, 6-ρήγμα, 7-πηγή) (Στειακάκης, 2019, Zaruba and Mencl, 1982).

Η πρώτη περίπτωση (υπο-επιφανειακός ερπυσμός) παρουσιάζεται σε επιφανειακά στρώματα όπου εξαιτίας της αποσάθρωσης και της εποχικής μεταβολής υγρασίας και θερμοκρασίας, η διατμητική αντοχή του εδάφους δεν είναι αρκετά υψηλή και ένα φαινόμενο ερπυσμού μπορεί να λάβει χώρα. Η δεύτερη περίπτωση (ερπυσμός βάθους) εμφανίζεται σε βάθος, όπου εξαιτίας της βαρύτητας και της αυξημένης συγκέντρωσης διατμητικών τάσεων, ο βαθμός ενεργοποίησης της διατμητικής αντοχής είναι μεγάλος. Κάτω από χαμηλά και μεσαία μεγέθη διατμητικών τάσεων, ο ρυθμός του ερπυσμού μειώνεται βαθμιαία, το φαινόμενο εξελίσσεται με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό και μπορεί να διαρκέσει δεκαετίες και εκατονταετίες. Όμως, κάτω από υψηλές διατμητικές τάσεις που προσεγγίζουν τη θραύση, ο ρυθμός του ερπυσμού αυξάνει με το χρόνο και το φαινόμενο ολοκληρώνεται με την αστοχία του πρανού (Στειακάκης, 2019, Ter Stepanian, 1980).

Ζ) Σύνθετες μετακινήσεις πρανών. Κατά κανόνα, οι μετακινήσεις των πρανών είναι συνδυασμός μετακινήσεων, περισσότερων του ενός τύπου οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω (Στειακάκης, 2019, Καλλέργης και Κούκης, 1985) και χαρακτηρίζονται σαν σύνθετες μετακινήσεις. Ιδιαίτερα επικίνδυνες, σύνθετες μετακινήσεις, αποτελούν οι εξαιρετικά γρήγορες πτώσεις βράχων – ροές κορημάτων, που συχνά αναφέρονται και σαν «χιονοστιβάδες» (rock-fall avalanche). Οι μετακινήσεις του τύπου αυτού είναι πολύ συνηθισμένες στις ορεινές περιοχές. Αναφέρεται ότι ένας τέτοιος τύπος μετακίνησης στο Elm της Ελβετίας στοίχισε τη ζωή σε 115 ανθρώπους. (Στειακάκης 2019).

2.2 Αιτίες των κατολισθήσεων

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης εξαρτάται από την μορφολογία, τη γεωλογική δομή, την κλίση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και τασικές συνθήκες) των σχηματισμών που δομούν το πρανές. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζουν το νερό (υγρασία, κατείσδυση, επιφανειακή και υπόγεια ροή) και η τυχόν σεισμική δράση (Στειακάκης, 2019).

Τα αίτια εκδήλωσης των κατολισθήσεων ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993):

1. Μείωση των μηχανικών παραμέτρων

α) Μείωση της συνοχής. Προκύπτει συνήθως με την απόπλυση διαλυτών ορυκτολογικών στοιχείων ή και της ορυκτής κόλλας από το υπόγειο νερό, με συνέπεια την μείωση της συνοχής του εδάφους. Σε περιπτώσεις υπερβολικά ευαίσθητων αργίλων, το νερό της κατείσδυσης είναι δυνατόν να μειώσει το ποσοστό των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων και να ελαττώσει την συνοχή των εδαφών αυτών. (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993). Μείωση στη συνοχή επέρχεται και με την ανάπτυξη παγετού, ενώ οι μεταβολές στην εδαφική υγρασία και τον υδροφόρο ορίζοντα προκαλούν μεταβολές στον όγκο του γεωλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της συνοχής λόγω των ρωγματώσεων που αναπτύσσονται από την εναλλαγή ξήρανσης-διαβροχής (συρρίκνωσης-διόγκωσης) του. Επίσης ελάττωση της συνοχής και ρευστοποίηση μπορεί να προκληθεί και από κραδασμούς υψηλής συχνότητας οι οποίοι προέρχονται από σεισμούς ή εκρήξεις.

β) Μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής. Η απομάκρυνση των λεπτών κόκκων ενός εδάφους από το νερό (μέσω της εσωτερικής διάβρωσης), έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής του.

Το νερό, επίσης παίζει και τον ρόλο του λιπαντικού, κυρίως όταν διαποτίζει αργιλικά κλάσματα του εδάφους τα οποία αποκτούν πλαστική ή και υδαρή συμπεριφορά.

γ) Μείωση της ενεργής τάσης. Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αυτό μπορεί να προκληθεί σε μια εδαφική

μάζα με την άνοδο της πιεζομετρικής στάθμης ή όταν το έδαφος καλυφθεί από νερά π.χ. στη λεκάνη κατάκλισης ενός φράγματος (Στειακάκης, 2019, Καροτσιέρης, 1993).

Ιδιαίτερα στην περίπτωση των βραχιδών πρανών, το νερό που πληροί τις ασυνέχειες, ωθεί μέσω της υδροστατικής πίεσης τα τεμάχια του πετρώματος προς το πρανές ενώ το νερό στην επιφάνεια ολίσθησης προκαλεί μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια μείωση της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας.

2. Αύξηση του βάρους της επισφαλούς μάζας

Όπως αναφέρει ο Καροτσιέρης (1993) προκαλείται με :

α) αύξηση του μοναδιαίου βάρους. Μπορεί να προκύψει με την προσθήκη νερού στον εδαφικό σχηματισμό από την επιφάνεια, ή με τριχοειδή ανύψωση από ένα χαμηλότερο επίπεδο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση του βάρους λόγω κορεσμού αφορά την περίπτωση γεωυλικού που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το γεωυλικό βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, υφίσταται άνωση και το βάρος του μειώνεται.

β) φόρτιση με πρόσθετο βάρος. Μπορεί να συμβεί ή με φυσική διεργασία ή με την παρέμβαση του ανθρώπου. Η πρώτη περίπτωση αφορά την συσσώρευση φερτών υλικών από προσχώσεις (κορήματα, πτώσεις βράχων), ενώ η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται στην φόρτιση με τις κατασκευές επιχωμάτων ή άλλων έργων στα πρανή.

3. Διαφοροποίηση της γεωμετρίας

Προκύπτει με αλλαγή της κλίσης του πρανού ή και διαφοροποίηση του ύψους του. Ο κυριότερος φυσικός, παράγοντας που προκαλεί αύξηση της κλίσης των πρανών είναι η διάβρωση τους από το νερό. Επίσης η δράση των κυμάτων της θάλασσας (ή μιας λίμνης) μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές στο ίδιο αποτέλεσμα. Η ανθρώπινη παρέμβαση αφορά τις εκχωματώσεις που γίνονται στις κάθε είδους ανοικτές εκσκαφές (για μεταλλευτικούς σκοπούς, συγκοινωνιακά έργα, την κατασκευή καναλιών, διωρύγων κλπ.). Ακόμη στην κατηγορία αυτή θα μπορούσαν να ενταχθούν και οι κάθε είδους επιχωματώσεις που δημιουργούν νέα πρανή.

3ο Κεφάλαιο Μηχανισμοί Ολισθήσεων

Οι διάφορες μορφές αστοχίας στα βραχώδη πρανή ταξινομούνται σύμφωνα με τους Hoek and Bray (1981) σε α) κυκλικές, β) επίπεδες, γ) αστοχίες σφήνας και δ) αστοχίες με ανατροπή (Σχ. 3.1).

α) Κυκλική αστοχία (Circular failure)

Αφορά την περίπτωση μιας ρωγματομένης ή κατακερματισμένης βραχομάζας, στην οποία η θραύση ορίζεται από μια επιφάνεια αστοχίας κυκλικού τομέα (Σχ. 3.1a).

β) Επίπεδη αστοχία (Plane failure)

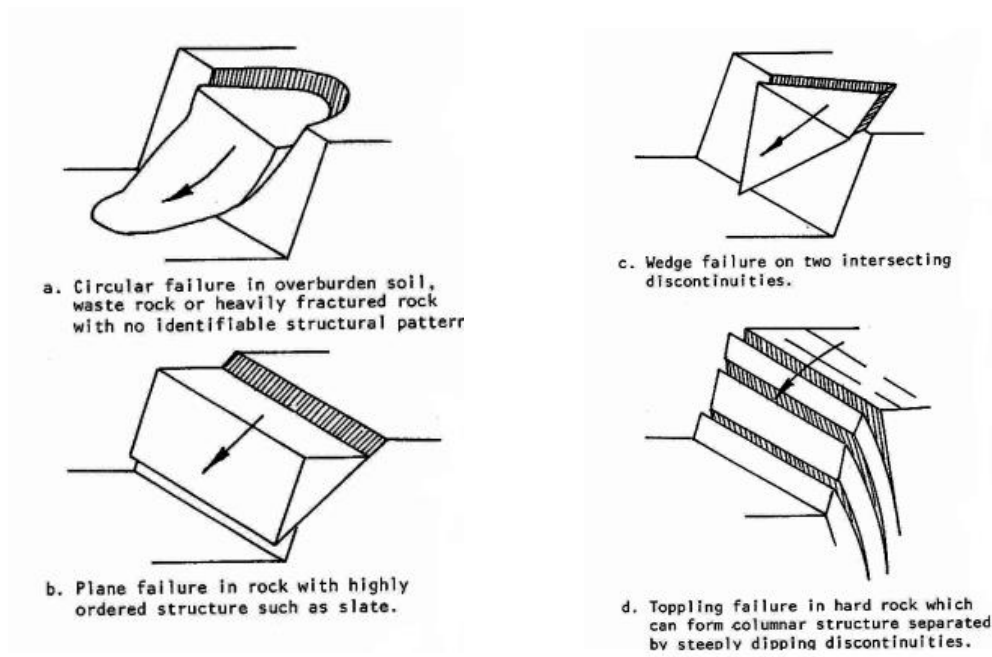
Σε βραχώδη πρανή μπορεί να συμβεί ολίσθηση ενός τεμάχους προς τα κατόντη κατά την έννοια του επιπέδου μιας ασυνέχειας (Σχ. 3.1b).

γ) Σφηνοειδής αστοχία (Wedge failure)

Μια άλλη περίπτωση κατολίσθησης σε βραχώδη πρανή, αφορά την αστοχία με μορφή σφήνας. Το τέμαχος περιορίζεται από δύο τεμνόμενες ασυνέχειες: την ανώτερη ελεύθερη επιφάνεια της μάζας, από την οποία αποσπάται η σφήνα και την κεκλιμένη επιφάνεια του πρανού (Σχ.3.1c).

δ) Αστοχία με Ανατροπή (Toppling failure)

Ανατροπή συμβαίνει όταν ένα τέμαχος δεν μπορεί να ολισθήσει λόγω μικρής κλίσης της επιφάνειας ολίσθησης (μικρότερες από τη γωνία τριβής μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας) και επιπλέον η συνισταμένη των δυνάμεων που εξασκούνται στο τέμαχος, δημιουργεί ροπή ως προς μια εξωτερική ακμή της βάσης του η οποία και το ανατρέπει (Σχ.3.1d) (Στειακάκης 2019, Καροτσιέρης, 1993).



Σχήμα 3.1 Κύριοι τύποι αστοχίας σε βραχώδη πρανή (Στειακάκης 2019, Hoek and Bray 1981)

Στη παρούσα εργασία (μελέτη) για την ανάλυση μιάς κυκλικής αστοχίας θα εφαρμοστούν :

- α) Η μέθοδος των Νομογραμμάτων (Σύμφωνα με το βιβλίο «Wyllie & Mah - Rock Slope Engineering»
- β) Η μέθοδος του άνω ορίου σύμφωνα με την εργασία «A.03 2023_Stability Analysis of a Multi-Layered Slope in an Open Pit Mine των Εμμ. Στειακάκη, Γ. Ξηρουδάκη et al.»
- γ) Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

3.1 Κυκλική αστοχία

3.1.1 Προϋποθέσεις κυκλικής αστοχίας και μέθοδοι ανάλυσης

Η αστοχία των πλαγιών των βράχων ελέγχεται από γεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως επίπεδα στρωμνής και αρμοί που χωρίζουν τον βράχο σε ασυνεχή μάζα. Υπό αυτές τις συνθήκες, μία ή περισσότερες από τις ασυνέχειες ορίζουν κανονικά την επιφάνεια της ολίσθησης. Ωστόσο, στην περίπτωση ενός βράχου που έχει υποστεί στενή θραύση ή πολύ φθαρμένου βράχου, δεν υπάρχει πλέον ένα έντονα καθορισμένο δομικό σχέδιο και η επιφάνεια της ολίσθησης είναι ελεύθερη να βρει τη

γραμμή ελάχιστης αντίστασης μέσα στο πρανές. Οι παρατηρήσεις των αστοχιών των πρανών σε αυτά τα υλικά υποδηλώνουν ότι αυτή η επιφάνεια ολίσθησης γενικά παίρνει τη μορφή κύκλου και οι περισσότερες θεωρίες ευστάθειας βασίζονται σε αυτήν την παρατήρηση. Το Σχ. 3.2 δείχνει μια τυπική κυκλική αστοχία σε μια πλαγιά βράχου με υψηλή φθορά πάνω από έναν αυτοκινητόδρομο. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα προκύψει κυκλική αστοχία προκύπτουν όταν τα μεμονωμένα σωματίδια σε ένα έδαφος ή μια βραχώδη μάζα είναι πολύ μικρά σε σύγκριση με το μέγεθος του πρανούς. Ως εκ τούτου, ο σπασμένος βράχος σε ένα γέμισμα θα τείνει να συμπεριφέρεται ως «χώμα» και θα αστοχεί σε κυκλική λειτουργία όταν οι διαστάσεις του πρανούς είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των θραυσμάτων βράχου. Ομοίως, το έδαφος που αποτελείται από άμμο, λάσπη και μικρότερα μεγέθη σωματιδίων θα εμφανίζει κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, ακόμη και σε πλαγιές μόνο λίγων μέτρων σε ύψος. Ιδιαίτερα αλλοιωμένοι και φθαρμένοι βράχοι, καθώς και βράχοι με στενές αποστάσεις, τυχαία προσανατολισμένες ασυνέχειες, όπως ορισμένοι ταχέως ψυχόμενοι βασάλτες, θα τείνουν επίσης να αστοχούν με αυτόν τον τρόπο. Είναι σκόπιμο να σχεδιαστούν πρανή σε αυτά τα υλικά με την υπόθεση ότι θα αναπτυχθεί μια κυκλική διαδικασία αστοχίας (Wyllie & Mah, 2005)

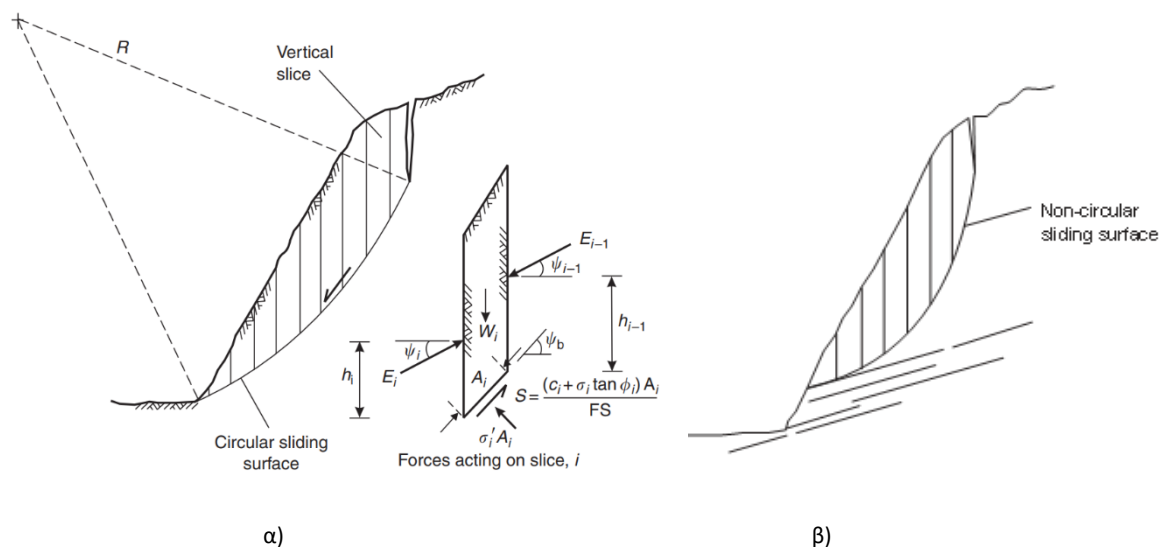


Σχήμα 3.2 Κυκλική αστοχία σε πολύ φθαρμένο, γρανιτικό βράχο (στον αυτοκινητόδρομο 1, κοντά στο Devil's Slide, Pacifica, Καλιφόρνια).

3.1.2 Σχήμα επιφάνειας ολίσθησης

Το πραγματικό σχήμα της «κυκλικής» επιφάνειας ολίσθησης επηρεάζεται από τις γεωλογικές συνθήκες στο πρηνές. Για παράδειγμα, σε μια ομοιογενώς αδύναμη ή αποξηραμένη μάζα βράχου ή ένα γέμισμα βράχου, η αστοχία είναι πιθανό να σχηματιστεί ως μια ρηχή, μεγάλης ακτίνας επιφάνεια που εκτείνεται από μια ρωγμή τάνσης κοντά πίσω από την κορυφή μέχρι το πόδι του πρηνούς (Σχ. 3.3(α)). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με αστοχίες σε υλικά υψηλής συνοχής, χαμηλής τριβής, όπως οι άργιλοι, όπου η επιφάνεια μπορεί να είναι βαθύτερη με μικρότερη ακτίνα που μπορεί να εξέρχεται πέρα από το πόδι του πρηνούς. Το Σχ. 3.3(β) δείχνει ένα παράδειγμα συνθηκών στις οποίες το σχήμα επιφάνειας της ολίσθησης τροποποιείται από τη γεωλογία του πρηνούς. Εδώ η κυκλική επιφάνεια στον επάνω, φθαρμένο βράχο σπάει από τον ρηχό, ισχυρότερο βράχο κοντά στη βάση. Οι αναλύσεις ευστάθειας και των δύο τύπων επιφανειών μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας μεθόδους κυκλικής αστοχίας, αν και για την τελευταία περίπτωση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία που επιτρέπει τον καθορισμό του σχήματος της επιφάνειας.

Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πρηνούς θα υπάρχει μια επιφάνεια ολίσθησης για την οποία ο συντελεστής ασφάλειας είναι ελάχιστος - συνήθως ονομάζεται "κρίσιμη επιφάνεια". Η διαδικασία για την εύρεση της κρίσιμης επιφάνειας είναι η εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού αναλύσεων στις οποίες οι συντεταγμένες του κέντρου και η ακτίνα του κύκλου μεταβάλλονται μέχρι να βρεθεί η επιφάνεια με τον χαμηλότερο παράγοντα ασφάλειας. Αυτό είναι ένα ουσιαστικό μέρος της ανάλυσης ευστάθειας κυκλικού πρηνούς (Wyllie & Mah, 2005).



Σχήμα 3.3: Το σχήμα των τυπικών συρόμενων επιφανειών (α) κυκλική επιφάνεια μεγάλης ακτίνας σε ομοιογενές, ασθενές υλικό, με τη λεπτομέρεια των δυνάμεων σε φέτα, (β) μη κυκλική επιφάνεια σε αδύναμο, επιφανειακό υλικό με ισχυρότερο βράχο στη βάση.

3.1.3 Παραγωγή κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας

Αυτή η ενότητα περιγράφει τη χρήση μιας σειράς διαγραμμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον γρήγορο προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας των κυκλικών αστοχιών. Αυτά τα γραφήματα έχουν αναπτυχθεί με τη διεξαγωγή πολλών χιλιάδων κυκλικών αναλύσεων από τις οποίες προέκυψε ένας αριθμός αδιάστατων παραμέτρων που σχετίζουν τον συντελεστή ασφαλείας με το βάρος μοναδιαίου υλικού, τη γωνία τριβής και τη συνοχή και το ύψος του πρανούς και τη γωνία του πρανούς. Έχει βρεθεί ότι αυτά τα διαγράμματα δίνουν μια αξιόπιστη εκτίμηση για τον συντελεστή ασφαλείας, υπό την προϋπόθεση ότι οι συνθήκες στο πρανές πληρούν τις υποθέσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των διαγραμμάτων. Στην πραγματικότητα, η ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας από τα διαγράμματα είναι συνήθως μεγαλύτερη από την ακρίβεια στον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής της βραχομάζας.

Η χρήση των διαγραμμάτων ευστάθειας που παρουσιάζονται απαιτεί οι συνθήκες στο πρανές να πληρούν τις ακόλουθες παραδοχές:

(α) Το υλικό που σχηματίζει το πρανές είναι ομοιογενές, με ομοιόμορφες ιδιότητες αντοχής διάτμησης κατά μήκος της επιφάνειας της ολίσθησης.

(β) Η διατμητική αντοχή τ του υλικού χαρακτηρίζεται από συνοχή c γωνία τριβής φ , που σχετίζονται με την εξίσωση $\tau = c + \sigma \tan \varphi$.

(γ) Η αστοχία εμφανίζεται σε μια κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, η οποία διέρχεται από το πόδι του πρανούς.

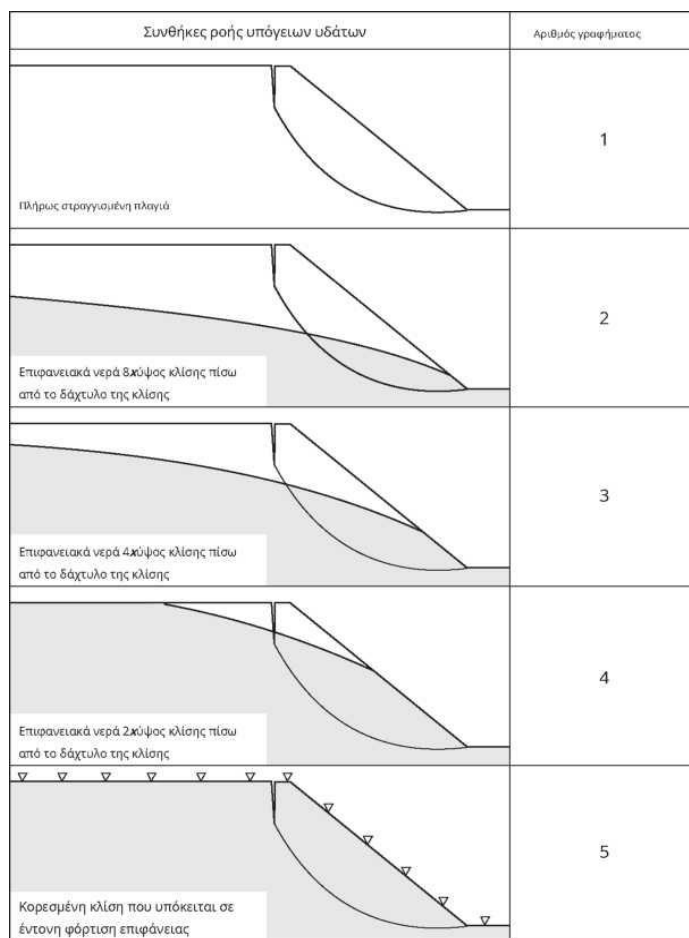
(δ) Εμφανίζεται μια κατακόρυφη ρωγμή τάνυσης στην επάνω επιφάνεια ή στην πρόσοψη του πρανούς.

(ε) Οι θέσεις της ρωγμής εφελκυσμού και της επιφάνειας της ολίσθησης είναι τέτοιες ώστε ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς να είναι ελάχιστος για τη γεωμετρία του πρανούς και τις συνθήκες υπόγειων υδάτων που λαμβάνονται υπόψη.

(στ) Οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων ποικίλλουν από μια ξηρή κλίση σε μια πλήρως κορεσμένη πλαγιά υπό έντονη φόρτιση. Αυτές οι συνθήκες ορίζονται

στο Σχ. 3.4.

(ζ) Τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας έχουν βελτιστοποιηθεί για πυκνότητα βράχου $18,9 \text{ kN/m}^3$. Πυκνότητες υψηλότερες από την παραπάνω δίνουν αυξημένους ή υψηλότερους των πραγματικών συντελεστές ασφάλειας, ενώ πυκνότητες χαμηλότερες δίνουν χαμηλούς συντελεστές ασφάλειας. Ενδέχεται να απαιτείται λεπτομερής κυκλική ανάλυση για κλίσεις στις οποίες η πυκνότητα υλικού είναι σημαντικά διαφορετική από $18,9 \text{ kN/m}^3$.



Σχήμα 3.4 Μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων που χρησιμοποιούνται με ανάλυση κυκλικής αστοχίας διαγράμματα—Σχήμα 3.6-3.10 (Wyllie & Mah, 2005)

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στη λύση του χαμηλότερου ορίου για τον συντελεστή ασφαλείας, που προκύπτει με την υπόθεση ότι το κανονικό φορτίο συγκεντρώνεται σε ένα μόνο σημείο της επιφάνειας της ολίσθησης. Αυτά τα γραφήματα διαφέρουν από αυτά που δημοσίευσε ο Taylor (1937) στο ότι περιλαμβάνουν την επίδραση μιας κρίσιμης ρωγμής τάσης και των υπόγειων υδάτων.

Τα γραφήματα αριθμούνται 1-5 (Σχ. 3.6-3.10) για να αντιστοιχούν στις συνθήκες των υπόγειων υδάτων που ορίζονται στο Σχ. 3.4.

Τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας που παρουσιάζονται δημιουργήθηκαν εκτελώντας μια ρουτίνα αναζήτησης για να βρεθεί ο πιο κρίσιμος συνδυασμός επιφάνειας ολίσθησης και ρωγμής τάσης για καθεμία από ένα ευρύ φάσμα γεωμετριών πρανών και συνθηκών υπόγειων υδάτων. Προβλέφθηκε ώστε η ρωγμή εφελκυσμού να βρίσκεται είτε στην επάνω επιφάνεια, είτε στην πρόσοψη του πρανούς. Διεξήχθησαν λεπτομερείς έλεγχοι στην περιοχή που περιβάλλει το πόδι του πρανούς όπου η καμπυλότητα των ισοδυναμικών οδηγεί σε τοπική ροή που διαφέρει από αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 3.3(a).

3.1.4 Χρήση των κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς, θα πρέπει να ακολουθηθούν τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω και φαίνονται στο Σχ. 3.5.

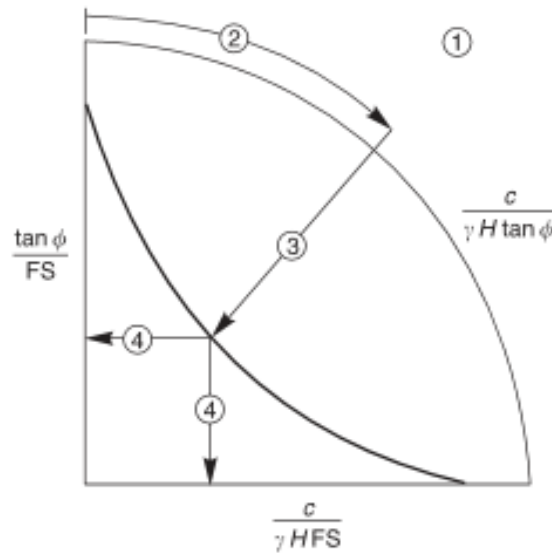
Βήμα 1 Αποφασίζεται η κατάσταση των υπογείων υδάτων που πιστεύεται ότι υπάρχουν στο πρανές και επιλέγεται το διάγραμμα που είναι πιο κοντά σε αυτές τις συνθήκες, χρησιμοποιώντας το Σχ. 3.4.

Βήμα 2 Επιλέγονται οι παράμετροι αντοχής βράχου που ισχύουν για το υλικό που σχηματίζει το πρανές.

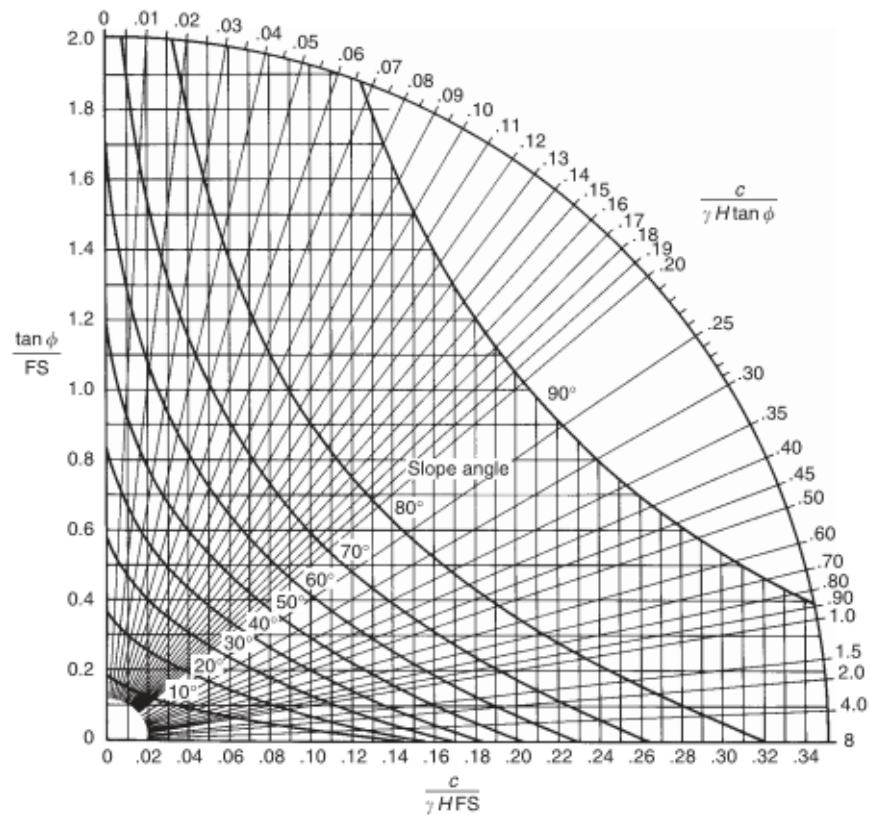
Βήμα 3 Υπολογίζεται η τιμή του αδιάστατου λόγου ($c/(\gamma H \tan \phi)$) και βρίσκεται αυτή η τιμή στην εξωτερική κυκλική κλίμακα του γραφήματος.

Βήμα 4: Ακολουθείται η ακτινική γραμμή από την τιμή που βρέθηκε στο βήμα 3 έως την τομή της με την καμπύλη που αντιστοιχεί στη γωνία κλίσης του πρανούς.

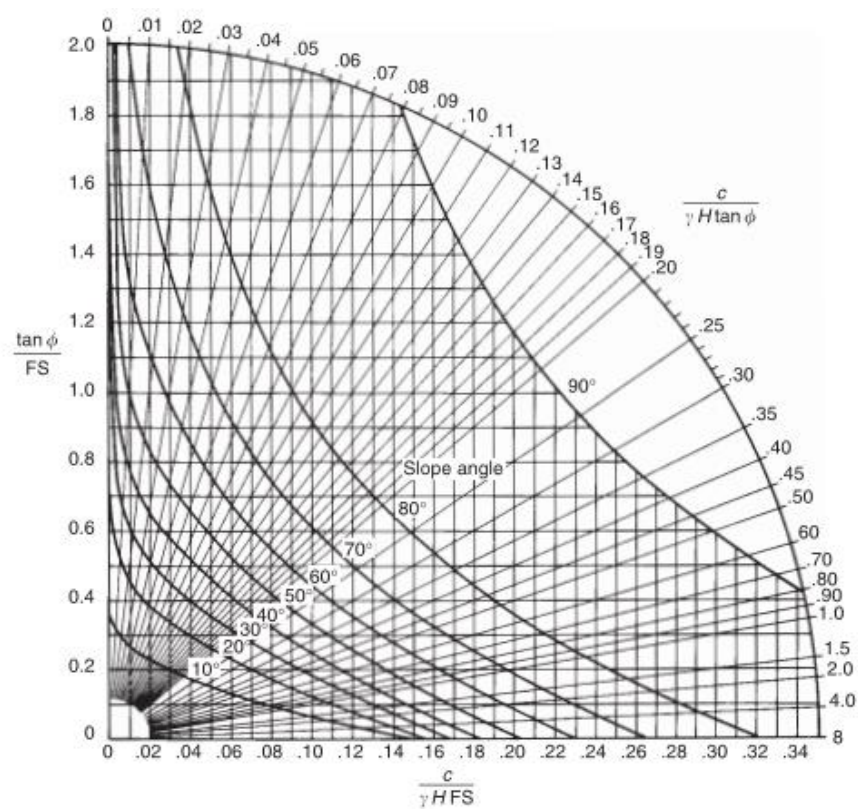
Βήμα 5: Βρίσκεται η αντίστοιχη τιμή του ($\tan \phi/FS$) ή ($c/(\gamma H FS)$), ανάλογα με το ποιο είναι πιο βολικό, και υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας.



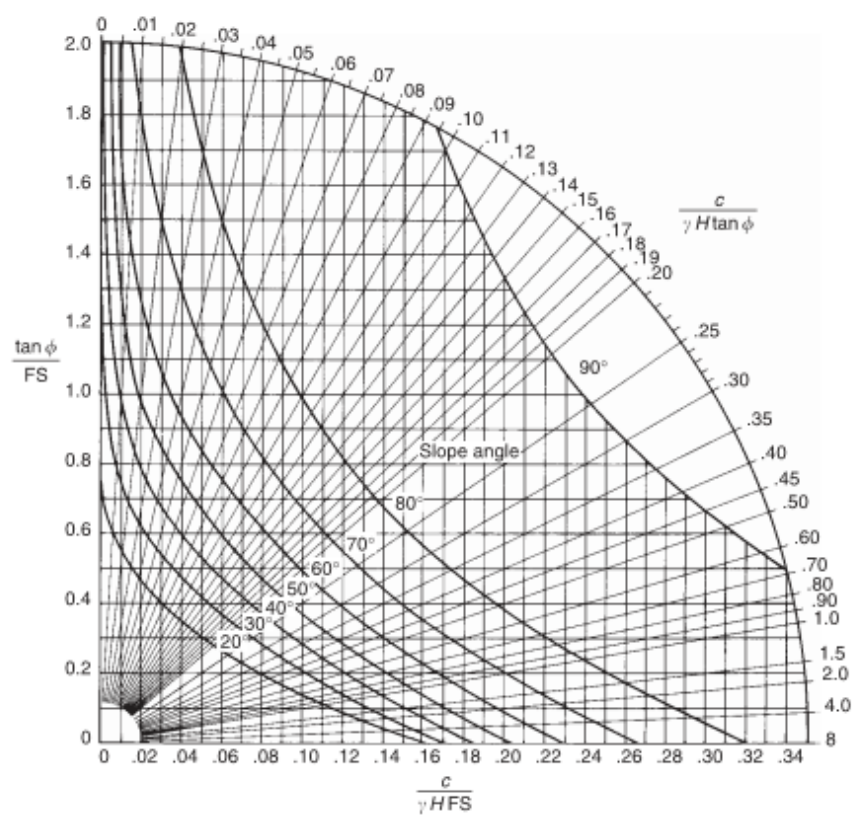
Σχήμα 3.5 Ακολουθία βημάτων που εμπλέκονται στη χρήση κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας για την εύρεση του παράγοντα ασφάλειας ενός πρανούς.



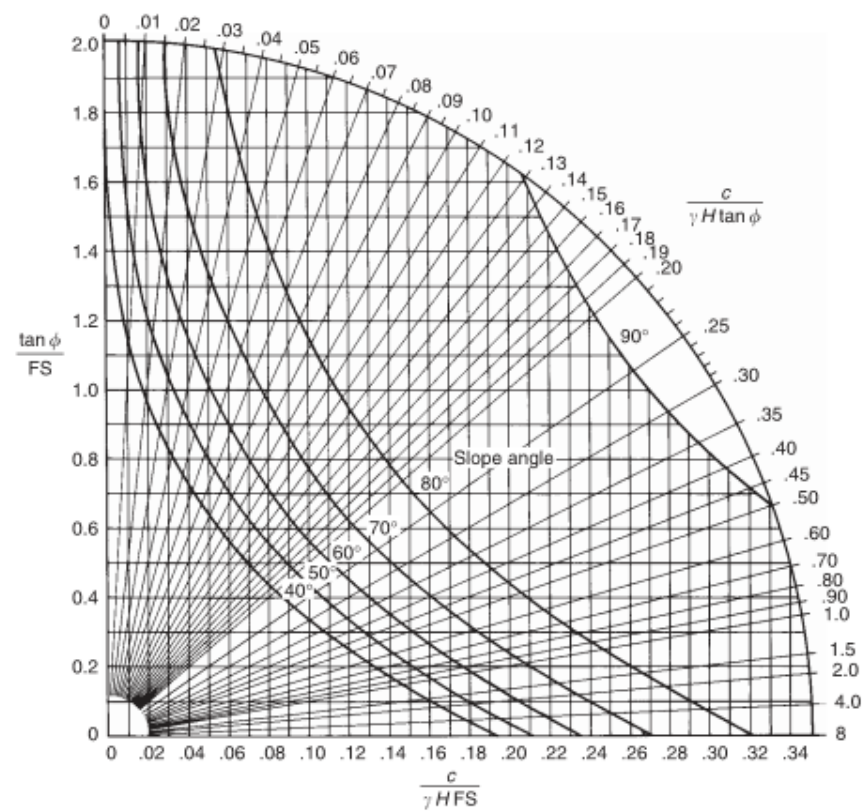
Σχήμα 3.6 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 1 – πλήρως αποστραγγισμένο πρανές.



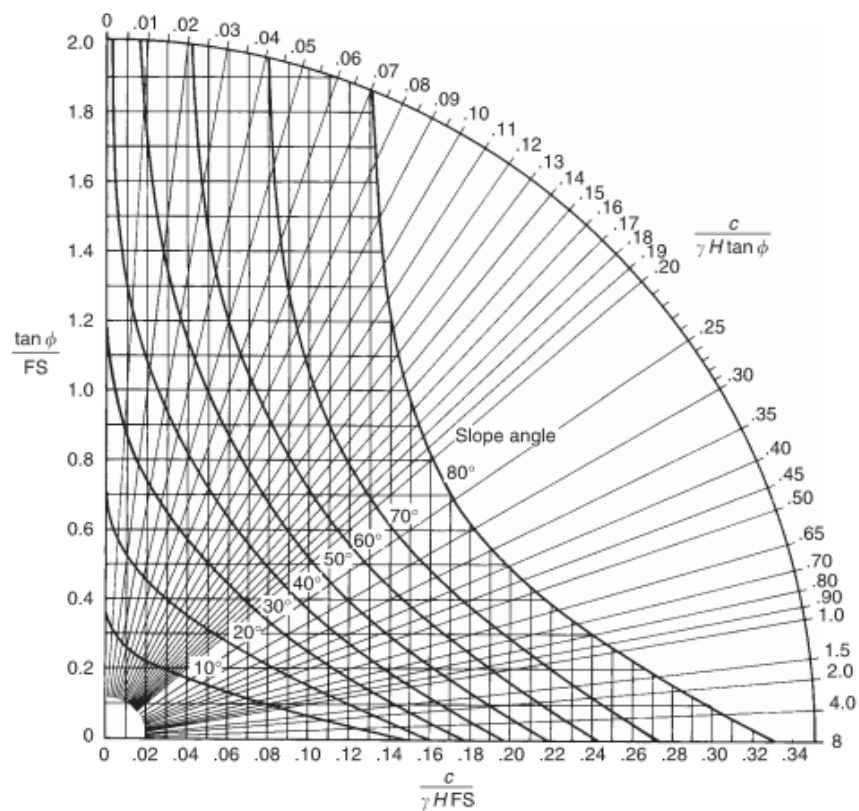
Σχήμα 3.7 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 2 – κατάσταση υπόγειων υδάτων 2.



Σχήμα 3.8 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 3 – κατάσταση υπόγειων υδάτων 3.



Σχήμα 3.9 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 4 – κατάσταση υπόγειων υδάτων 4.



Σχήμα 3.10 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 5 – πλήρες κορεσμένο πρανές.

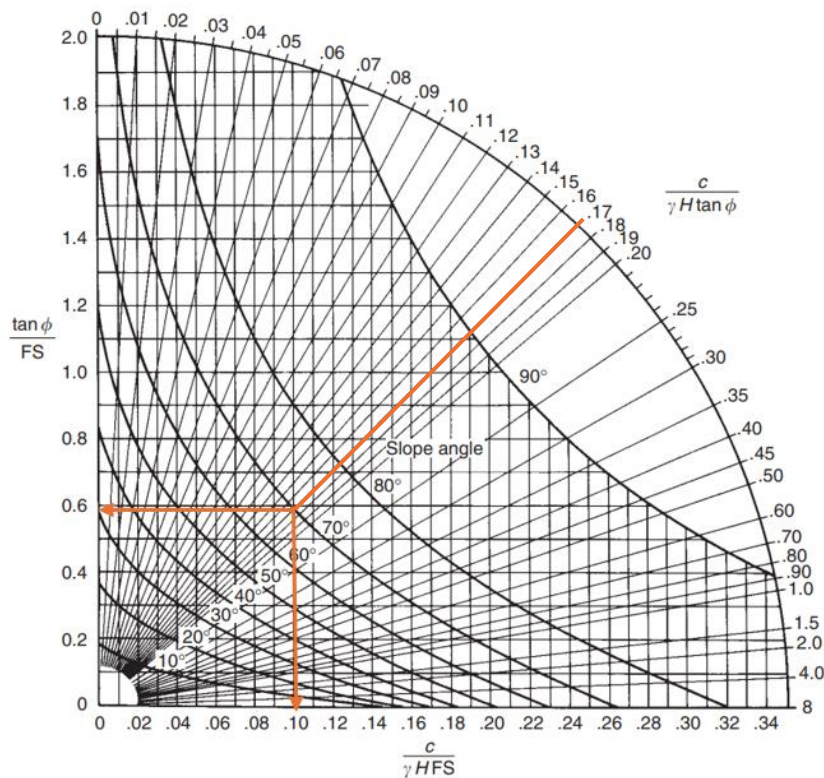
Παράδειγμα χρησιμοποίησης κυκλικού διαγράμματος αστοχίας

Δεδομένα :

$$\gamma = 15,7 \text{ kN/m}^3, c=38 \text{ kPa}, \phi = 30^\circ, H=25\text{m}$$

$$\text{λύνοντας την ισότητα } \frac{c}{\gamma H \tan \phi} = 0,168$$

Χρησιμοποιώντας το κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 1 - πλήρως αποστραγγισμένο πρανές



Σχήμα 3.11 Κυκλικό διάγραμμα αστοχίας αριθμός 1 – πλήρως αποστραγγισμένο πρανές (ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ).

Βρίσκουμε τη τομή της ακτινικής γραμμής από το 0,17 της περιφέρειας μέχρι τη γωνία κλίσης 70° . Βρίσκουμε ότι η αντιστοίχιση στον άξονα $\tan \phi / FS = 0,6$ άρα υπολογίζεται ο $FS = 0,96$

Λόγω της ταχύτητας και της απλότητας χρήσης αυτών των διαγραμμάτων, είναι ιδανικά για τον έλεγχο της ευαισθησίας του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανούς σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

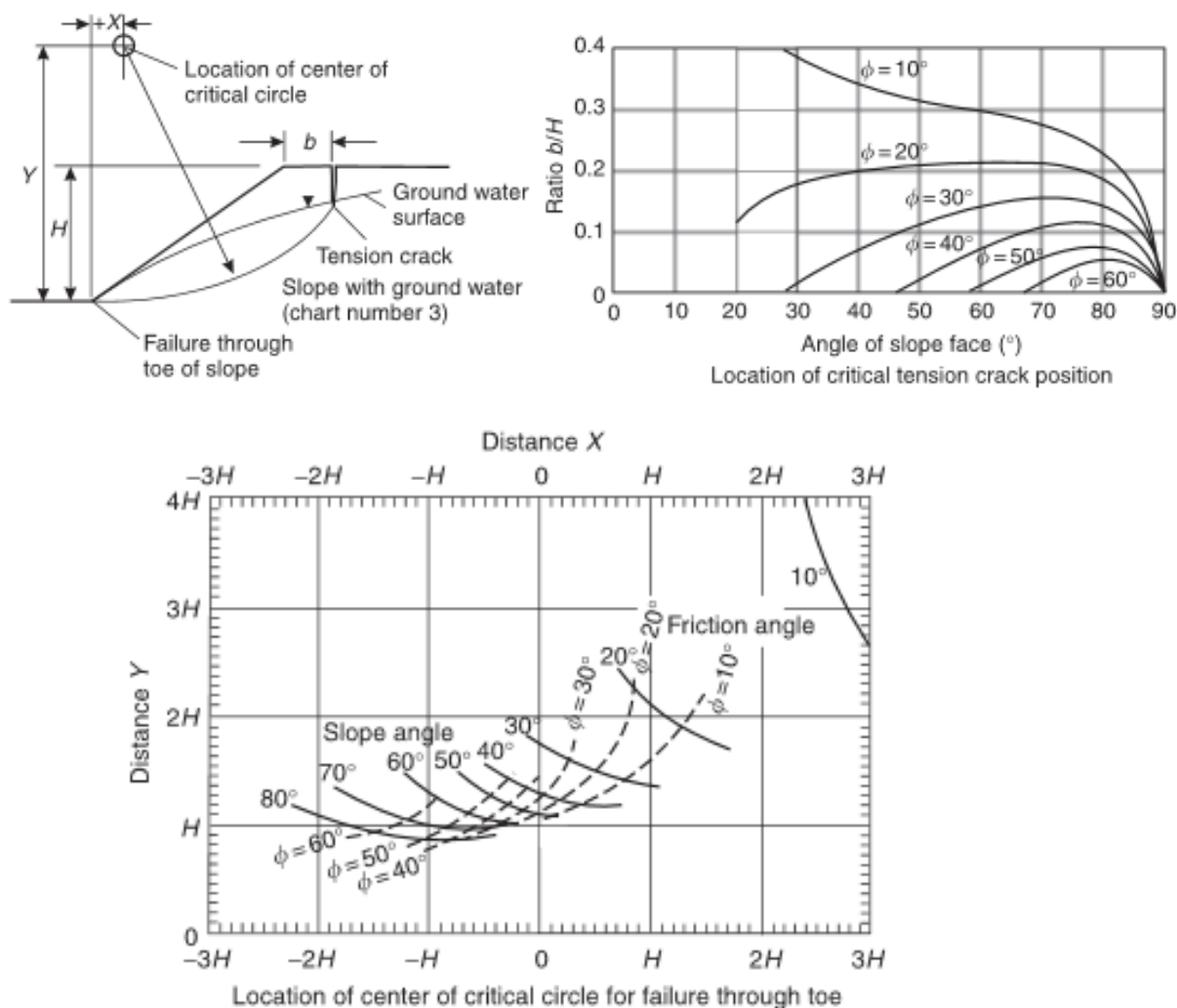
3.1.5 Θέση κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και ρωγμή εφελκυσμού

Κατά την παραγωγή των κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας, οι θέσεις τόσο της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης όσο και της ρωγμής κρίσιμης τάσης για περιορισμό της ισορροπίας ($FS = 1$) προσδιορίστηκαν για κάθε πρανές που αναλύθηκε. Αυτές οι

θέσεις παρουσιάζονται, με τη μορφή διαγραμμάτων, στα Σχ. 3.12 και 3.13.

Βρέθηκε ότι, από τη στιγμή που υπάρχει υπόγειο νερό στο πρανές, οι θέσεις του κρίσιμου κύκλου και της ρωγμής τάσης δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη θέση της φρεατικής επιφάνειας και ως εκ τούτου μόνο μία περίπτωση, αυτή για το διάγραμμα 3, έχει σχεδιαστεί. Θα σημειωθεί ότι η θέση του κέντρου του κρίσιμου κύκλου που δίνεται στο Σχ. 3.12 διαφέρει σημαντικά από αυτή για την στραγγισμένο πρανές που απεικονίζεται στο Σχ. 3.13.

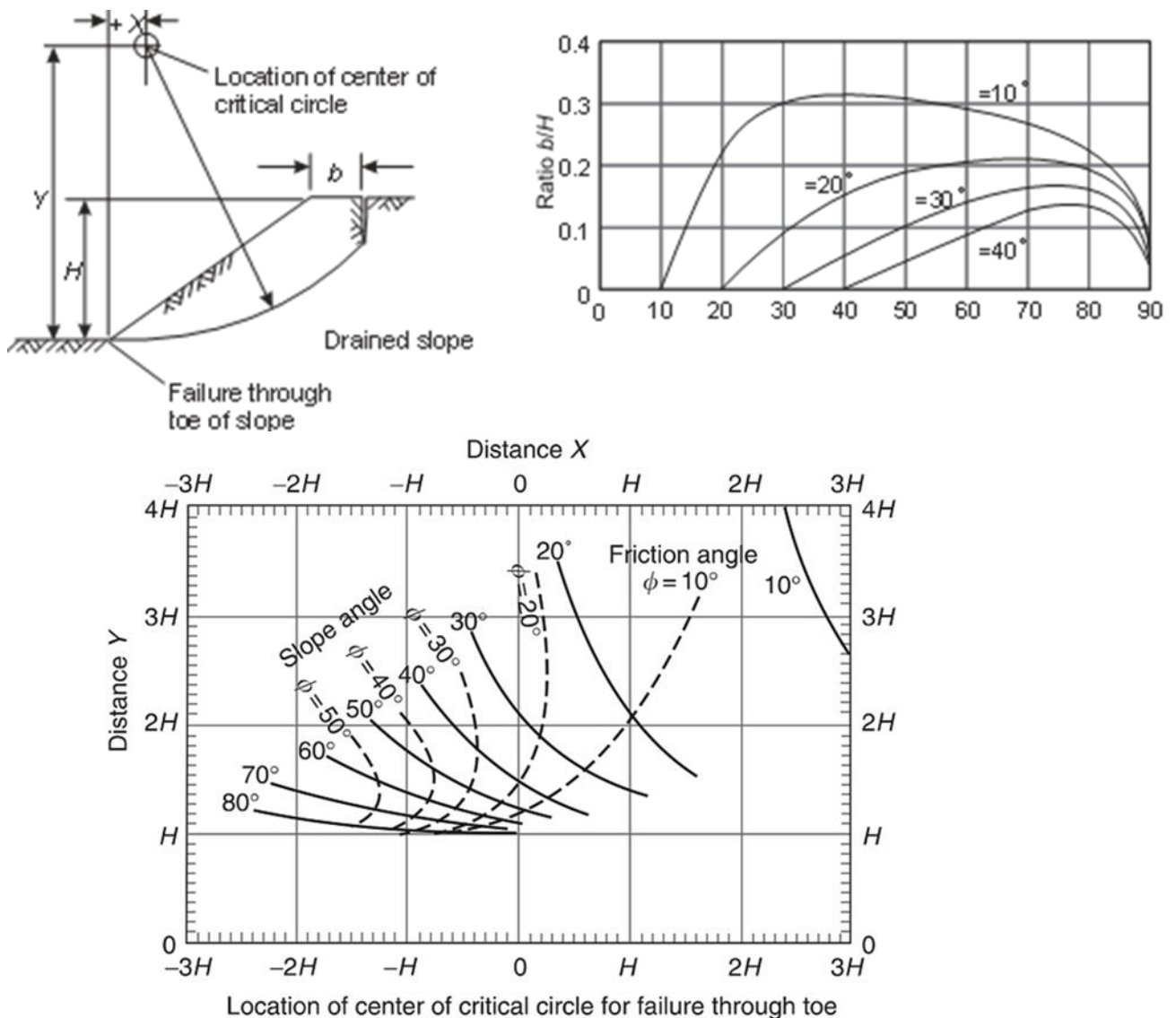
Αυτά τα γραφήματα είναι χρήσιμα για την κατασκευή σχεδίων δυναμικών διαφανειών και για την εκτίμηση της γωνίας τριβής κατά την εκ των υστέρων ανάλυση υπάρχοντων κυκλικές διαφάνειες. Παρέχουν επίσης μια αρχή στον εντοπισμό της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης κατά τη διεξαγωγή πιο εξελιγμένης κυκλικής ανάλυσης αστοχίας.



Σχήμα 3.12: Θέση κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και ρωγμή κρίσιμης τάσης για πλαγιές με υπόγεια νερά (Wyllie & Mah).

3.2 Λεπτομερής ανάλυση ευστάθειας κυκλικών αστοχιών

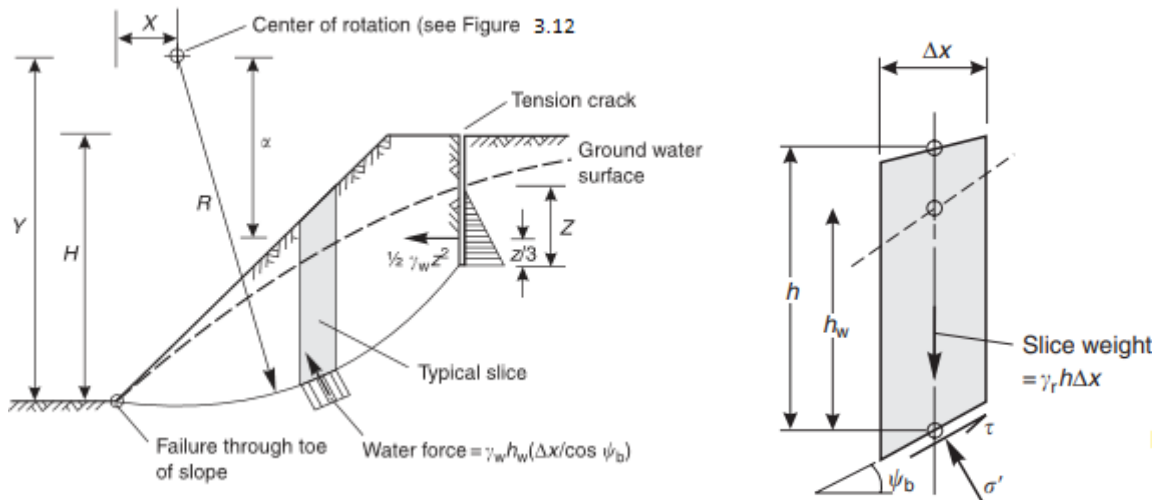
Τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας που παρουσιάστηκαν βασίζονται στην υπόθεση ότι το υλικό που σχηματίζει το πρανές έχει ομοιόμορφες ιδιότητες σε όλο το πρανές και ότι συμβαίνει αστοχία κατά μήκος μιας κυκλικής διαδρομής ολίσθησης που περνά από το πόδι του πρανούς. Όταν αυτές οι προϋποθέσεις δεν ικανοποιούνται, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μία από τις μεθόδους slices που δημοσιεύθηκαν από τους Bishop (1955), Janbu (1954), Nonveiller (1965), Spencer (1967), Morgenstern and Price (1965) ή Sarma (1979).



Σχήμα 3.13: Θέση κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και ρωγμή κρίσιμης τάσης για στραγγιζόμενες πλαγιές (Wyllie & Mah).

3.2.1 Μέθοδος λωρίδων Bishop

Η γεωμετρία του πρανούς και της επιφάνειας ολίσθησης και οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας με την απλοποιημένη μέθοδο των λωρίδων του Bishop(1955) δίνεται στο Σχ. 3.14. Η μέθοδος του Bishop υποθέτει μια κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και ότι οι πλευρικές δυνάμεις είναι οριζόντιες. Η ανάλυση ικανοποιεί τις κατακόρυφες δυνάμεις και τη συνολική ισορροπία ροπών.



Σχήμα 3.14: Η απλοποιημένη μέθοδος του Bishop για τις λωρίδες ανάλυση μη κυκλικής αστοχίας σε πρανή κομμένα σε υλικά στα οποία η αστοχία ορίζεται από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Wyllie & Mah).

3.2.2 Διαδικασία ανάλυσης σταθερότητας

Η ανάλυση ευστάθειας της κυκλικής αστοχίας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη διαδικασία οριακής ισορροπίας. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύγκριση της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης με τη δύναμη που απαιτείται για τη διατήρηση του πρανούς σε ισορροπία.

Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας σε κυκλικές αστοχίες περιλαμβάνει τη διαίρεση του πρανούς σε μια σειρά από λωρίδες που είναι συνήθως κάθετες, αλλά μπορεί να συμπίπτει με ορισμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Η βάση κάθε λωρίδας έχει κλίση υπό γωνία ψ_b και έχει έκταση A. Στην απλούστερη περίπτωση, οι δυνάμεις που ασκούνται στη βάση κάθε λωρίδας είναι η αντίσταση διάτμησης S λόγω της διατμητικής αντοχής του βράχου (συνοχή c, γωνία τριβής ϕ), και δυνάμεις E (γωνία βύθισης ψ , ύψος h πάνω από τη βάση) που δρουν στις πλευρές της λωρίδας (βλ. λεπτομέρεια Σχ. 3.3(α)).

Η διαδικασία ανάλυσης είναι να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες ισορροπίας λωρίδα ανά λωρίδα, και εάν μια συνθήκη ισορροπίας ικανοποιείται για κάθε λωρίδα, τότε ικανοποιείται επίσης για ολόκληρη τη μάζα ολίσθησης. Ο αριθμός των διαθέσιμων εξισώσεων ισορροπίας εξαρτάται από τον αριθμό των τμημάτων N και τον αριθμό των συνθηκών ισορροπίας που χρησιμοποιούνται. Ο αριθμός των διαθέσιμων εξισώσεων είναι $2N$ εάν ικανοποιείται μόνο η ισορροπία δυνάμεων, και $3N$ αν ικανοποιούνται και η ισορροπία δύναμης και ροπής. Εάν ικανοποιείται μόνο η ισορροπία δυνάμεων, ο αριθμός των αγνώστων είναι $(3N-1)$, ενώ, εάν ικανοποιούνται και οι ισορροπίες δύναμης και ροπής, ο αριθμός των αγνώστων είναι $(5N-2)$. Συνήθως απαιτούνται μεταξύ 10 και 40 λωρίδες για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση του πρανούς και επομένως, ο αριθμός των αγνώστων υπερβαίνει τον αριθμό των εξισώσεων. Η υπέρβαση των αγνώστων έναντι των εξισώσεων είναι $(N-1)$ για ανάλυση ισορροπίας δυνάμεων και $(2N-2)$ για αναλύσεις που ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας. Έτσι, οι αναλύσεις είναι στατικά απροσδιόριστες και απαιτούνται υποθέσεις για να καλυφθεί η ανισορροπία μεταξύ εξισώσεων και αγνώστων (Duncan, 1996).

Οι διάφορες διαδικασίες ανάλυσης οριακής ισορροπίας είτε κάνουν υποθέσεις για να σχηματίσουν την ισορροπία μεταξύ γνωστών και αγνώστων, είτε δεν ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας. Για παράδειγμα, η μέθοδος Spencer υποθέτει ότι η κλίση των πλευρικών δυνάμεων είναι ίδια για κάθε λωρίδα, ενώ οι μέθοδοι Fellenius και Bishop δεν ικανοποιούν όλες τις προϋποθέσεις ισορροπίας.

Ο συντελεστής ασφάλειας της κυκλικής αστοχίας με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας ορίζεται ως

$$FS = \frac{\text{shear strength available to resist sliding } (c + \sigma \tan \phi)}{\text{shear stress required for equilibrium on slip surface}(re)} \quad (3.1)$$

και αναδιατάσσοντας αυτήν την εξίσωση, έχουμε

$$re = \frac{c + \sigma \tan \phi}{FS} \quad (3.2)$$

Η μέθοδος επίλυσης για τον συντελεστή ασφαλείας είναι η χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας στην οποία γίνεται μια αρχική εκτίμηση για το FS , και αυτό βελτιώνεται με κάθε επανάληψη.

Η επίδραση των διάφορων κανονικών κατανομών τάσεων στον συντελεστή ασφάλειας των πρανών του εδάφους έχει εξεταστεί από τον Frohlich (1955) ο οποίος

βρήκε ότι ένα κατώτερο όριο για όλους τους συντελεστές ασφάλειας που ικανοποιούν τη στατική δίνεται από την υπόθεση ότι η κανονική τάση συγκεντρώνεται σε ένα μόνο σημείο στην επιφάνεια της ολίσθησης. Ομοίως, το ανώτερο όριο λαμβάνεται με την υπόθεση ότι το κανονικό φορτίο συγκεντρώνεται στα δύο άκρα της επιφάνειας ολίσθησης.

Η εξωπραγματική φύση αυτών των κατανομών τάσεων δεν έχει καμία συνέπεια, καθώς το αντικείμενο της άσκησης, μέχρι αυτό το σημείο, είναι απλώς ο προσδιορισμός των άκρων μεταξύ των οποίων πρέπει να βρίσκεται ο πραγματικός συντελεστής ασφάλειας του πρανούς. Σε ένα παράδειγμα που εξετάστηκε από τους Lambé και Whitman (1969), τα άνω και κάτω όρια για τον συντελεστή ασφάλειας ενός συγκεκριμένου πρανούς αντιστοιχούσαν σε 1,62 και 1,27, αντίστοιχα. Η ανάλυση του ίδιου προβλήματος με την απλοποιημένη μέθοδο slices του Bishop δίνει έναν συντελεστή ασφάλειας 1,30, που υποδηλώνει ότι ο πραγματικός συντελεστής ασφάλειας μπορεί να βρίσκεται αρκετά κοντά στη λύση του κάτω ορίου.

Η διαδικασία για τη χρήση της απλοποιημένης μεθόδου λωρίδων του Bishop είναι :

Βήμα 1: Γεωμετρία επιφάνειας πρανούς και ολίσθησης.

Η γεωμετρία του πρανούς ορίζεται από το πραγματικό ή το σχεδιασμένο προφίλ όπως φαίνεται σε μια κατακόρυφη τομή μέσα από το πρανές. Σε περίπτωση κυκλικής αστοχίας, τα διαγράμματα που δίνονται στα Σχ. 3.12 και 3.13 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του κέντρου του κύκλου με τον χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας. Σε κάθε περίπτωση, η επιφάνεια ολίσθησης που θεωρείται για την πρώτη ανάλυση μπορεί να μην δίνει τον χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας και απαιτείται μια σειρά αναλύσεων με παραλλαγές σε αυτή τη θέση για να βρεθεί η επιφάνεια με τον χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας.

Βήμα 2: Παράμετροι λωρίδων.

Η ολισθαίνουσα μάζα που θεωρείται στο βήμα 1 χωρίζεται σε έναν αριθμό λωρίδων. Γενικά, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον πέντε λωρίδες για απλές περιπτώσεις. Για πολύπλοκα προφίλ πρανών ή όπου υπάρχουν διαφορετικά υλικά στη μάζα του βράχου ή του εδάφους, μπορεί να απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός λωρίδων προκειμένου να προσδιοριστεί επαρκώς το πρόβλημα. Οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν για κάθε λωρίδα είναι όπως δίνονται παρακάτω:

- επίπεδη γωνία ψ_b
- το βάρος της κάθε λωρίδας W δίνεται από το γινόμενο του κατακόρυφου ύψους h , το μοναδιαίο βάρος γ_r του βράχου ή του εδάφους και το πλάτος της φέτας Δx : $W = (h \gamma_r \Delta x)$ και
- ανυψωτική πίεση νερού U στη βάση κάθε λωρίδας δίνεται από το γινόμενο του ύψους h_w στην φρεατική επιφάνεια, το μοναδιαίο βάρος γ_w του νερού και το πλάτος της φέτας Δx , δηλαδή, $U = (h_w \gamma_w \Delta x)$.

Βήμα 3: Παράμετροι διατμητικής αντοχής.

Για τον υπολογισμό της ευστάθειας απαιτείται η διατμητική αντοχή που επενεργεί στη βάση κάθε λωρίδας. Στην περίπτωση ενός ομοιόμορφου υλικού στο οποίο το κριτήριο αστοχίας θεωρείται ότι είναι αυτό του Mohr- Coulomb οι παράμετροι αντοχής σε διάτμηση c και ϕ θα είναι το ίδιο στη βάση κάθε λωρίδας. Όταν το πρανές κόβεται σε πολλά υλικά, οι παράμετροι αντοχής διάτμησης για κάθε λωρίδα πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με το υλικό στο οποίο βρίσκεται. Όταν οι διατμητικές αντοχές των υλικών που σχηματίζουν το πρανές ορίζονται από το μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η γωνία τριβής και η συνοχή για κάθε λωρίδα στην πραγματική κανονική τάση για αυτήν τη λωρίδα.

Βήμα 4: Συντελεστής επανάληψης ασφάλειας.

Όταν έχουν καθοριστεί οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και της λωρίδας, οι τιμές των X , Y και Z υπολογίζονται για κάθε λωρίδα από τις εξισώσεις 3.4, 3.5 και 3.6 αντίστοιχα. Η δύναμη του νερού Q (εξίσωση 3.7) προστίθεται σε ΣZ , το άθροισμα των συστατικών του βάρους κάθε λωρίδας που ενεργεί παράλληλα με την επιφάνεια της ολίσθησης. Χρησιμοποιείται μια αρχική εκτίμηση $FS = 1$ για τον συντελεστή ασφάλειας και υπολογίζεται ένας νέος συντελεστής ασφάλειας από την εξίσωση (3.3) (Σχ. 3.13).

$$FS = \frac{\Sigma_x / (1 + Y/FS)}{\Sigma_z + Q} \quad (3.3)$$

$$X = [c + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \varphi] (\Delta x / \cos \psi_b) \quad (3.4)$$

$$Y = \tan \psi_b \tan \varphi \quad (3.5)$$

$$Z = \gamma_r h \Delta x \sin \psi_b \quad (3.6)$$

$$Q = 1/2\gamma_w z^2 (a/R) \quad (3.7)$$

Εάν η διαφορά μεταξύ των υπολογισμένων και των υποτιθέμενων συντελεστών ασφάλειας είναι μεγαλύτερη από 0,001, ο υπολογισμένος συντελεστής ασφάλειας χρησιμοποιείται ως δεύτερη εκτίμηση του FS για έναν νέο υπολογισμό συντελεστής ασφάλειας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η διαφορά μεταξύ των διαδοχικών συντελεστών ασφάλειας είναι μικρότερη από 0,001. Για τη μέθοδο Bishop, θα απαιτηθούν περίπου επτά κύκλοι επανάληψης για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα για τις περισσότερες γεωμετρίες πρανών και επιφανειών ολίσθησης.

Βήμα 5: Προϋποθέσεις και διορθώσεις

Δύο είναι οι προϋποθέσεις (εξισώσεις (3.8) και (3.9)) που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε λωρίδα στην ανάλυση Bishop.

$$\sigma' = \frac{\gamma_r h - \gamma_w h_w - c (\tan \psi_b / FS)}{1 + Y / FS} \quad (3.8)$$

$$\cos \psi_b (1 + Y / FS) > 0.2 \quad (3.9)$$

Η πρώτη προϋπόθεση εξασφαλίζει ότι η ενεργή ορθή τάση στη βάση κάθε λωρίδας είναι πάντα θετική (θλίψη). Εάν αυτή η προϋπόθεση δεν πληρούται, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συμπερίληψη μιας εφελκυστικής ρωγμής στην ανάλυση. Εάν είναι αδύνατο να ικανοποιηθεί αυτή η προϋπόθεση με αναπροσαρμογή των συνθηκών των υπόγειων υδάτων ή με την εισαγωγή μιας εφελκυστικής ρωγμής, η ανάλυση όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 3.13 θα πρέπει να εγκαταλειφθεί και να εφαρμοστεί μια πιο περίπλοκη μορφή ανάλυσης.

Η συνθήκη 2 (εξίσωση 3.9) προτάθηκε από τους Whitman και Bailey (1967) και διασφαλίζει ότι η ανάλυση δεν ακυρώνεται από συνθήκες που μερικές φορές μπορεί να συμβούν κοντά στο πόδι ενός πρανούς στην οποία έχει υποτεθεί μια βαθιά επιφάνεια ολίσθησης. Εάν αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται από όλες τις λωρίδες, οι διαστάσεις της λωρίδας θα πρέπει να αλλάξουν και, εάν αυτό αποτυγχάνει να επιλύσει το πρόβλημα, η ανάλυση θα πρέπει να εγκαταλειφθεί.

3.2.3 Χρήση μη γραμμικού κριτηρίου αστοχίας στην ανάλυση ευστάθειας Bishop

Όταν το υλικό στο οποίο κόβεται το πρανές συμμορφώνεται με το κριτήριο μη

γραμμικής αστοχίας Hoek-Brown, η απλοποιημένη μέθοδος λωρίδων του Bishop, όπως περιγράφεται στο Σχ. 3.15, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία, αφού οριστούν οι παράμετροι των λωρίδων, όπως περιγράφηκε προηγουμένως για την ανάλυση Bishop:

1. Υπολογίζεται η ενεργή ορθή τάση σ' που δρα στη βάση κάθε λωρίδας μέσω της εξίσωσης Fellenius εξίσωση (3.10).

$$\sigma' = \gamma_r h \cos^2 \psi_b - \gamma_w h_w \quad (3.10)$$

2. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές του σ' , υπολογίζεται το $\tan \phi$ και c για κάθε λωρίδα από τις εξισώσεις (3.11) και (3.12).

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3.11)$$

$$c' = \frac{c_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](\sigma + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) - \sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}] [(1+a)(2+a)]}} \quad (3.12)$$

$$\text{όπου } \sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max}/\sigma_{ci}$$

3. Αντικαθίστανται αυτές οι τιμές των $\tan \phi$ και c στην εξίσωση (3.13) για να ληφθεί η πρώτη εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας.

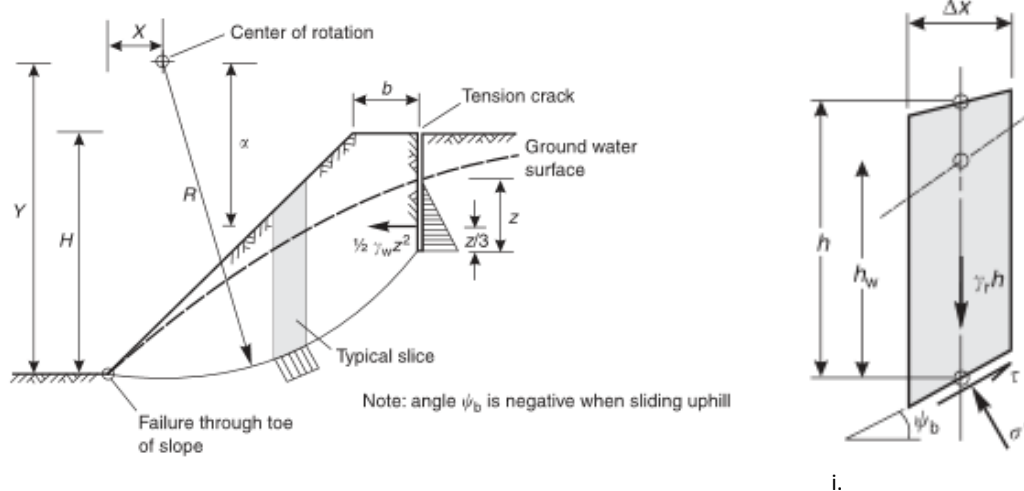
$$FS = \frac{\sum (c'_i + \sigma' \tan \varphi_i) \cdot (\Delta\chi / \cos \psi_b)}{\sum \gamma_r h \Delta\chi \sin \psi_b + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \chi / R} \quad (3.13)$$

4. Χρησιμοποιείται αυτή η εκτίμηση του FS για να υπολογιστεί μια νέα τιμή του σ' στη βάση κάθε λωρίδας, χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bishop εξίσωση (3.14).

$$\sigma' = \frac{\gamma_r h - \gamma_w h_w - (c'_i \tan \psi_b / FS)}{1 + (\tan \varphi'_i \tan \psi_b / FS)} \quad (3.14)$$

5. Με βάση αυτές τις νέες τιμές του σ' , υπολογίζονται νέες τιμές για το $\tan \phi$ και το c .

6. Ελέγχεται ότι οι συνθήκες που ορίζονται από τις ισότητες (3.8) και (3.9) ικανοποιούνται για κάθε λωρίδα
7. Υπολογίζεται ένας νέος συντελεστής ασφάλειας για τις νέες τιμές του $\tan \phi$ και c .
8. Εάν η διαφορά μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου συντελεστή ασφαλείας είναι μεγαλύτερη από 0,001, επαναλαμβάνουμε την ανάλυση από το βήμα 4, χρησιμοποιώντας τον δεύτερο συντελεστή ασφαλείας ως αρχή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η διαφορά μεταξύ των διαδοχικών συντελεστών ασφαλείας είναι μικρότερη από 0,001.



Σχήμα 3.15 Η απλοποιημένη μέθοδος λωρίδων του Bishop για την ανάλυση της κυκλικής αστοχίας σε πρηνή σε υλικό στο οποίο η αντοχή ορίζεται από το μη γραμμικό κριτήριο (Wyllie & Mah).

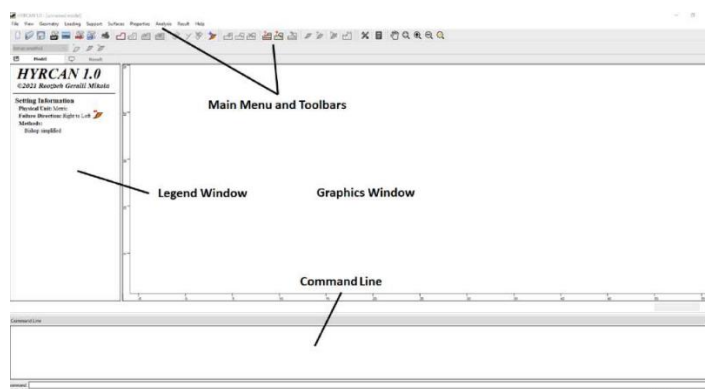
Γενικά, απαιτούνται περίπου δέκα επαναλήψεις για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια στον υπολογισμένο συντελεστή ασφαλείας.

3.2.4 Λογισμικό HYRCAN

Γραφικό interface χρήστη στο λογισμικό HYRCAN

Το interface *χρήστη* (Σχ. 3.16) στο λογισμικό *HYRCAN* παρέχει ένα πλήρες διαδραστικό περιβάλλον για μοντελοποίηση, project διαχείρισης έργου, εύκολη διασαφήνιση ορίων και διαφορετικά στοιχεία υποστήριξης, εκτεταμένες δυνατότητες σχεδίασης και παρακολούθηση αποτελεσμάτων σε χρόνο εκτέλεσης. Ο χρήστης εισάγει τη γεωμετρία, ιδιότητες υλικού και περιορισμούς ανάλυσης (όπως μεθοδολογίες αναζήτησης) μέσω μιας γραφικής πλατφόρμας χρήστη (GUI) τύπου CAD. Τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να προβληθούν στο πλαίσιο μιας γραφικής

πλατφόρμας χρήστη. Η γεωμετρία απλώς εισάγεται ως περιοχές που μπορούν να σχεδιαστούν ή να εισαχθούν από αρχεία AutoCAD DXF.



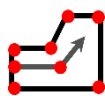
Σχήμα 3.16 Οθόνη καταχώρησης λογισμικού HYRCAN

Κατασκευή Μοντέλων σε HYRCAN

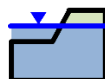
Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία μοντέλο HYRCAN είναι η δημιουργία των ορίων που ορίζουν το μοντέλο (Σχ. 3.17).



Χρησιμοποιήστε αυτό το εργαλείο για να δημιουργήσετε Εξωτερικό Όριο. Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός μοντέλου είναι η δημιουργία του Εξωτερικού ορίου.



Χρησιμοποιήστε αυτό το εργαλείο για να ορίσετε υποπεριοχές εντός του Εξωτερικού ορίου.



Αυτό το εργαλείο σας επιτρέπει να προσθέσετε γραμμές του πίνακα νερού.



Χρησιμοποιήστε αυτό το εργαλείο για να διαγράψετε τα υπάρχοντα όρια (π.χ. Εξωτερικό όριο, Όριο Υλικού και Πίνακας Υδάτων).

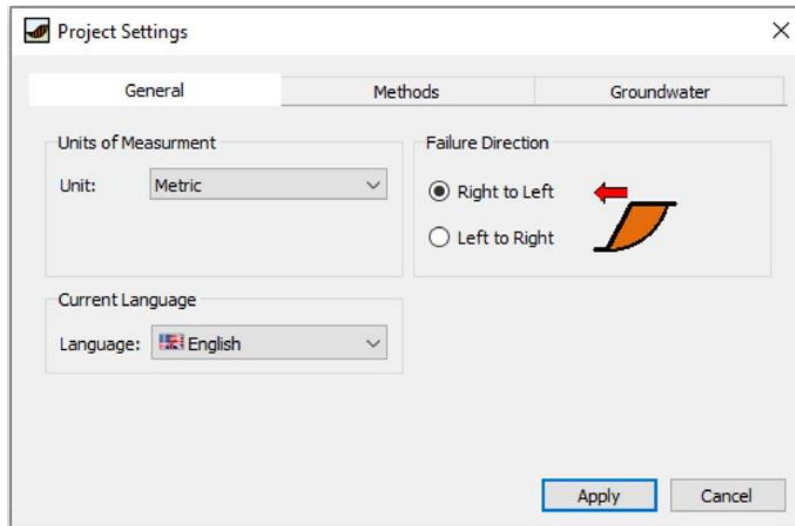
Σχήμα 3.17: Οθόνη σχεδιασμού μοντέλων λογισμικού HYRCAN.

Εισαγωγή DXF

Μπορούν να εισαχθούν όρια και στηρίγματα στο **HYRCAN** από ένα αρχείο DXF (AutoCAD Drawing Exchange File), χρησιμοποιώντας το **import DXF** επιλογή στο υπομενού Εισαγωγή του μενού Αρχείο. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν σχέδια που έχουν δημιουργηθεί στο AutoCAD, για παράδειγμα, σε **HYRCAN**.

Ρυθμίσεις Project

Διάφορες σημαντικές επιλογές μοντελοποίησης και ανάλυσης ορίζονται στο παράθυρο διαλόγου (Σχ. 3.18) Project settings, συμπεριλαμβανομένων της Κατεύθυνσης αστοχίας, των Μονάδων μέτρησης και της ιδιότητας υπόγειων ρευστού.



Σχήμα 3.18 Οθόνη ρυθμίσεων project

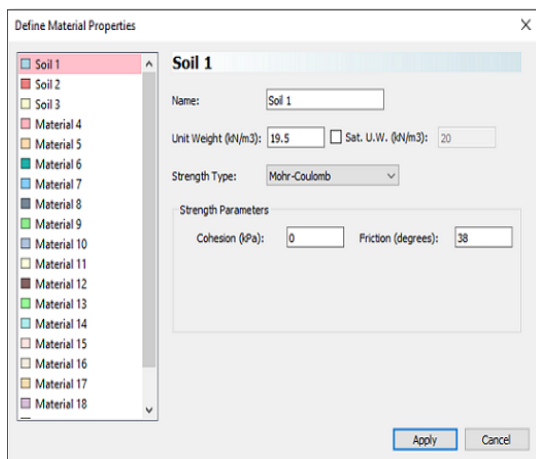
Ορισμός και εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού

Ορισμός Ιδιοτήτων

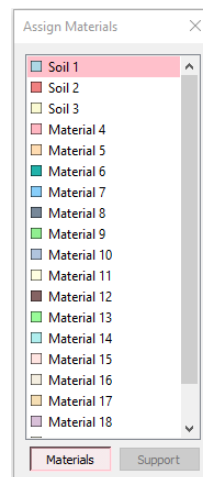
Για να ορίσετε ιδιότητες υλικού (χώματος ή βράχου), επιλέξτε Ορισμός υλικών από τη γραμμή εργαλείων ή το μενού Ιδιότητες. Επί του παρόντος είναι διαθέσιμα μόνο τρία μοντέλα Strength type (Mohr-Coulomb, Γενικευμένο Hoek-Brown, SHANSEP) Σχ. 3.19

Αντιστοίχιση Ιδιοτήτων

Οι ιδιότητες μπορούν να αντιστοιχιστούν με την επιλογή Assign Properties στη γραμμή εργαλείων ή στο μενού Ιδιότητες. Εάν δεν έχουν εκχωρηθεί Properties, τότε οι προεπιλεγμένες ιδιότητες θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο (Σχ. 3.20)



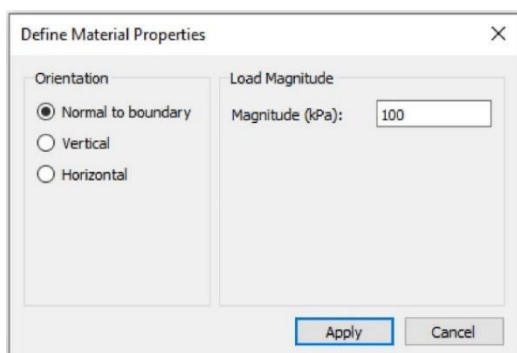
Σχήμα 3.19 Οθόνη ορισμού των ιδιοτήτων κάθε υλικού



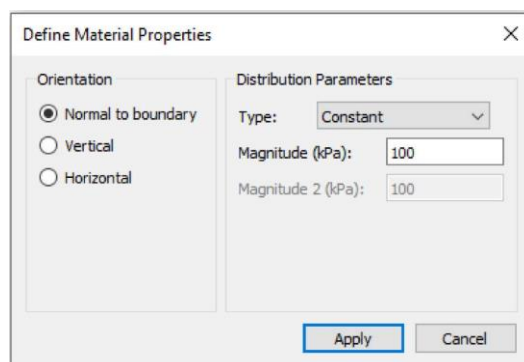
Σχήμα 3.20 Ιδιότητες υλικών

Φορτίσεις

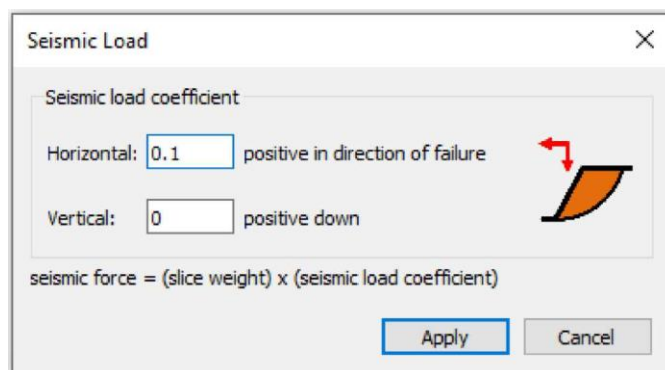
Διάφοροι τύποι εξωτερικής φόρτισης μπορούν να εφαρμοστούν στο μοντέλο όπως κατανεμημένα φορτία (Σχ. 3.21), γραμμικά φορτία (Σχ. 3.22) και σεισμικά φορτία (Σχ. 3.23)



Σχήμα 3.21 Οθόνη ορισμού κατανεμημένου φορτίου



Σχήμα 3.22 Οθόνη ορισμού γραμμικού φορτίου



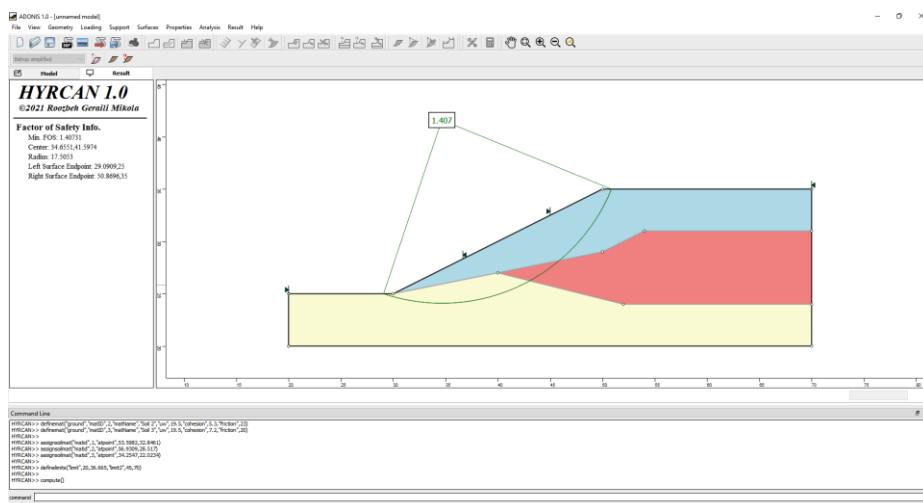
Σχήμα 3.23 Οθόνη ορισμού σεισμικού φορτίου

Υπολογισμός FOS

Για να ξεκινήσετε το **HYRCAN** Compute engine, επιλέξτε την επιλογή Compute από τη γραμμή εργαλείων ή το μενού Analysis. Η πρόοδος της ανάλυσης θα εμφανιστεί στο παράθυρο διαλόγου Υπολογισμός. Λάβετε υπόψη ότι στην τρέχουσα έκδοση του HYRCAN, το Bishop Simplified είναι η μόνη διαθέσιμη μέθοδος.

Αποτελέσματα σχεδίασης στο HYRCAN

Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός, είστε έτοιμοι να δείτε τα αποτελέσματα στην καρτέλα Αποτελέσματα. Από προεπιλογή, όταν ανοίξει η καρτέλα Αποτελέσματα, θα εμφανιστεί η συνολική επιφάνεια ελάχιστης ολίσθησης, για τη μέθοδο Bishop Simplified analysis. Λάβετε υπόψη ότι στην τρέχουσα έκδοση του HYRCAN, το Bishop Simplified είναι η μόνη διαθέσιμη μέθοδος.



Σχήμα 3.24 Παράδειγμα εφαρμογής τριών στρωμάτων

3.3 Θεωρήματα Άνω και Κάτω Ορίων της πλαστικότητας

3.3.1 Εισαγωγή

Σε αντίθεση με τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, η διαδικασία ανάλυσης ορίου LA εξετάζει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους με εξιδανικευμένο τρόπο. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι το έδαφος έχει ελαστική και απόλυτα πλαστική συμπεριφορά που ικανοποιεί το κριτήριο απόδοσης Coulomb και τον σχετικό κανόνα ροής. Η LA χρησιμοποιεί τα θεωρήματα κατώτερου και άνω ορίου της θεωρίας πλαστικότητας για να λύσει το πρόβλημα σταθερότητας και να

παράσχει τη γεωμετρία της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης. Τα κάτω όρια υποδηλώνουν ισορροπία, ενώ τα άνω όρια συνεπάγονται κατάρρευση. Ως εκ τούτου, οι λύσεις κάτω και άνω ορίου ορίζουν το εύρος όπου η πραγματική λύση βρίσκεται υπό δεδομένες συνθήκες σχηματισμού εδάφους και πρανούς. Πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που βασίζονται σε πεπερασμένα στοιχεία για τον υπολογισμό της λύσης άνω ορίου για πρηνή πολλαπλών στρωμάτων. Η LA δεν υπερσχύει της μεθόδου οριακής ισορροπίας στη περιγραφή της συνάρτησης δύναμης μεταξύ τομέων και συνήθως παρέχει συντελεστές ασφαλείας ελαφρώς μεγαλύτερους από αυτούς που λαμβάνονται από τις LEM. Επιπλέον, προκύπτουν δυσκολίες στον καθορισμό των πιθανών άνω και κάτω ορίων, ιδιαίτερα όταν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της πίεσης του νερού των πόρων, του ανομοιογενούς προφίλ του εδάφους και της ακανόνιστης γεωμετρίας πρανούς. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της LA σε περίπλοκα πραγματικά προβλήματα εξακολουθεί να είναι περιορισμένη.

3.3.2 Περιγραφή Ανάλυσης ορίων βασισμένη στο Θεώρημα του Ανω Ορίου σε συνθήκες στράγγισης.

Η LA έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τις τελευταίες δεκαετίες για ανάλυση ευστάθειας πρανών. Με τον καθορισμό του κινηματικού μηχανισμού του πρανούς και τον υπολογισμό του παραγόμενου έργου κατά την ολίσθηση, η ενέργεια που καταναλώνεται υπολογίζεται με βάση τη θεωρία ιδανικής πλαστικότητας και το κριτήριο Mohr–Coulomb (MC).

Η λύση του άνω ορίου λαμβάνεται από το ενεργειακό ισοζύγιο. Το έργο που σχετίζεται με την πλαστική παραμόρφωση εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια ολίσθησης με τη συνοχή και τη μετατόπιση (ή την ταχύτητα) της μάζας προς την κατεύθυνση της ολίσθησης. Η λύση του περιστροφικού μηχανισμού προκύπτει χρησιμοποιώντας τη λογαριθμική σπείρα (Σχ. 3.25), μια φυσική συνάρτηση με πιο χαρακτηριστική περίπτωση το κέλυφος του Ναυτίλου και το σχηματισμό τυφώνες.

τρίγωνα **OAB** και **OBC**, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα αδιάστατα έργα f_1 , f_2 , και f_3 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.16), την εξίσωση (3.17) και την εξίσωση(3.18),

$$f_1 = \frac{F_1}{\gamma \cdot r_0^3 \cdot \omega} = \int_{\theta_0}^{\theta_h} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{r}{r_0} \cdot \cos \theta \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \right) d\theta = \frac{(3 \cdot \tan \varphi \cdot \cos \theta_h + \sin \theta_h) \cdot r_h^3 - (3 \cdot \tan \varphi \cdot \cos \theta_0 + \sin \theta_0) \cdot r_0^3}{3r_0^3 (1 + 9 \cdot \tan^2 \varphi)} \quad (3.16)$$

$$f_2 = \frac{F_2}{\gamma \cdot r_0^3 \cdot \omega} = \frac{1}{3} \cdot \left(2 \cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \cdot \cos a \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{L}{r_0} \cdot \sin (\theta_0 + a) \right) \quad (3.17)$$

$$f_3 = \frac{F_3}{\gamma \cdot r_0^3 \cdot \omega} = \frac{1}{3} \cdot \left(\cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \cdot \cos a + \frac{r_h}{r_0} \cdot \cos \theta_h \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{r_h}{r_0} \cdot \frac{h}{r_0} \cdot \frac{\sin (\theta_h + \beta)}{\sin \beta} \right) \quad (3.18)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα. Οι όροι r_0 και r_h συμβολίζουν ακτίνες λογαριθμικής σπείρας και α και β τις γωνίες, που φαίνονται στο Σχ. 3.26.

Το παραγόμενο έργο κατά την ολίσθηση **C**, που καταναλώνεται στην επιφάνεια **AC** (Σχ. 3.26), υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.19):

$$C = \int_{\theta_0}^{\theta_h} c \cdot (V \cos \varphi) \cdot \frac{r}{\cos \varphi} d\theta = \frac{c \cdot (r_h^2 - r_0^2) \cdot \omega}{2 \cdot \tan \varphi} \quad (3.19)$$

όπου c είναι η συνοχή, και φ είναι η γωνία τριβής του σχηματισμού του εδάφους, και V είναι η ακτινική ταχύτητα της μάζας.

Η τροχιά **log-spiral** ορίζεται με βάση τις γωνίες θ_0 και θ_h (Σχ. 3.26) και τις εξισώσεις (3.20) και (3.21).

$$\frac{h}{r_0} = \frac{\sin \beta}{\sin (\beta - a)} \cdot \frac{r_h \cdot \sin (\theta_h + a) - r_0 \cdot \sin (\theta_0 + a)}{r_0} \quad (3.20)$$

$$\frac{L}{r_0} = \frac{\sin (\theta_h - \theta_0)}{\sin (\theta_h + a)} - \frac{\sin (\theta_h + \beta)}{\sin (\beta - a)} \cdot \left(\frac{r_h}{r_0} - \frac{\sin (\theta_0 + a)}{\sin (\theta_h + a)} \right) \quad (3.21)$$

Οι όροι θ_0 , και θ_h υποδηλώνουν τις γωνίες της λογαριθμικής σπείρας από τον οριζόντιο άξονα κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού όπως φαίνεται στο Σχ. 3.26.

Το κρίσιμο ύψος πρανούς κλίσης (h_{cr}) υπολογίζεται με την Εξίσωση (3.23). Παράγεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου, δηλαδή την Εξίσωση (3.22), αντικαθιστώντας την αναλογία h/r_0 με την τιμή που ορίζεται από την Εξίσωση (3.21).

$$C = F_1 - F_2 - F_3 \quad (3.22)$$

$$h_{cr} = \frac{c}{\gamma} \cdot \frac{\sin \beta}{2 \cdot \sin(\beta - a) \cdot \tan \varphi} \cdot \frac{e^{2(\theta_h - \theta_0) \cdot \tan \varphi} - 1}{f_1 - f_2 - f_3} \cdot \left\{ e^{(\theta_h - \theta_0) \cdot \tan \varphi} \cdot \sin(\theta_h + a) - \sin(\theta_0 + a) \right\} \quad (3.23)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω είναι κατάλληλη για πρανή που αποτελούνται από ένα μόνο γεωυλικό. Για την εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθοδολογίας για πολυεπίπεδα πρανή, συνιστάται η χρήση των ισοδύναμων ιδιοτήτων $\bar{\varphi}$, \bar{c} και $\bar{\gamma}$ των εδαφικών σχηματισμών. Αναλυτικά, η ισοδύναμη εσωτερική γωνία τριβής $\bar{\varphi}$ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν σταθμισμένο μέσο όρο με μήκος τόξου λογαριθμικού σπειροειδούς που προσδιορίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (3.24):

$$\tan \bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \tan \varphi_i \cdot \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} e^{(\theta - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{(\theta - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} d\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n \tan \varphi_i \cdot (e^{(\theta_i - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} - e^{(\theta_{i-1} - \theta_0) \tan \bar{\varphi}})}{e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} - 1} \quad (3.24)$$

Η τελική τιμή προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία, ξεκινώντας από την τιμή γωνίας τριβής του παχύτερου στρώματος. Ομοίως, η ισοδύναμη συνοχή \bar{c} και ισοδύναμο μοναδιαίο βάρος $\bar{\gamma}$ υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (3.25) και την Εξίσωση (3.26), αντίστοιχα, για να ληφθούν τα αντίστοιχα έργα που καταναλώθηκαν και παράγονται. (Steiakakis et al, 2023)

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} e^{2(\theta - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{2(\theta - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} d\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot (e^{2(\theta_i - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} - e^{2(\theta_{i-1} - \theta_0) \tan \bar{\varphi}})}{e^{2(\theta_h - \theta_0) \tan \bar{\varphi}} - 1} \quad (3.25)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot (f_{1i-1} - f_{2i-1} - f_{3i-1} - f_{1i} + f_{2i} + f_{3i})}{f_1 - f_2 - f_3} \quad (3.26)$$

όπου θ_0 είναι η γωνία σπειροειδούς κορμού της άνω επιφάνειας

θ_i είναι η λογαριθμική σπειροειδής γωνία τομής μεταξύ i και $i+1$ στρώματα εδάφους,

$\theta_n = \theta_h$ είναι η log-spiral γωνία του πρανούς του ποδιού, και

f_{1i} , f_{2i} , και f_{3i} ορίζονται από τις εξισώσεις (3.16)–(3.18) και τις εξισώσεις (3.20) και (3.21)

αντικαθιστώντας $\vartheta_0 = \vartheta_i$ και $r_0 = r_i$.

Η προσέγγιση μείωσης της δύναμης χρησιμοποιείται για τη μείωση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής ($cd=c/F$) και $\tan\phi d = \tan\phi/F$ κατά συντελεστή F μέχρι την επίτευξη οριακής ισορροπίας. Αυτή η μείωση οδηγεί το πρηνές πιο κοντά στην κρίσιμη συνθήκη οριακής ισορροπίας, το κρίσιμο ύψος (h_{cr}) ισοδυναμεί με το πραγματικό ύψος ($h_{cr}=h$), ενώ η παράμετρος F αντιπροσωπεύει μια εκτίμηση του παράγοντα ασφάλειας ($FS = F$).

4ο Κεφάλαιο Μελέτη Αστοχίας Ορυχείων

4.1 Μελέτη σταθερότητας στο Βόρειο Μεταλλείο Μαθιάτη με την Ανάλυση ορίων βασιζόμενη στο θεώρημα του Άνω Ορίου.

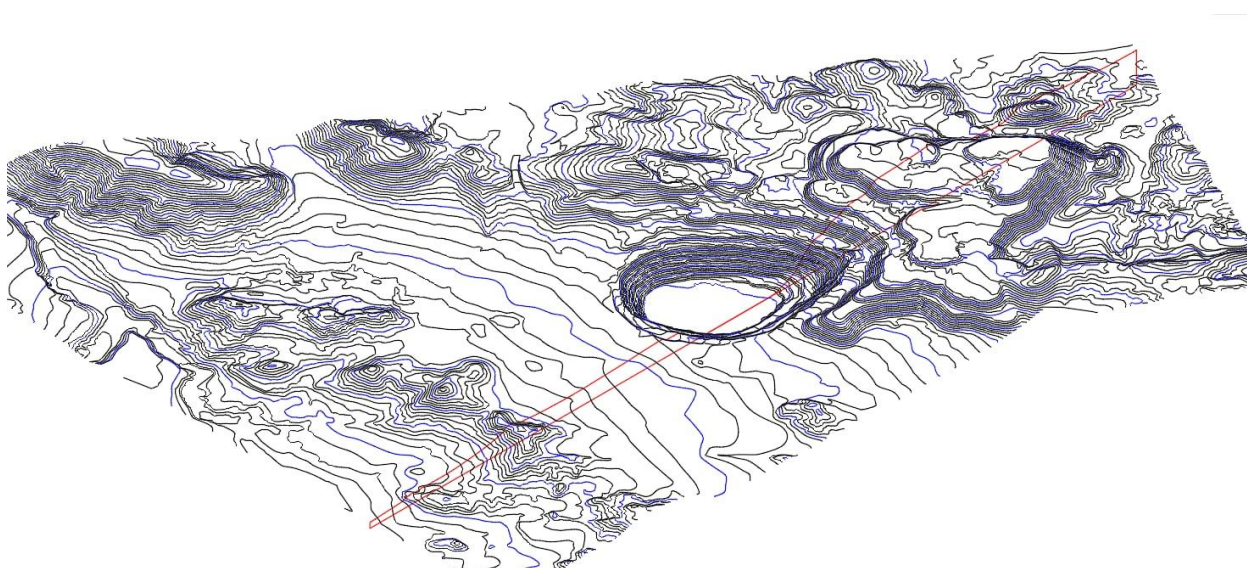
Στη ενότητα αυτή εξετάζεται η σταθερότητα πρανούς στο βόρειο μεταλλείο του Μαθιάτη όπου κατά τη διάρκεια της εξόρυξης το στείρο υλικό εναποτίθεται σε σωρούς σε θέσεις πλησίον του εξωτερικού ορίου της εκσκαφής και εγκαταλείπονταν.

Τα ορυχεία Μαθιάτη άρχισαν να λειτουργούν τη δεκαετία 1930 (1936-1938) και εγκαταλείφθηκαν την δεκαετία του 1980, αφήνοντας πίσω τους υπαίθριες εξορύξεις και σωρούς απορριμάτων με ή χωρίς ανοργανοποίηση. Το Βόρειο μεταλλείο του Μαθιάτη είναι αποτέλεσμα περίπλοκων γεωλογικών διεργασιών αποτυπωμένες σε διάφορα λιθολογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά. Ανήκει στην οφιολιθική μάζα του όρους Τρόδος η οποία σχετίζεται με σημαντικά ογκώδη θειούχα κοιτάσματα τα οποία προέκυψαν από θαλάσσιες ηφαιστειακές διαδικασίες. Αυτά τα κοιτάσματα περιλαμβάνουν πάνω από 40% των θειούχων ορυκτών όπως πυρίτης, χαλκοπυρίτης, βορνίτης, φαληρίτης, χαλκοσίνης, γαληνός κ.λ.π. ενώ χαρακτηρίζονται με σημαντικές συγκεντρώσεις χαλκού, ψευδαργύρου, μολύβδου, χρυσού και αργύρου. Οι σχηματισμοί θειούχων ορυκτών συνδέονται άμεσα με τη διαδικασία κυκλοφορίας υδροθερμικού υγρού που συμβαίνει στα πετρώματα του ωκεάνιου φλοιού. Στην παρακάτω εικόνα 4.1 φαίνεται φωτογραφία κάτοψης του μεταλλείου όπου σε κόκκινους κύκλους φαίνονται οι εξωτερικές αποθέσεις στείρων, και σε μπλέ κύκλο ο εγκαταλελειμμένος κρατήρας της εκμετάλλευσης (G. Saratsis, G. Xiroudakis et al, 2023).



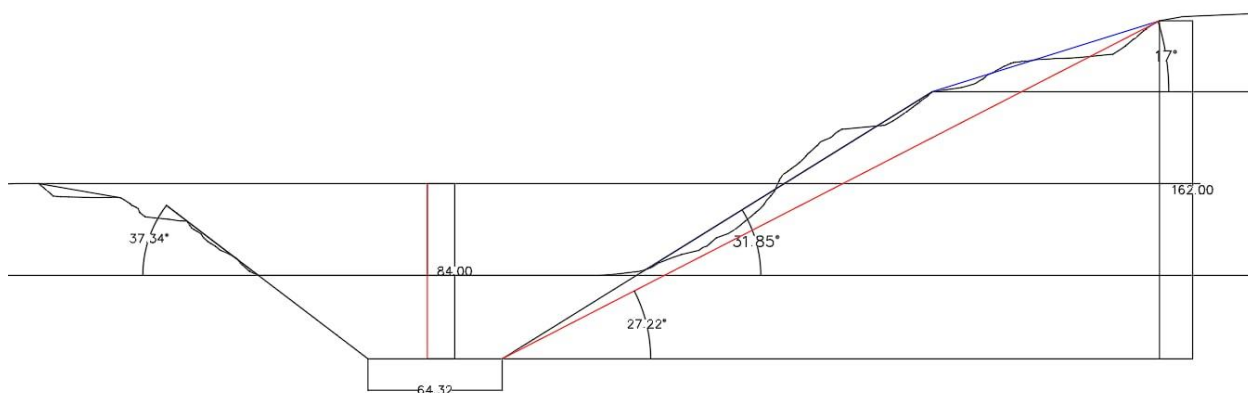
Εικόνα 4.1 Κάτοψη Βόρειου Μεταλλείου Μαθιάτη – Σχήμα (από Διπλωματική εργασία Α. Παπακωνσταντίνου, 2022)

Καταρχάς βρίσκεται η γεωμετρία του πρανούς κάνοντας μια τομή στο στερεό που παριστάνει το μεταλλείο το οποίο σχεδιάστηκε στο AutoCAD, οι παρακάτω εικόνες περιγράφουν την διαδικασία μοντελοποίησης και κατασκευής της στοάς.



Σχήμα 4.1 : Ισοϋψείς και θέση τομής στο Βόρειο Μεταλλείο Μαθιάτη.

Στο παραπάνω Σχ. 4.1 φέρεται η τομή η οποία πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να τέμνει και τις αποθέσεις εκτός από το πέτρωμα.



Σχήμα. 4.2 : Γεωμετρικά στοιχεία τομής.

Από το παραπάνω σχήμα 4.2 φαίνεται ότι τα γεωμετρικά στοιχεία τομής είναι :

Μέση γωνία πρανούς = 27.22°

Γωνία της εκμετάλλευσης = 31.85°

Γωνία αποθέσεων = 17°

Υψος συνολικό = 162m

*καθώς το pit περιέχει νερό έγινε εκτίμηση του ύψους με βάση τη γωνία εκμετάλλευσης και το εκτιμώμενο πλάτος της πλατείας.

Στη συνέχεια τροποποιείται το excel από την εργασία (Steiakakis et al.,2023) ώστε να λειτουργεί για 2 στρώματα που φαίνονται στο σχ 4.3 ως πάνω στρώμα οι αποθέσεις στείρων και το κάτω στρώμα το πέτρωμα που είχε γίνει η εξόρυξη.

Το αρχείο excel όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος (Ανάλυσης Ορίων, θεώρημα Ανω Ορίου) λειτουργεί βάζοντας στα αντίστοιχα κελιά το ύψος του πρανούς, την κλίση του πρανούς καθώς και την κλίση των στρωμάτων που το απαρτίζουν και τα γεωλογικά στοιχεία του πετρώματος του κάθε στρώματος (γ, c, ϕ). Την κυκλική επιφάνεια ολίσθησης την αποτυπώνει μια λογαριθμική σπείρα. Και για να βρεθούν τα αποτελέσματα λύνονται εξισώσεις με τον solver οι οποίες εξηγούνται παρακάτω.

Χρησιμοποιήθηκαν για το πέτρωμα τιμές γωνίας τριβής ϕ 20^0 , 25^0 , 30^0 και τιμές συνοχής c 10 kPa, 20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa και σχηματίζεται πίνακας 15 συνδιασμών (πίνακας 4.1)

Πίνακας 4.1 : Συνδιασμοί ϕ & c για το πέτρωμα

c \ ϕ	20	25	30
10	c1 ϕ 1	c1 ϕ 2	c1 ϕ 3
20	c2 ϕ 1	c2 ϕ 2	c2 ϕ 3
30	c3 ϕ 1	c3 ϕ 2	c3 ϕ 3
40	c4 ϕ 1	c4 ϕ 2	c4 ϕ 3
50	c5 ϕ 1	c5 ϕ 2	c5 ϕ 3

Επειδή οι αποθέσεις των στεírων έχουν υποστεί επεξεργασία οι αντίστοιχες τιμές των γωνιών τριβής και συνοχής σε σχέση με το πέτρωμα ελαττώνονται, οπότε κάνουμε την υπόθεση ότι οι τιμές των γωνιών τριβής που αντιστοιχούν στις παραπάνω θα είναι : $15,46^0$, $19,51^0$ και $23,69^0$ και οι αντίστοιχες τιμές συνοχής θα είναι : 6,25 kPa , 12,5 kPa , 18,75 kPa , 25 kPa και 31,25 kPa.

Από τις παραπάνω αντιστοιχούσες τιμές στις αποθέσεις στεírων σχηματίζεται ένας νέος πίνακας 15 συνδιασμών (πίνακας 4.2)

Πίνακας 4.2: Συνδιασμοί ϕ & c για τις αποθέσεις

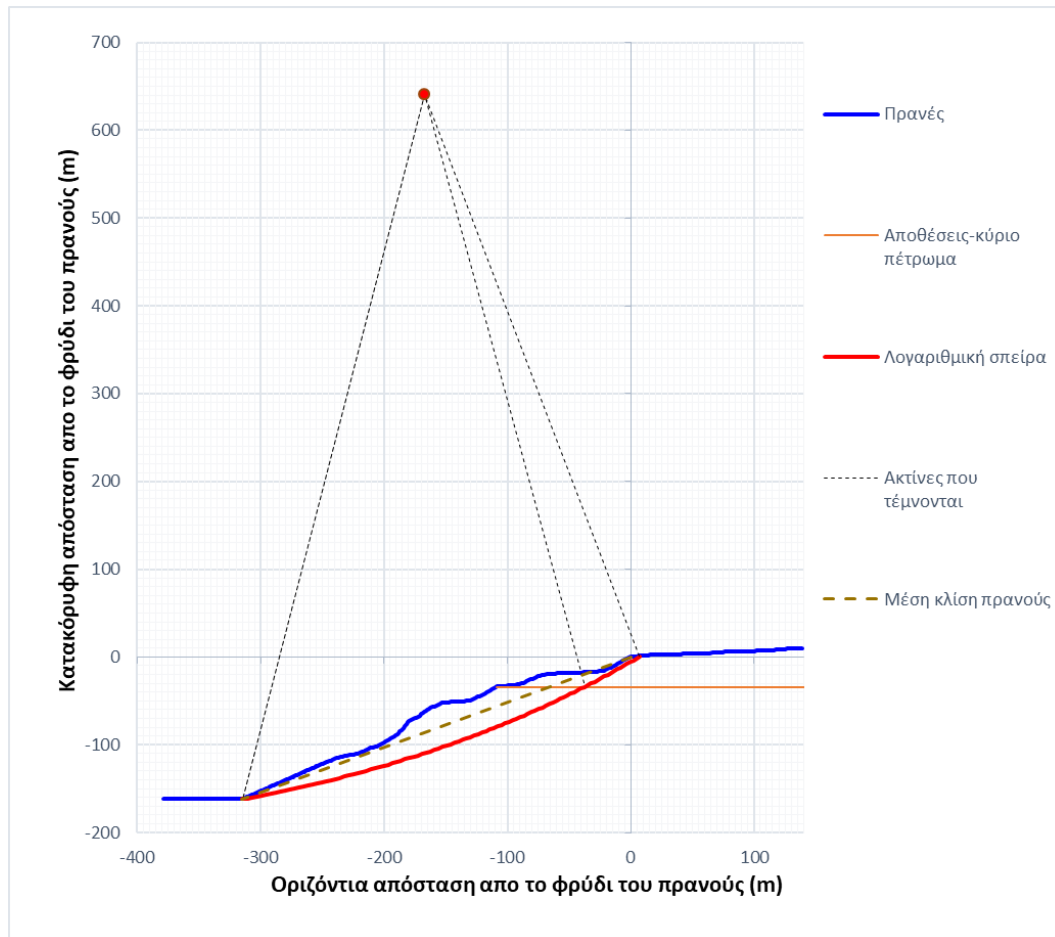
c \ ϕ	15.46	19.51	23.69
6.25	c1 ϕ 1	c1 ϕ 2	c1 ϕ 3
12.5	c2 ϕ 1	c2 ϕ 2	c2 ϕ 3
18.75	c3 ϕ 1	c3 ϕ 2	c3 ϕ 3
25	c4 ϕ 1	c4 ϕ 2	c4 ϕ 3
31.25	c5 ϕ 1	c5 ϕ 2	c5 ϕ 3

Ενδεικτικά εξετάζεται η περίπτωση για τον συνδυασμό $\phi_{\text{πετρ}} = 20^0$ & $c_{\text{πετρ}} = 10$ kPa του πετρώματος με τον αντίστοιχο του $\phi_{\text{αποθ}} = 15,46^0$ & $c_{\text{αποθ}} = 6,25$ kPa της απόθεσης στεírων.

Όλα τα διαγράμματα υπολογίστηκαν με $\gamma_{\text{πετρ}} = 28$ kN/m³ & $\gamma_{\text{αποθ}} = 25$ kN/m³ επειδή ένα τυπικό ειδικό βάρος για το θραυσμένο υλικό που βρίσκεται στο Μαθιάτη.

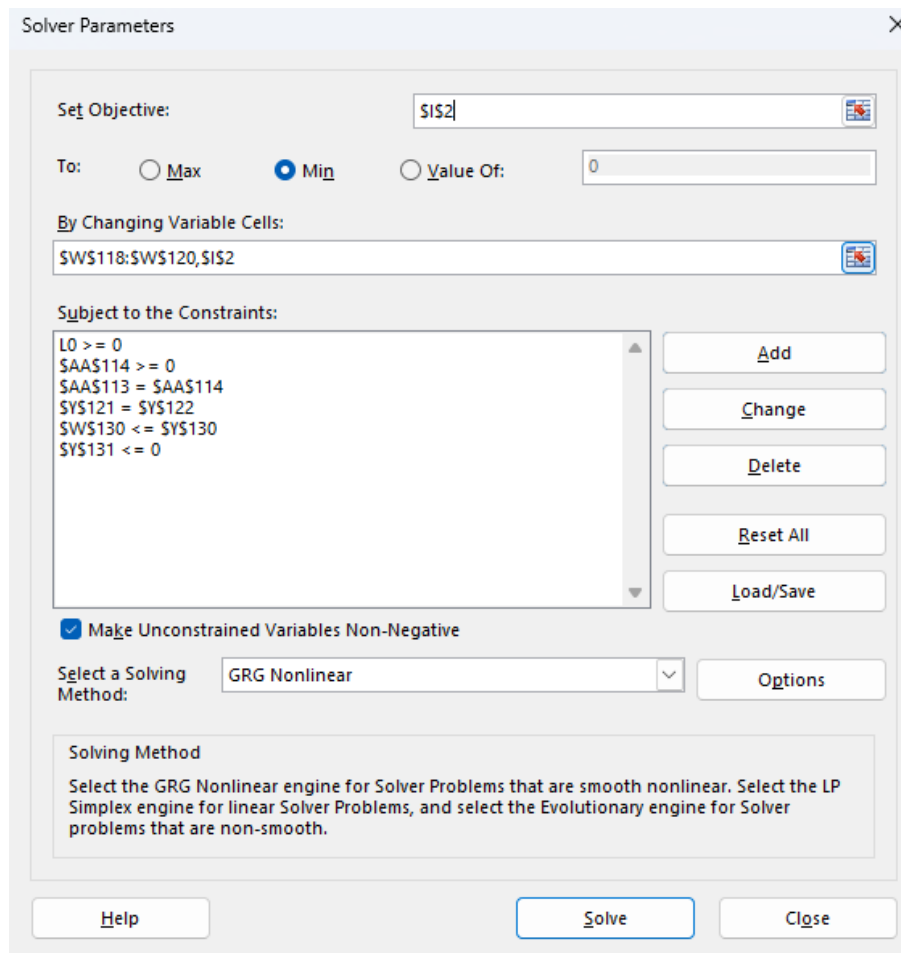
Για ύψος πρανού $H = 162 \text{ m}$, συνολική γωνία πρανού $\beta = 27,22^\circ$, $\beta_{\text{πετρ}} = 31,85^\circ$, $\beta_{\text{αποθ}} = 17^\circ$ και γωνία οριζόντιου άξονα με φρύδι-έδαφος $\alpha = 4,06^\circ$.

Μετά τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 4.3) μετά από εφαρμογή του θεωρήματος του άνω ορίου στο excel.



Σχήμα 4.3 : Λογαριθμική σπείρα μηχανισμού ολίσθησης για τους συνδυασμούς $\phi_{\text{πετρ}} = 20^\circ$, $c_{\text{πετρ}} = 10 \text{ kPa}$ & $\phi_{\text{αποθ}} = 15,46^\circ$, $c_{\text{αποθ}} = 6,25 \text{ kPa}$.

Κατόπιν ο solver χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας αλλά και της επιφάνειας ολίσθησης με τις παρακάτω εξισώσεις για όλους τους συνδυασμούς $\phi_{\text{πετρ}}$, $c_{\text{πετρ}}$ & $\phi_{\text{αποθ}}$, $c_{\text{αποθ}}$.



Σχήμα 4.4: Οθόνη solver για min Συντελεστή ασφαλείας

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.4, το L_0 είναι το πηλίκο της οριζόντιας απόστασης L δια την ακτίνα της κυκλικής αστοχίας r_0 που διέρχεται από το κέντρο του κύκλου και φτάνει στο σημείο που η αστοχία τέμνει το πάνω μέρος του πρανούς $L_0 = L/r_0$.

I_2 =Συντελεστής ασφαλείας

Στο κελί AA114 αντιστοιχεί στο Κρίσιμο ύψος (H_{cr}). Το κρίσιμο ύψος είναι το ύψος πάνω από το οποίο ένα πρανές αστοχεί

Στο κελί AA113 αντιστοιχεί το Κανονικό ύψος

Στο κελί Y121 αντιστοιχεί το $h_0 + h_1$

Στο κελί Y122 αντιστοιχεί το $r_{12} * \sin(\theta_{12})$

h_0+h_1 και το $r_{12}*\sin(\theta_{12})$ είναι δύο όροι οι οποίοι περιγράφουν την κατακόρυφη μετακίνηση του εδαφικού όγκου κατά την κυκλική αστοχία

W_{130} =Οριζόντια απόσταση αστοχίας από το φρύδι του πρανούς

Y_{130} =Μια μέγιστη οριζόντια απόσταση αστοχίας από το φρύδι ώστε να είναι ρεαλιστικό το αποτέλεσμα

Y_{131} =Η διαφορά των χ στη λογαριθμική σπείρα για να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχει στροφή

Άρα οι εξισώσεις που λύνει ο σόλβερ είναι οι εξής:

$L/r_0 \geq 0$ ώστε η λογαριθμική σπείρα να μη βγαίνει εκτός του πρανούς

$$H_{cr} \geq 0$$

$H=H_{cr}$ Το κρίσιμο ύψος να είναι ίσο με το πραγματικό ύψος του πρανούς

$$h_0 + h_1 = r_{12} * \sin(\theta_{12})$$

$L \leq L_{\max}$ το L_{\max} αντιστοιχεί σε μια τιμή που ορίζεται ώστε να είναι ρεαλιστικό το αποτέλεσμα

$\Delta\chi \leq 0$ Η διαφορά των χ στη λογαριθμική σπείρα πρέπει να είναι μικρότερη από μηδέν ώστε για να μη υπάρξει στροφή

Οι τιμές W_{118} , W_{119} , W_{120} είναι θ_0 , θ_h , θ_{12} οι οποίες μαζί με τον συντελεστή ασφαλείας είναι οι παράμετροι που θα αλλάζουν ώστε ο solver να βρίσκει τη βέλτιστη λύση.

Η Μέθοδος Γενικευμένης Ανηγμένης Κλίσης (Generalized Reduced Gradient - GRG) που προτάθηκε από τους Lasdon et al. (1978) είναι μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Chapra και Canale, 2009), απαιτώντας μόνο η αντικειμενική συνάρτηση να είναι διαφορίσιμη. Η κύρια ιδέα αυτής της μεθόδου είναι η επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος αντιμετωπίζοντας τις ενεργές ανισότητες. Οι μεταβλητές χωρίζονται σε ένα σύνολο βασικών (εξαρτημένων) μεταβλητών και μη βασικών (ανεξάρτητων) μεταβλητών. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ανηγμένη κλίση προκειμένου να βρεθεί το ελάχιστο στη

διεύθυνση αναζήτησης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση (Venkataraman, 2009).

Βάζοντας τις τιμές στο excel βγαίνουν οι παρακάτω 2 πίνακες όπου με κόκκινο χρώμα έχουν παρουσιαστεί αστοχίες.

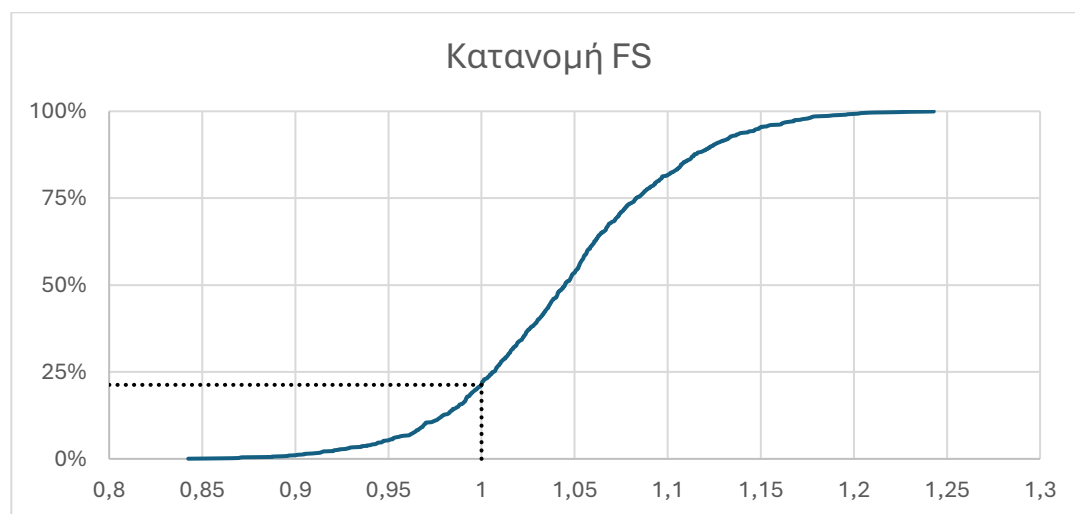
Πίνακας 4.3 : ΣΑ για όλους τους συνδυασμούς $\phi_{\text{πετρ}}$, $c_{\text{πετρ}}$

c \ ϕ	20	25	30
10	0,76	0,95	1,17
20	0,80	1,00	1,22
30	0,84	1,05	1,27
40	0,87	1,08	1,31
50	0,91	1,12	1,34

Πίνακας 4.4 : ΣΑ για όλους τους συνδυασμούς $\phi_{\text{αποθ}}$, $c_{\text{αποθ}}$

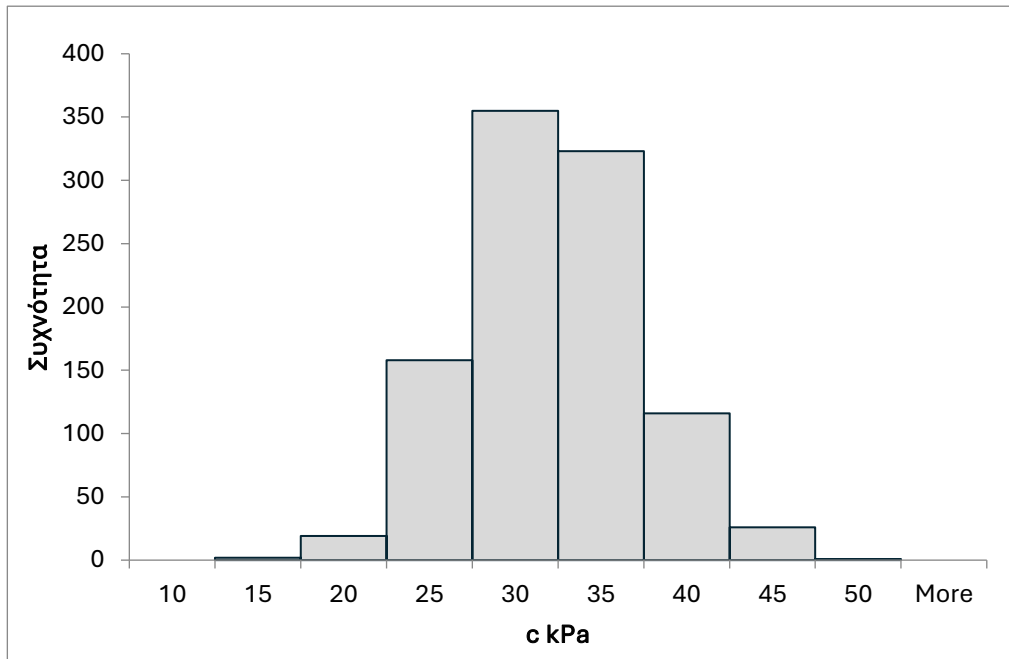
c \ ϕ	15,46	19,51	23,69
6,25	0,76	0,95	1,17
12,5	0,80	1,00	1,22
18,75	0,84	1,05	1,27
25	0,87	1,08	1,31
31,25	0,91	1,12	1,34

Έπειτα δημιουργήθηκαν δύο κατανομές ώστε να δούμε τι πιθανότητα υπάρχει να αστοχήσει το πρανές. Για να προκύψουν αυτές οι κατανομές χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo με την οποία παράχθηκαν τυχαία δείγματα των παραμέτρων c και ϕ με πλήθος 1000 ζεύγη δειγμάτων $\phi_{\text{πετρ}}$, $c_{\text{πετρ}}$ τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στις οριακές τιμές $\phi = 20-30$, $c = 10-50$. Με γνώμονα τις τιμές που ήδη έχουν υπολογιστεί βρέθηκαν οι Συντελεστές Ασφαλείας που αντιστοιχούν σε αυτά τα ζεύγη δειγμάτων c & ϕ . Η πρώτη κατανομή προκύπτει για ασυσχέτιστες τιμές c , ϕ (Σχ. 4.5) δηλαδή δεν προέρχονται από την ίδια πιθανότητα και η δεύτερη για συσχετισμένες τιμές c , ϕ οι οποίες προέρχονται από την ίδια πιθανότητα (Σχ. 4.8).



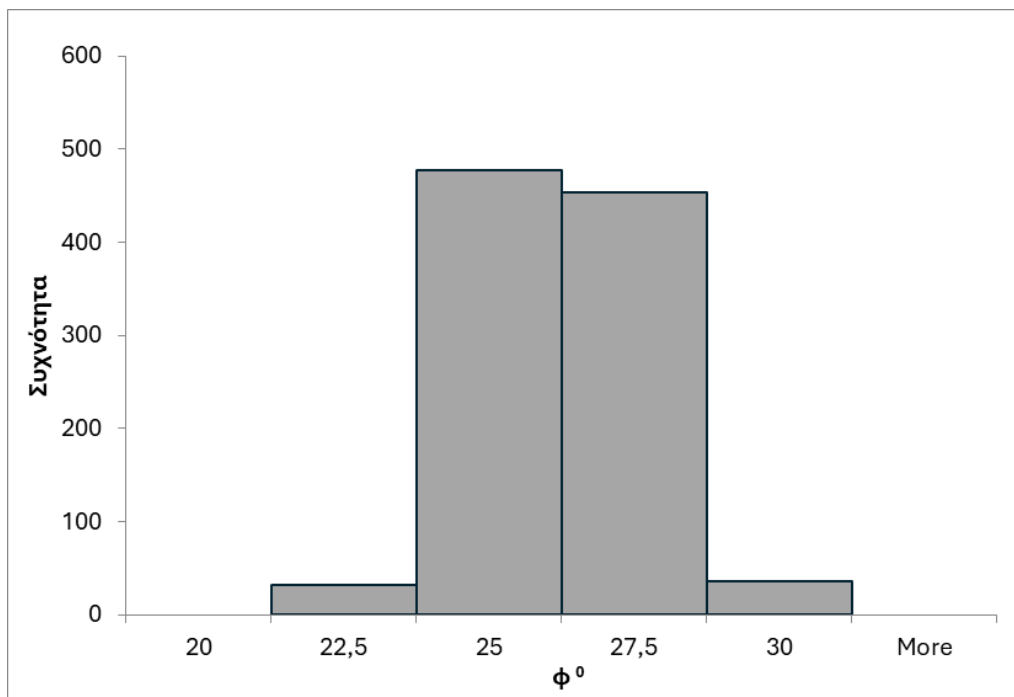
Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα κατανομής Συντελεστών ασφαλείας ασυσχέτιστων τιμών c , ϕ

Η πιθανότητα αστοχίας του πρανούς για ασυσχέτιστες τιμές c , ϕ που προκύπτει είναι 21,3%. Τα ιστογράμματα που ακολουθούν δείχνουν πως κατανέμονται τα χίλια ζεύγη τιμών του c , ϕ και με τι συχνότητα εμφανίζονται στα όρια που τέθηκαν.



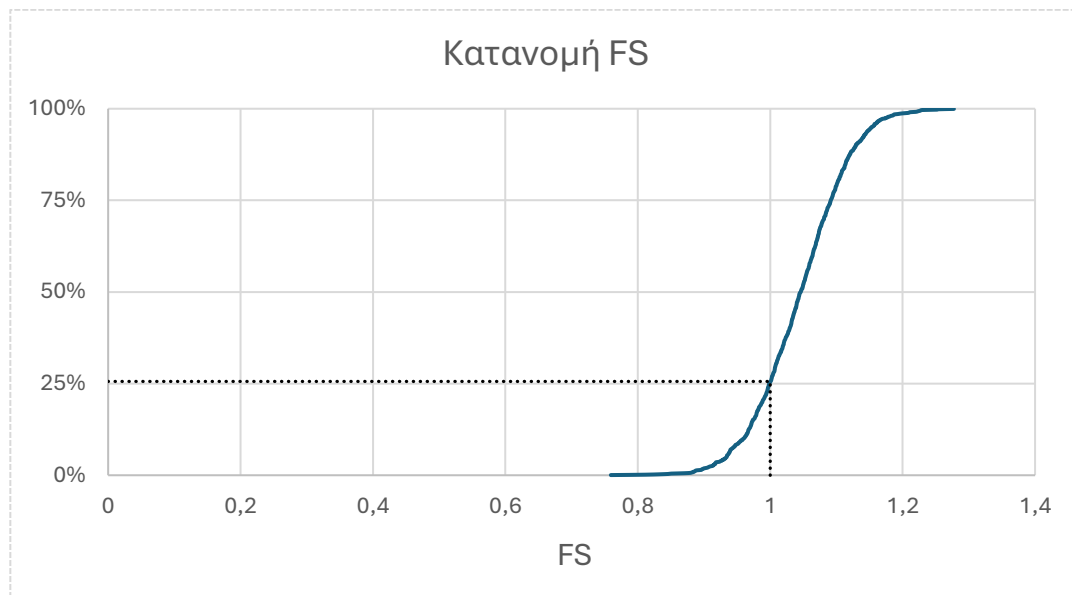
Σχήμα 4.6: Ιστόγραμμα συνοχής (ασυσχέτιστες τιμές)

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο πλήθος των τιμών συνοχής βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 30kPa και 35kPa.



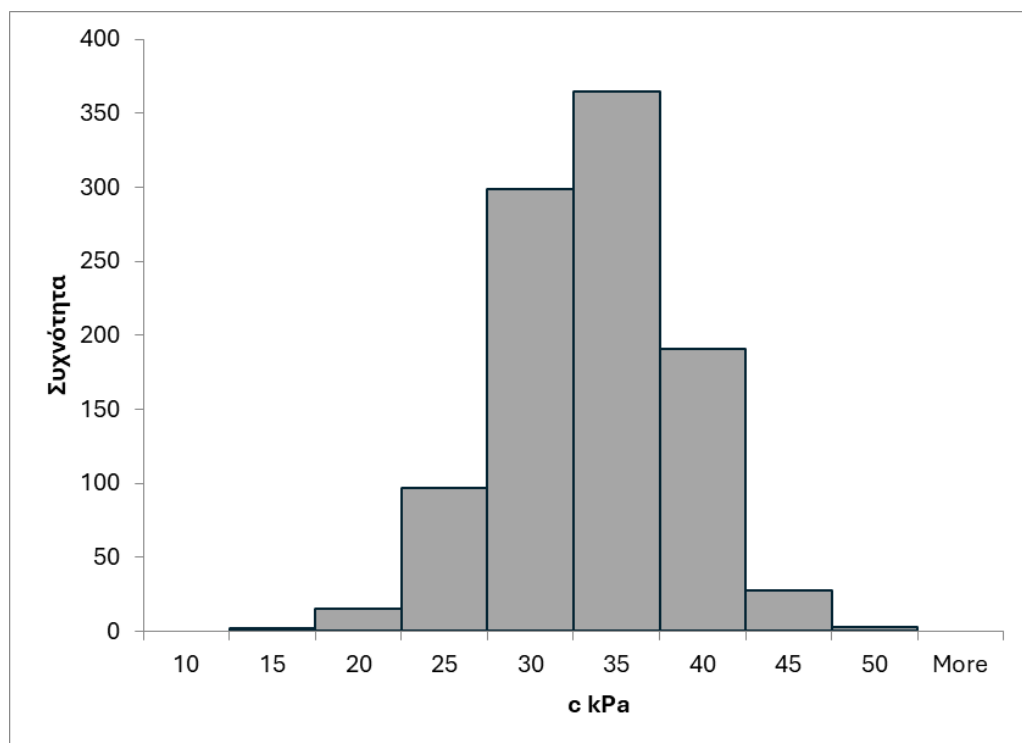
Σχήμα 4.7: Ιστόγραμμα γωνιών τριβής (ασυσχέτιστες τιμές)

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο πλήθος των τιμών γωνιών τριβής βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 25° και $27,5^{\circ}$. Η κατανομή των συντελεστών Ασφαλείας για συσχετισμένες τιμές c , ϕ φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 4.8.



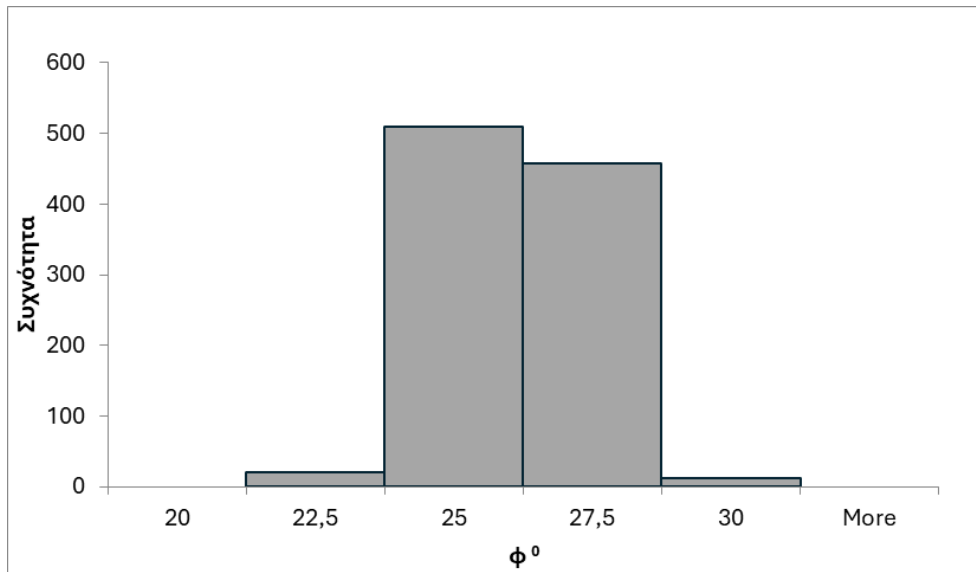
Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα κατανομής Συντελεστών ασφαλείας συσχετισμένων τιμών c , ϕ

Η πιθανότητα αστοχίας του πρανούς που προκύπτει για συσχετισμένες τιμές c , ϕ είναι 25,6%.



Σχήμα 4.9 :Ιστόγραμμα συνοχής (συσχετισμένες τιμές)

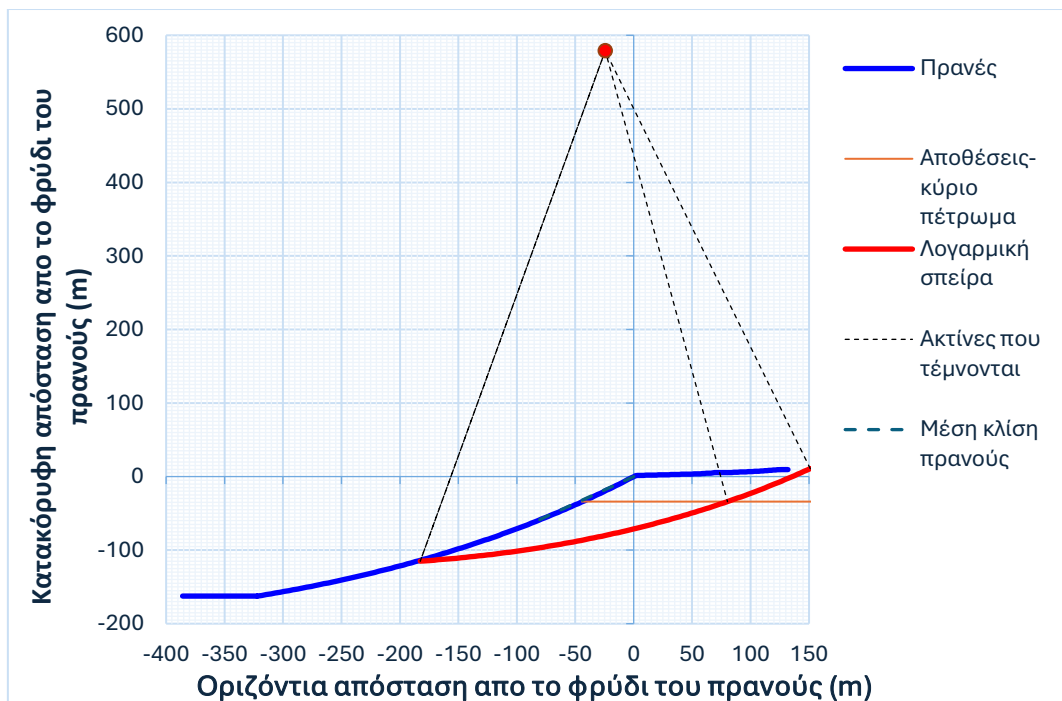
Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο πλήθος των τιμών συνοχής βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 30kPa και 35kPa.



Σχήμα 4.10: Ιστόγραμμα γωνιών τριβής (συσχετισμένες τιμές)

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο πλήθος των τιμών γωνιών τριβής βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 25° και $27,5^\circ$

Στις περιπτώσεις που υπάρχει αστοχία αφαιρείται το τμήμα που αστοχεί και υπολογίζεται η 2^η αστοχία στο πρανές που έχει παραμείνει. Για τη περίπτωση με $\phi_{\text{πετ}}=20^\circ$ $c_{\text{πετ}}=10\text{kPa}$ $\phi_{\text{αποθ}}=15,46^\circ$ $c_{\text{αποθ}}=6,25\text{kPa}$ προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα 2ης αστοχίας

Η περίπτωση της 2^{ης} αστοχίας δεν έχει σκοπό να βρεθεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας αλλά η λύση που θα δώσει την μεγαλύτερη αστοχία δηλαδή την μέγιστη οριόντια απόσταση μεταξύ φρυδιού και αρχής ολίσθησης στο έδαφος.

Οι εξισώσεις που κλήθηκε να λύσει ο solver είναι οι παρακάτω :

Σχήμα 4.12: Οθόνη solver για max απόσταση αστοχίας

$$W132 = \theta_h - \theta_0 \geq 20^0$$

Επίσης σε κάθε διαδικασία εισάγεται ύψος κάθε φορά κοντά στα 62 μέτρα μετρώντας από το φρύδι. Καθώς η αστοχία δε θα ήταν ικανοποιητική αν αστοχούσε από το ίδιο ύψος με τη πρώτη. Οπότε βγαίνει το παρακάτω διάγραμμα σε συνέχεια του.

Κάνοντας την ίδια διαδικασία σε κάθε περίπτωση που αστοχεί και αθροίζοντας τα 2 L της 1ης και της 2^{ης} αστοχίας από κάθε περίπτωση προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

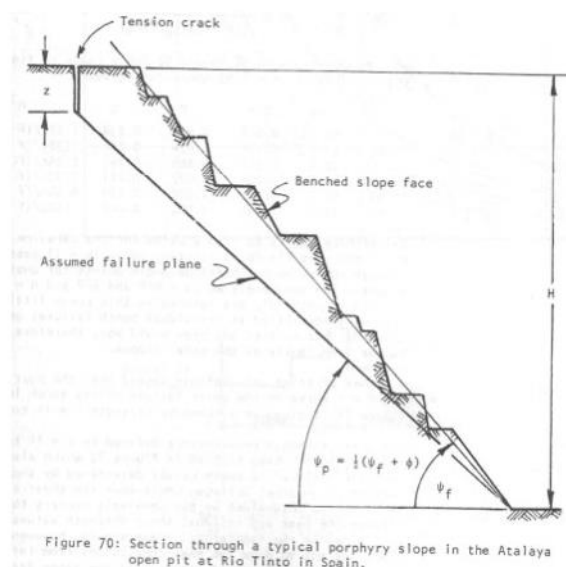
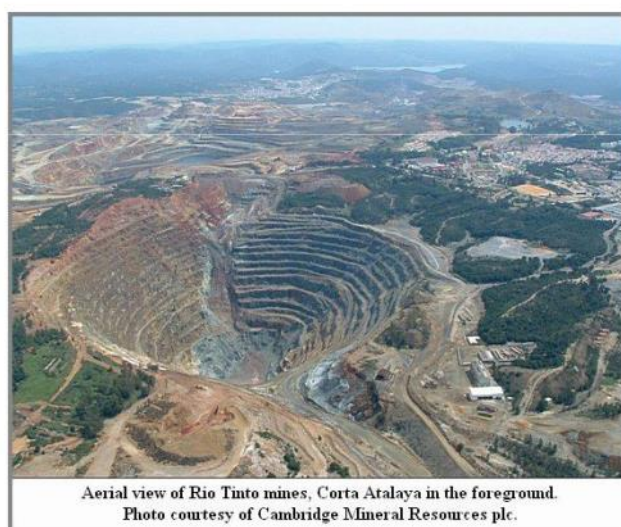
Πίνακας 4.5 : Οι αποστάσεις L_{\max} για συνδυασμούς σε ολίσθηση

$c \backslash \phi$	20	25
10	158,5	66,3
20	101,6	
30	101,3	
40	134,3	
50	116,3	

Δυστυχώς το πλήθος των αποτελεσμάτων δεν μας επιτρέπει να κάνουμε κατανομή για περαιτέρω μελέτη.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη απόσταση αστοχίας μεταξύ φρυδιού και αρχής ολίσθησης στο έδαφος βρίσκεται στον συνδυασμό με $\phi_{\text{πετ}}=20^\circ$ & $c_{\text{πετ}}=10\text{kPa}$ και είναι ίση με 158,5 m.

4.2 Μελέτη σταθερότητας Μεταλλείου Corta Atalaya.



Εικόνα 4.2: α) Φωτογραφία Ορυχείου Corta Atalaya, β) τομή μέσα από μια τυπική πλαγιά από πορφύριο στο ανοιχτό ορυχείο Corta Atalaya στο Rio Tinto στην Ισπανία (Wyllie & Mah 2005, Ξηρουδάκης, 2021).

Η εντατική εξόρυξη που πραγματοποιείται στην Ιβηρική Ζώνη Πυρίτη (IPB) έχει αφήσει μια κληρονομιά από ορυχεία με σημαντικό μέγεθος. Μεταξύ αυτών, το Corta Atalaya ένα μονοστρωματικό ορυχείο το οποίο διαθέτει σημαντικές διαστάσεις, με μήκος 1,2 km, πλάτος 0,9 km και βάθος 350 m. με κλίση πρανούς 50° και θεωρήθηκε μοναδιαίο βάρος 28 kN/m^3 . Το Corta Atalaya βρίσκεται στα βορειοδυτικά του αστικού

πυρήνα των ορυχείων Rio Tinto στην επαρχία Huelva της Ισπανίας. Το Corta Atalaya ήταν κάποτε τόπος εξόρυξης τεράστιων ποσοτήτων θειούχων οξέων όπως ψευδάργυρος (Zn), χαλκός (Cu) και μόλυβδος (Pb) από το πολυμεταλλικό κοίτασμα του San Dionisio. Στην ακμή του απασχολούσε 2.000 εργάτες εξόρυξης χαλκού. Οι εργασίες εξόρυξης ξεκίνησαν το 1885 και ολοκληρώθηκαν το 1992. Από τουλάχιστον το 1994 έχει πλημμυρίσει μέχρι τον 16ο δακτύλιο (Wyllie & Mah 2005).

Το μεταλλείο Corta Atalaya μελετήθηκε για ευστάθεια πρανούς με χρήση κυκλικών διαγραμμάτων αστοχίας και τη μέθοδο λωρίδων Bishop με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

A) Μελέτη με χρήση κυκλικών διαγραμμάτων και με δεδομένα:

- Βάθος πρανούς : $H=350\text{m}$
- Κλίση πρανούς : $\beta=50^\circ$
- Μοναδιαίο βάρος : $\gamma = 28\text{KN/m}^3$
- Στραγγισμένα πρανή

Επιλέγεται το αντίστοιχο κυκλικό διάγραμμα αστοχίας (νομόγραμμα) για στραγγισμένα πρανή (Σχ. 4.13) χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές για τη γωνία τριβής και την συνοχή. Συγκεκριμένα οι τιμές που επιλεχθηκαν για τη γωνία τριβής ϕ είναι ίσες με 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° και για τη συνοχή c είναι ίσες με 20kPa , 40kPa , 60kPa , 80kPa και 100kPa .

Από τον συνδυασμό των παραπάνω τιμών σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας (4.6), 30 συνδυασμών.

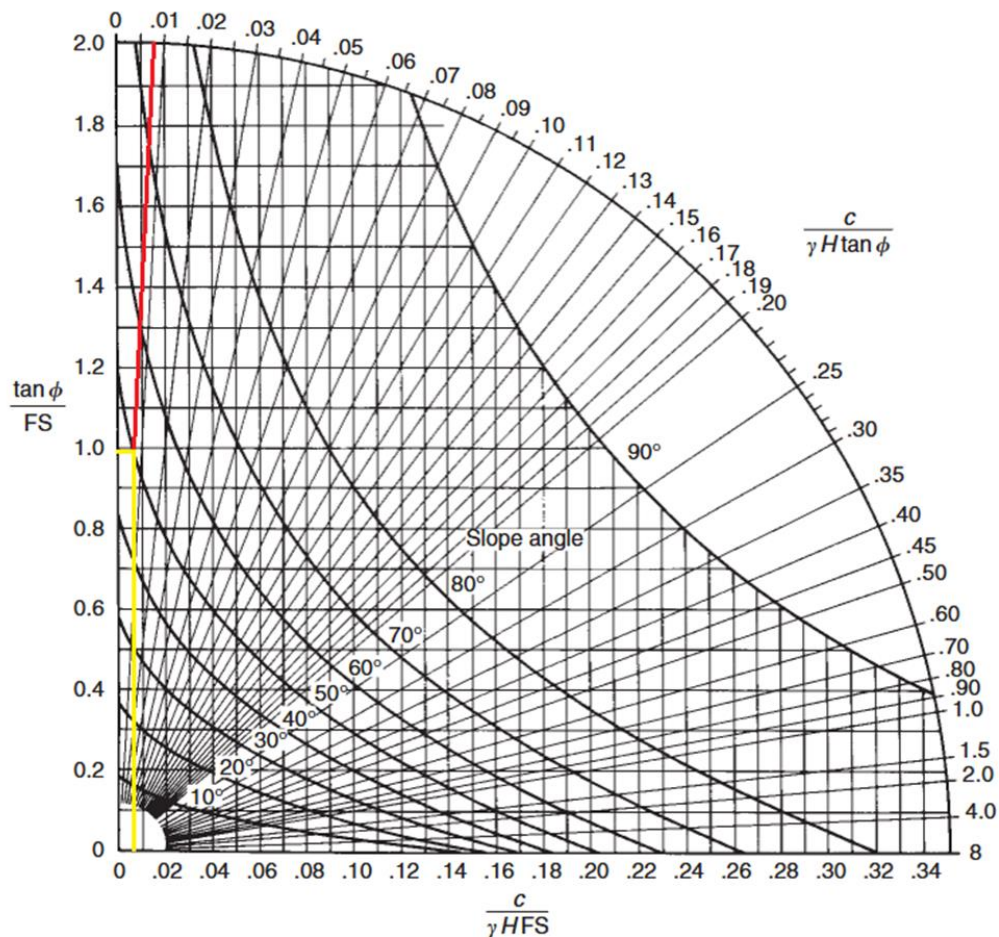
Πίνακας 4.6 Συνδυασμός τιμών c και ϕ

$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	c1φ1	c1φ2	c1φ3	c1φ4	c1φ5	c1φ6
40	c2φ1	c2φ2	c2φ3	c2φ4	c2φ5	c2φ6
60	c3φ1	c3φ2	c3φ3	c3φ4	c3φ5	c3φ6
80	c4φ1	c4φ2	c4φ3	c4φ4	c4φ5	c4φ6
100	c5φ1	c5φ2	c5φ3	c5φ4	c5φ5	c5φ6

Ενδεικτικά για το συνδυασμό $c = 20\text{kPa}$ & $\phi=15^\circ$ υπολογίζεται το $\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \tan \phi} = \frac{20}{28 \cdot 350 \cdot \tan 15} = 0,0076$, χαράσσεται η ακτινική γραμμή από την τιμή 0,0076 έως την τομή της με την καμπύλη που αντιστοιχεί στη γωνία κλίσης 50° του πρανούς.

Στη συνέχεια χαράσσονται δύο ευθείες γραμμές κάθετες στους άξονες x, y και βρίσκεται το σημείο που τέμνεται ο οριζόντιος άξονας. Το σημείο αυτό είναι ίσο με 0,008 οπότε ισχύει $\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot FS} = 0,008$, λύνεται ως προς FS και βρέθηκε $FS = 0,25$.

Η διαδικασία δείχνεται στο παρακάτω Σχ. 4.13



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα πλήρως στραγγισμένου πρανούς

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για όλους τους παραπάνω συνδυασμούς που προκύπτουν από τα ϕ και c και στη συνέχεια προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 4.7 με τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας όπου με κίτρινο χρώμα έχουν παρουσιαστεί οι αστοχίες.:

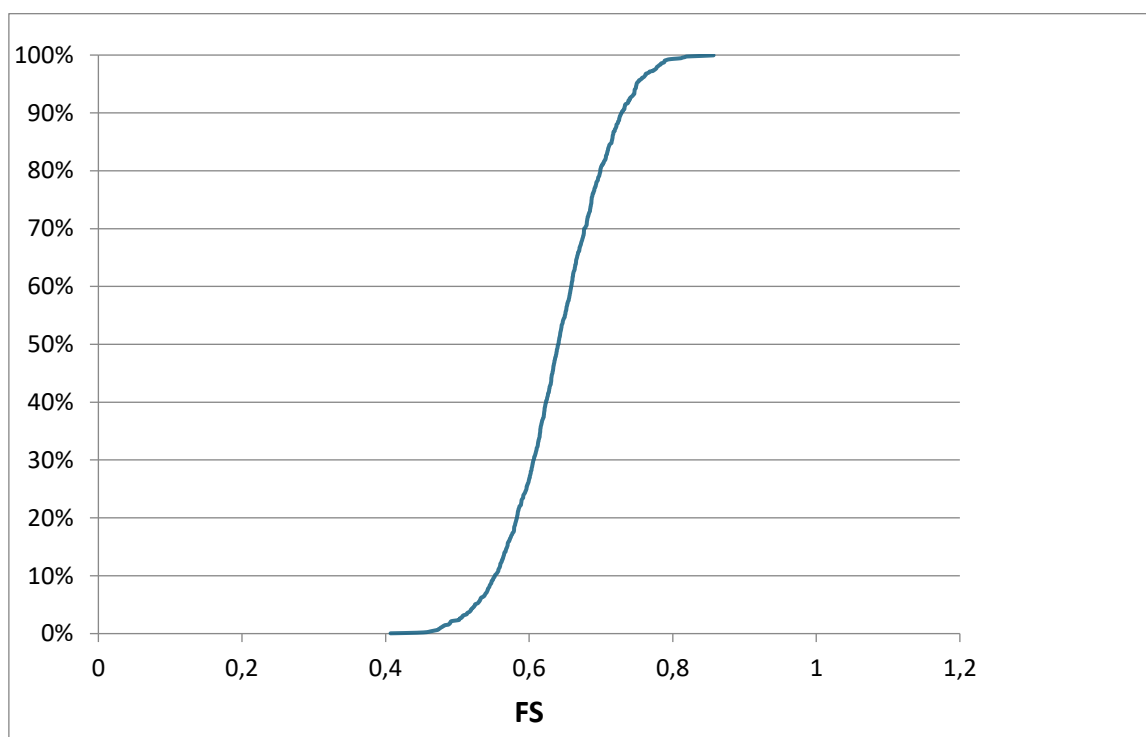
Πίνακας 4.7 Πίνακας προκυπτώντων συντελεστών ασφαλείας

c \ ϕ	15	20	25	30	35	40
20	0,25	0,40	0,51	0,63	0,81	1,36
40	0,34	0,45	0,58	0,65	0,86	1,56
60	0,36	0,47	0,61	0,68	0,94	1,74
80	0,38	0,48	0,62	0,74	1,02	1,81
100	0,40	0,51	0,63	0,78	1,08	2,04

Στη συνέχεια δημιουργείται μια κατανομή ώστε να βρεθεί τι πιθανότητα υπάρχει για να αστοχήσει το πρανές.

Για να προκύψει αυτή η κατανομή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo με την οποία παράχθηκαν τυχαία δείγματα των παραμέτρων c και ϕ με πλήθος 1000 ζεύγη δειγμάτων $\phi_{\text{ΠΕΤ}}$, $c_{\text{ΠΕΤ}}$ τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στις οριακές τιμές $\phi = 15-40$, $c = 20-100$. Με γνώμονα τις τιμές που ήδη έχουν υπολογιστεί βρέθηκαν οι Συντελεστές Ασφαλείας που αντιστοιχούν σε αυτά τα ζεύγη δειγμάτων c & ϕ .

Κατανομή Συντελεστών ασφαλείας:



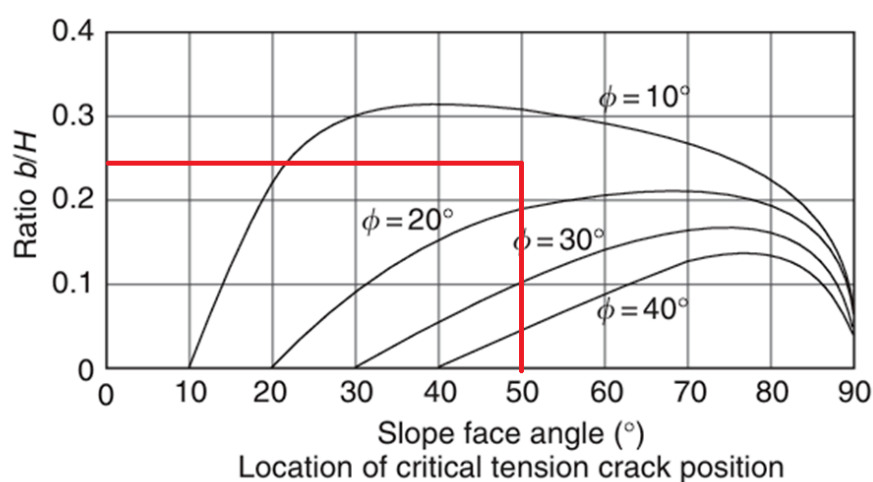
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα κατανομής συντελεστών ασφαλείας

Η πιθανότητα αστοχίας του πρανού που προκύπτει είναι 100%.

Κατόπιν βρίσκεται η οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία το οποίο εκφράζεται με το γράμμα b και υπολογίζεται από το διάγραμμα (Σχ. 4.15) που ακολουθεί.

Υπόδειγμα χρήσης Διαγράμματος

Ενδεικτικά για συνδυασμό $c = 20\text{kPa}$ & $\phi = 15^\circ$ με ύψος πρανού : $H = 350\text{m}$ και κλίση πρανού $\beta = 50^\circ$, η οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία που θα προκύψει μέσω του παρακάτω διαγράμματος θα είναι $b_1 = 87,5\text{m}$



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα για τον υπολογισμό οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία

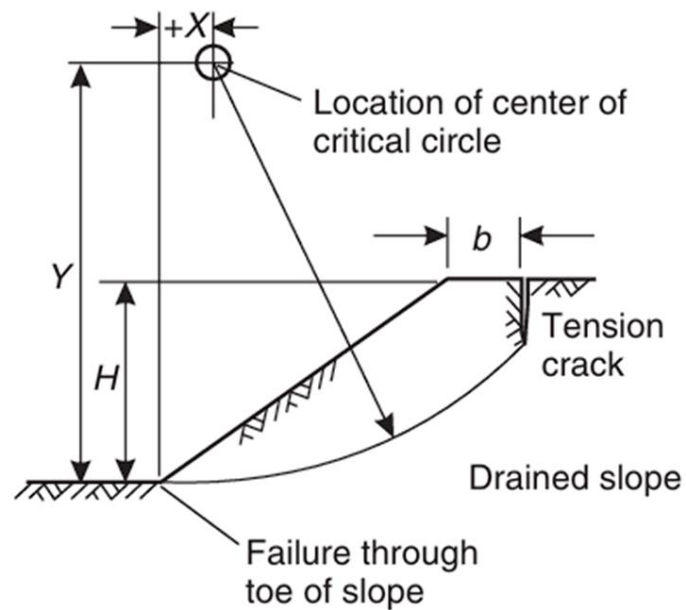
Παρατηρούμε ότι σε αυτή τη μέθοδο η συνοχή δεν έχει ρόλο στην οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία.

Για όλους τους συνδυασμούς c και ϕ , οι τιμές της οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.8 Μήκη αστοχίας για όλους τους συνδυασμούς c & ϕ

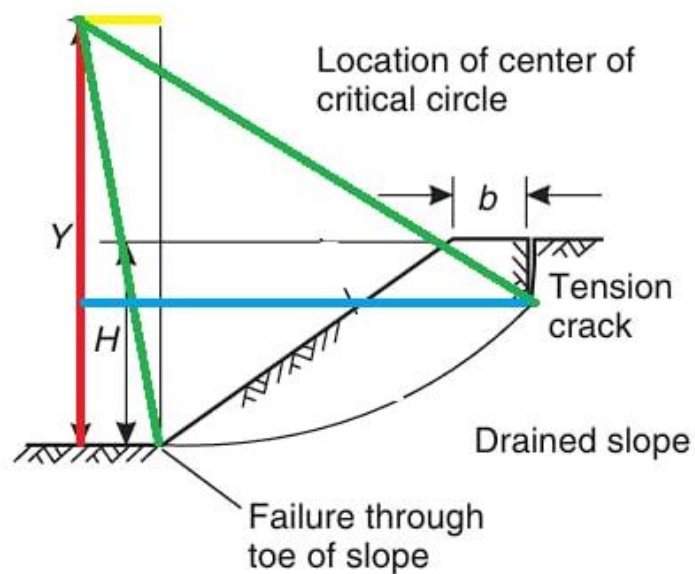
$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	87,5	66,5	49	35	24,5	
40	87,5	66,5	49	35	24,5	
60	87,5	66,5	49	35	24,5	
80	87,5	66,5	49	35		
100	87,5	66,5	49	35		

Ο μηχανισμός αστοχίας στα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας δίνεται από το παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.16):



Σχήμα 4.16 Γεωμετρία κυκλικής αστοχίας

Στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος δεύτερης αστοχίας θεωρώντας σαν ύψος το ύψος του tension crack και γωνία πρανούς 90° . Για να βρεθεί η 2^η αστοχία χρησιμοποιείται το παρακάτω σχήμα το οποίο προκύπτει ως εξής:

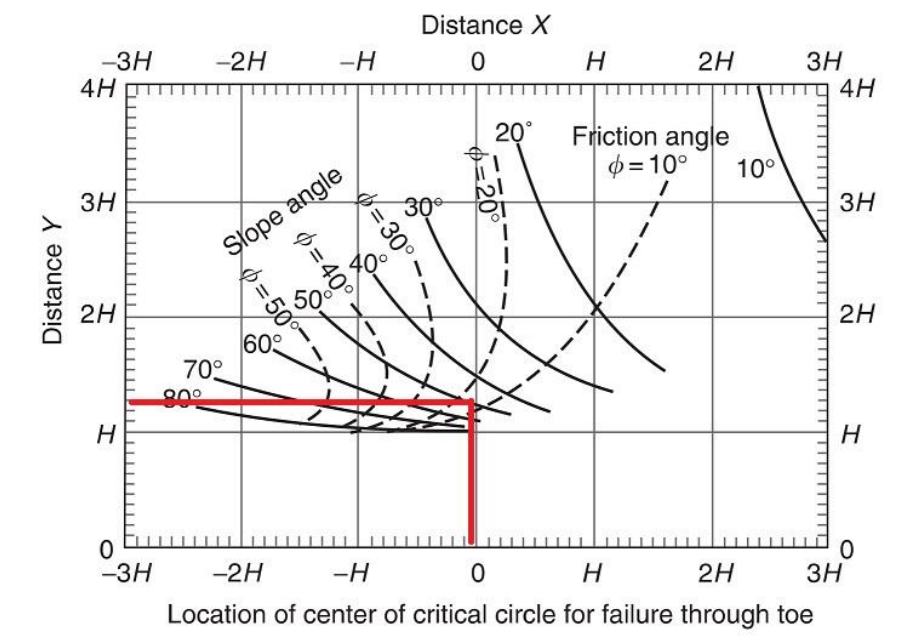


Σχήμα 4.17: Γεωμετρία κυκλικής αστοχίας

- Προσδιορίζεται το κέντρο του κρίσιμου κύκλου με αστοχία μέχρι το πόδι του πρανού με τη βοήθεια του σχετικού διαγράμματος για στραγγισμένες πλαγιές (Σχ. 4.18) βρίσκοντας τις αποστάσεις X , Y με βάση την γωνία κλίσης του πρανού $\beta=50^\circ$ και τις γωνίες τριβής ϕ .
- Φέρνεται τις ακτίνες του κύκλου οι οποίες διέρχονται από το πόδι του πρανού και από τη βάση του tension (πράσινες γραμμές) και ευθεία παράλληλη στο X η οποία διέρχεται από τη βάση του tension crack (μπλέ γραμμή)(Σχ. 4.17).

Από τα γεωμετρικά σχήματα που προκύπτουν (τα ορθογώνια τρίγωνα) και για $\beta=50^\circ$ και τις τιμές των γωνιών $\phi = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ και το διάγραμμα (Σχ. 4.3)

Υπόδειγμα χρήσης διαγράμματος



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα για την εύρεση αποστάσεων X και Y

Προκύπτουν οι εξής τιμές για X και Y :

α) Για την απόσταση X

x15	17,5
x20	52,5
x25	105
x30	157,5
x35	217

β) Για την απόσταση Y

γ15	455
γ20	462
γ25	476
γ30	507,5
γ35	556,5

Μετά τον υπολογισμό X,Y προκύπτουν οι εξής υποτείνουσες που συμπίπτουν με την ακτίνα του κύκλου αστοχίας :

r15	455,3
r20	464,9
r25	487,4
r30	531,4
r35	597,3

Βρίσκονται γεωμετρικά τα ύψη του tension crack που αντιστοιχούν στις γωνίες τριβής $\phi = 15^0, 20^0, 25^0, 30^0, 35^0$ που είναι τα εξής :

	15	20	25	30	35
h2	114,9	159,2	202,4	245,6	287,6

Συνεχίζοντας βρίσκονται οι οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία της δεύτερης αστοχίας b2, με γωνία κλίσης πρανούς 90^0 και για τις γωνίες $\phi = 15^0, 20^0, 25^0, 30^0, 35^0$ από το διάγραμμα (4.15) για στραγγισμένες πλαγιές και βρίσκονται οι παρακάτω τιμές :

	15	20	25	30	35
b2	6,9	9,2	10,1	12,3	13,8

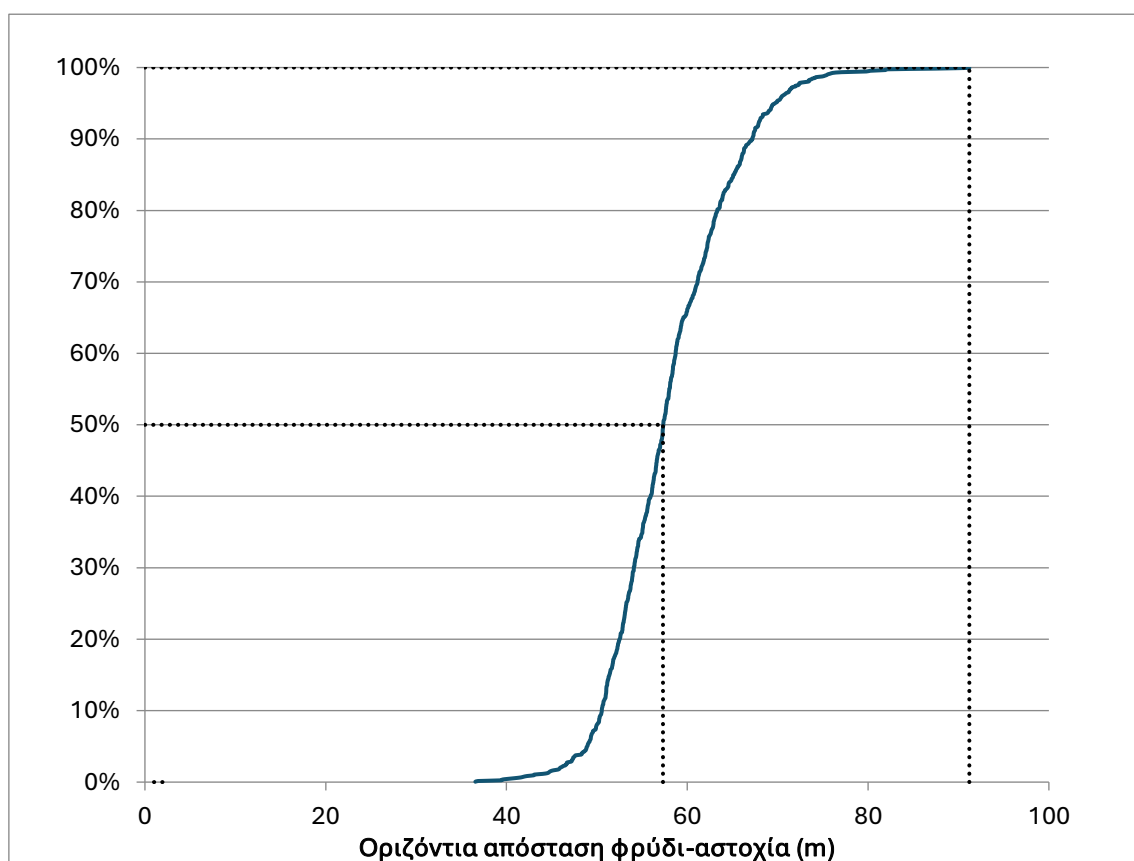
Άρα τη συνολική οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία των δυο αστοχιών (b1 & b2) :

Πίνακας 4.9 Συνολική οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχίας (1^{ης} & 2^{ης} αστοχίας)

c \ φ	15	20	25	30	35
20	94,4	75,7	59,1	47,3	38,3
40	94,4	75,7	59,1	47,3	38,3
60	94,4	75,7	59,1	47,3	38,3
80	94,4	75,7	59,1	47,3	
100	94,4	75,7	59,1	47,3	

Από τις παραπάνω συνολικές τιμές των οριζοντίων αποστάσεων φρύδι-αστοχία του πίνακα 4.9 προκύπτει η παρακάτω κατανομή που φαίνεται στο Σχ. 4.19 και αντιστοιχεί σε 1000 ζεύγη c και φ με οριακές τιμές $c = 20 \div 100$ kPa & $\phi = 15^\circ \div 40^\circ$

Κατανομή για τις οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία :



Διάγραμμα κατανομής οριζοντίων αποστάσεων φρύδι-αστοχίας

Σχήμα 4.19: Διάγραμμα κατανομής συνολικών οριζοντίων αποστάσεων φρύδι-αστοχίας

99% 91,2m
 50% 58,0m (πλέον πιθανό)

Μετά τα παραπάνω βρίσκεται ότι για τα 1000 ζεύγη c και ϕ προκύπτει ότι η μέγιστη οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχίας (99%) ανέρχεται στα 91,2m, και ο μέσος όρος (50%) στα 58,0m.

Β) Μελέτη με χρήση απλοποιημένης μεθόδου BISHOP μέσω λογισμικού HYRCAN

Για τη μελέτη σταθερότητας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HYRCAN το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο οριακής ισορροπίας για την ανάλυση σταθερότητας των πρανών και συγκεκριμένα την απλοποιημένη μέθοδο των λωρίδων του Bishop.

Τα δεδομένα, όπως προαναφέρθηκαν και στην χρήση κυκλικών διαγραμμάτων είναι:

- Βάθος πρανού : $H=350\text{m}$
- Κλίση πρανού : $\beta=50^\circ$
- Μοναδιαίο βάρος : $\gamma = 28\text{KN/m}^3$
- Στραγγισμένα πρανή

Έγινε χρήση του κριτηρίου αστοχίας Mohr - Coulomb

Επειδή το πρόγραμμα μπορεί να διαβάσει αρχεία dxf , φτιάχτηκε ένα απλό Σχ. 4.20 για $\beta=50^\circ$ και $H=350$



Σχήμα 4.20: Απλό σχήμα σε AutoCad

Χρησιμοποιήθηκαν όπως και για χρήση κυκλικών διαγραμμάτων διάφορες τιμές για την γωνία τριβής ϕ και την συνοχή c .

Συγκεκριμένα οι τιμές που επιλέχθηκαν για την γωνία τριβής ϕ είναι ίσες με 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° και για τη συνοχή είναι ίσες με 20kPa, 40kPa, 60kPa, 80kPa, 100kPa και προστέθηκαν δύο επιπλέον τιμές συνοχής c ίσες 120kPa και 140kPa σε σχέση με τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας(νομογράμματα) προκειμένου ο συντελεστής ασφαλείας να γίνει ≥ 1 .

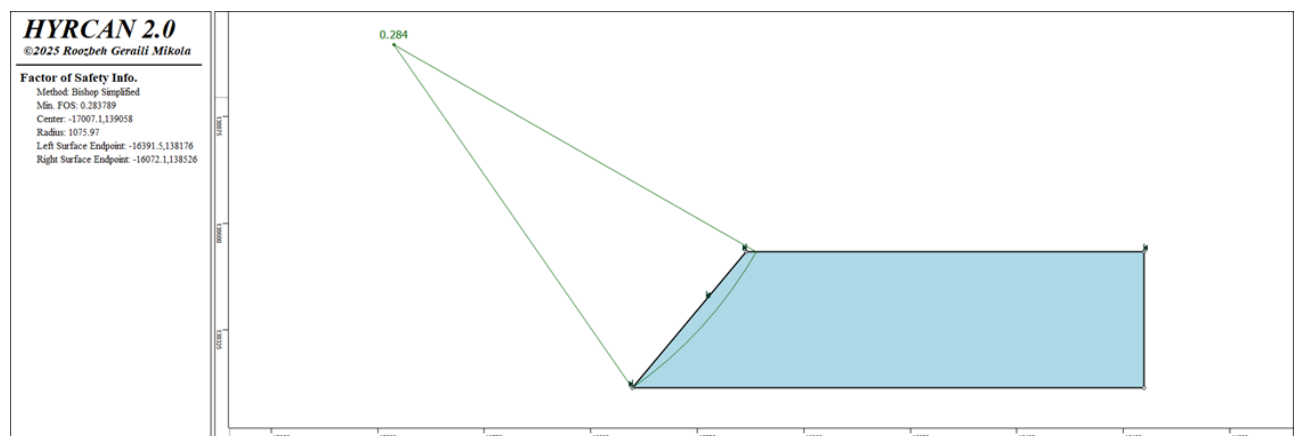
Από το συνδυασμό των παραπάνω τιμών ϕ και c με οριακές τιμές $c = 20 \div 140\text{kPa}$ & $\phi = 15^{\circ} \div 40^{\circ}$ σχηματίσθηκε ο παρακάτω πίνακας 4.10, 42 συνδυασμών

Πίνακας 4.10 Πίνακας 42 συνδυασμών c και ϕ

$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	c1 ϕ 1	c1 ϕ 2	c1 ϕ 3	c1 ϕ 4	c1 ϕ 5	c1 ϕ 6
40	c2 ϕ 1	c2 ϕ 2	c2 ϕ 3	c2 ϕ 4	c2 ϕ 5	c2 ϕ 6
60	c3 ϕ 1	c3 ϕ 2	c3 ϕ 3	c3 ϕ 4	c3 ϕ 5	c3 ϕ 6
80	c4 ϕ 1	c4 ϕ 2	c4 ϕ 3	c4 ϕ 4	c4 ϕ 5	c4 ϕ 6
100	c5 ϕ 1	c5 ϕ 2	c5 ϕ 3	c5 ϕ 4	c5 ϕ 5	c5 ϕ 6
120	c6 ϕ 1	c6 ϕ 2	c6 ϕ 3	c6 ϕ 4	c6 ϕ 5	c6 ϕ 6
140	c7 ϕ 1	c7 ϕ 2	c7 ϕ 3	c7 ϕ 4	c7 ϕ 5	c7 ϕ 6

Ενδεικτικά για τον συνδυασμό $c = 20\text{kPa}$ & $\phi = 15^{\circ}$ προέκυψε το παρακάτω Σχ. 4.16 που υπολογίζει

$$\Sigma A = 0,284$$



Σχήμα 4.21: Κυκλική αστοχία για $c = 20\text{kPa}$ & $\phi = 15^{\circ}$

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για όλους τους παραπάνω συνδυασμούς που προκύπτουν από τα ϕ και c και στη συνέχεια προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 4.11 των συντελεστών ασφαλείας που αναλογούν στα 42 ζεύγη.

Πίνακας 4.11 : Συντελεστές ασφαλείας για σύνολο c & ϕ

$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	0.284	0.372	0.467	0.565	0.672	0.794
40	0.315	0.408	0.503	0.605	0.718	0.846
60	0.344	0.436	0.535	0.641	0.754	0.882
80	0.367	0.465	0.563	0.67	0.788	0.918
100	0.39	0.488	0.592	0.698	0.817	0.95
120	0.409	0.511	0.616	0.728	0.846	0.978
140	0.429	0.533	0.639	0.753	0.875	1,006

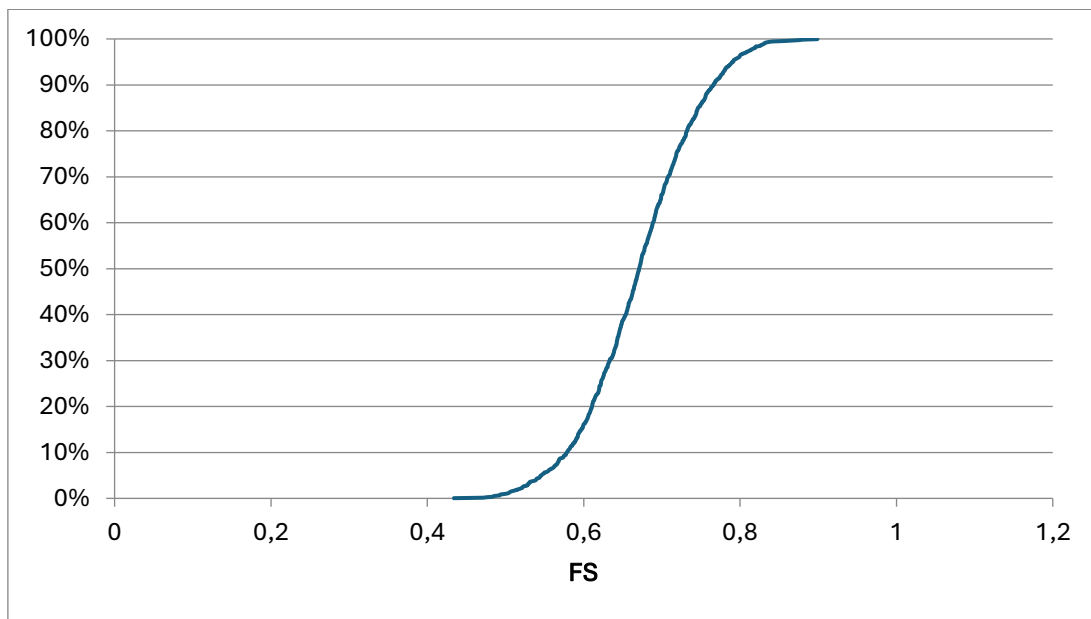
Παρατηρήθηκε ότι οι ΣΑ με $\phi=35^\circ$ και $\phi=40^\circ$ έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση με αυτών που βρέθηκαν στα διαγράμματα κυκλικής αστοχίας (νομογράμματα) αυτό ίσως οφείλεται στο ότι τα διαγράμματα κυκλικής αστοχίας (νομογράμματα) λειτουργούν οπτικά οπότε μπορεί να έγινε μια παράληψη.

Επίσης στα διαγράμματα κυκλικής αστοχίας (νομογράμματα) όταν έχουμε $\gamma > 18.9 \text{ kN/m}^3$ ο ΣΑ υπολογίζεται μεγαλύτερος οπότε και από αυτήν την άποψη βρίσκεται διαφορά. Ωστόσο στα υπόλοιπα οι τιμές είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε κατανομή ώστε να δούμε ποια πιθανότητα υπάρχει για να αστοχήσει το πρανές. Για να προκύψει αυτή η κατανομή πάρθηκαν 1000 ζεύγη c και ϕ τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στις οριακές τιμές των c , ϕ δηλ. για $c = 20 \div 140 \text{ kPa}$ & $\phi = 15^\circ \div 40^\circ$. Με γνώμονα τις τιμές των συντελεστών ασφαλείας που έχουν ήδη υπολογιστεί, βρέθηκαν οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν σε αυτά τα 1000 ζεύγη των c , ϕ .

Η κατανομή που δημιουργήθηκε φαίνεται στο διάγραμμα (4.22)

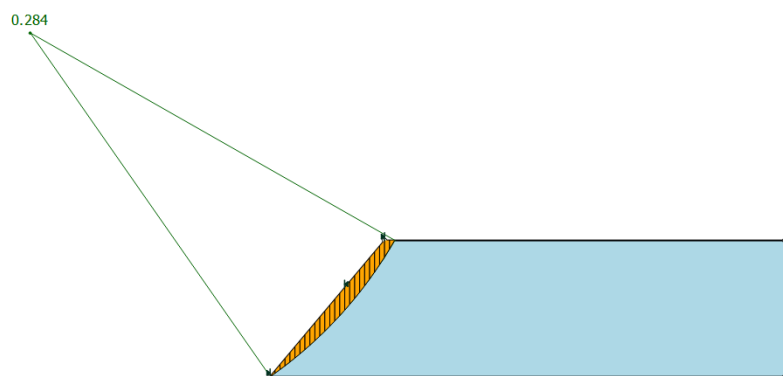
Κατανομή συντελεστών ασφαλείας



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα κατανομής συντελεστών ασφαλείας

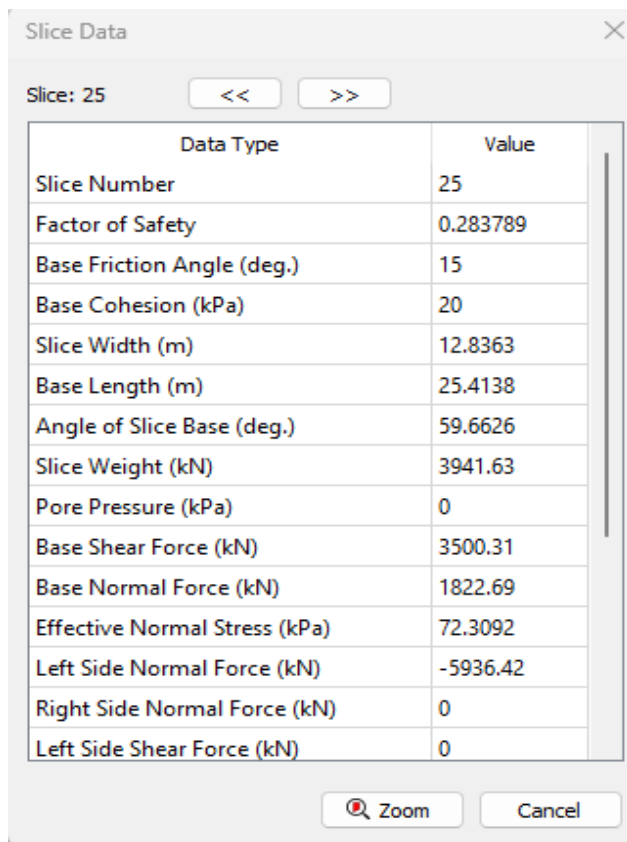
Πιθανότητα αστοχίας : 100%

Τα αποτελέσματα από την κατανομή δείχνουν ότι η πιθανότητα αστοχίας του πρανούς ανέρχεται στο 100%



Σχήμα 4.23: Χωρισμός σε λωρίδες της ολισθαίνουσας μάζας

Για τον υπολογισμό των οριζοντίων αποστάσεων φρύδι-αστοχία ανοίχθηκε το παράθυρο slice data και προστέθηκαν τα πλάτη των λωρίδων από το φρύδι και δεξιά.



Data Type	Value
Slice Number	25
Factor of Safety	0.283789
Base Friction Angle (deg.)	15
Base Cohesion (kPa)	20
Slice Width (m)	12.8363
Base Length (m)	25.4138
Angle of Slice Base (deg.)	59.6626
Slice Weight (kN)	3941.63
Pore Pressure (kPa)	0
Base Shear Force (kN)	3500.31
Base Normal Force (kN)	1822.69
Effective Normal Stress (kPa)	72.3092
Left Side Normal Force (kN)	-5936.42
Right Side Normal Force (kN)	0
Left Side Shear Force (kN)	0

Σχήμα 4.24: Παράθυρο slice data από το πρόγραμμα HYRCAN

Οι οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία της 1^{ης} αστοχίας που προκύπτουν για όλους τους συνδυασμούς c , ϕ αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 4.12 :

Πίνακας 4.12 Οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία της 1^{ης} αστοχίας για όλους τους συνδυασμούς c , ϕ

$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	25,7	25,7	0	0	0	0
40	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
60	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
80	51,3	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
100	51,3	51,3	25,7	25,7	25,7	25,7

Έπειτα τροποποιείται το Σχ. 4.20 από το AutoCAD αφαιρώντας τις οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία (25,67, 51,34) που προέκυψαν από τον παραπάνω πίνακα δημιουργώντας τα Σχ. 4.25 & Σχ. 4.26 για 2^η αστοχία :



Σχήμα 4.25: Πρανές με αφαίρεση οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία **25,6726m**



Σχήμα 4.26: Πρανές με αφαίρεση οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία **51,3452m**

Η οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία για την 2^η αστοχία που προέκυψαν από όλους τους συνδυασμούς c και ϕ αναφέρονται στον κατωτέρω πίνακα 4.13:

Πίνακας 4.13 Οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία 2^{ης} αστοχίας για συνδυασμούς c και ϕ

$c \backslash \phi$	15	20	25	30	35	40
20	25,0	25,0	0	0	0	0
40	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0
60	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0
80	25,7	25,0	25,0	25,0	25,0	0
100	51,3	25,0	25,0	25,0	25,0	0

Τέλος υπολογίσθηκαν οι συνολικές οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία που προκύπτουν από την 1^η και 2^η αστοχία και αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 4.14 :

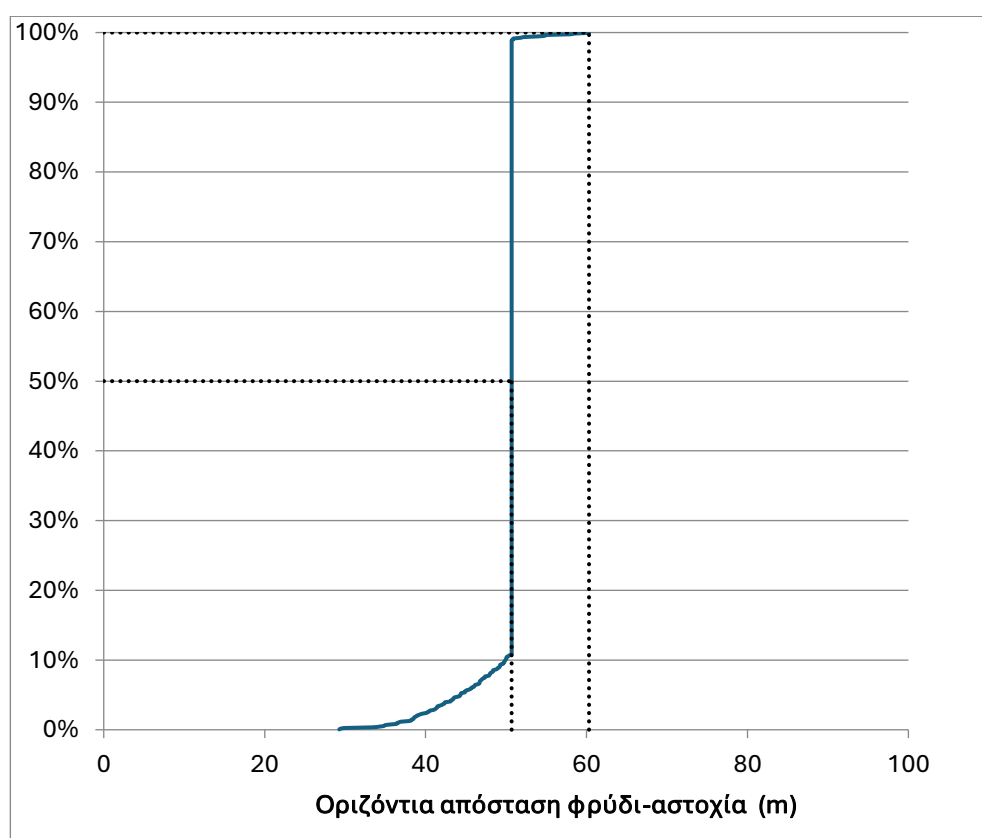
Πίνακας 4.14 Συνολικές οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία 1^{ης} και 2^{ης} αστοχίας

c \ φ	15	20	25	30	35	40
20	50,7	50,7	0	0	0	0
40	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7	25,7
60	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7	25,7
80	77	50,7	50,7	50,7	50,7	25,7
100	102,7	76,4	50,7	50,7	50,7	25,7

Τέλος γίνεται κατανομή στις τιμές των οριζόντιων αποστάσεων φρύδι-αστοχία που αντιστοιχούν στα 1000 ζεύγη C και φ με οριακές τιμές $c = 20 \div 100$ & $\phi = 15 \div 35$.

Η κατανομή που προκύπτει φαίνεται στο Σχ. 4.27

Κατανομή για τις οριζόντιες αποστάσεις φρύδι-αστοχία :



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα κατανομής οριζόντιων αποστάσεων φρύδι-αστοχία

99%	60,3m
50%	50,7m (πλέον πιθανό)

Μετά τα παραπάνω βρίσκεται ότι για τα 1000 ζεύγη c και ϕ προκύπτει ότι η μέγιστη οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία (99%) ανέρχεται στα 60,3m, και ο μέσος όρος (50%) στα 50,7m.

5ο Κεφάλαιο Συμπεράσματα-Προτάσεις

Μετά την εφαρμογή των μεθόδων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα εξής :

- Η αύξηση της συνοχής C και της γωνίας τριβής ϕ οδηγεί πάντα σε αύξηση του συντελεστή ασφαλείας.
- Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία από τη μέθοδο Bishop και ορισμένα από τα αποτελέσματα με την Ανάλυση ορίων βασισμένη στο θεώρημα άνω ορίου, διαπιστώνεται ότι , όταν η συνοχή C αυξάνεται η οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία αυξάνεται και αυτό ενώ το αντίθετο γίνεται με τη γωνία τριβής ϕ , δηλαδή όταν αυξάνεται η γωνία τριβής ϕ μειώνεται η οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία.
- Η μέθοδος της Ανάλυσης ορίων βασισμένη στο θεώρημα του άνω ορίου αν και χρήσιμη και εύχρηστη διαπιστώθηκε ότι το excel δεν είναι καλή πλατφόρμα για να εφαρμοστεί. Αυτό συμβαίνει επειδή το excel χρησιμοποιεί τοπικά ελάχιστα-μέγιστα που σημαίνει ότι η πρώτη προσέγγιση που χρησιμοποιείται πριν χρησιμοποιηθεί το solver επηρεάζει το αποτέλεσμα.
- Τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας δεν είναι εύχρηστη μέθοδος καθώς λειτουργεί οπτικά, που σημαίνει ότι όταν υπολογίζονται πολλοί ΣΑ, η μέθοδος είναι ακόμα πιο δύσχρηστη. Επίσης τα κυκλικά διαγράμματα αστοχίας ενδείκνυνται για $\gamma=18.9 \text{ kN/m}^3$. Επιπλέον το γεγονός ότι δεν συνυπολογίζεται η συνοχή C στην οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία από το κυκλικό διάγραμμα αστοχίας καθιστά τη μέθοδο μη ακριβή όσον αφορά την οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία.
- Η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων Bishop με χρήση του προγράμματος Hyrcan είναι ίσως η καλύτερη και πιο εύχρηστη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε όσον αφορά τον υπολογισμό του ΣΑ. Ωστόσο διαπιστώνεται ότι όσον αφορά την οριζόντια απόσταση φρύδι-αστοχία δεν έχει μεγάλη ακρίβεια ακόμα και όταν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες λωρίδες.
- Παρόλα αυτά στο Corta Atalaya φαίνεται ξεκάθαρα ότι η πιο ασφαλής απόσταση ενός οικισμού για 2 αστοχίες είναι κάπου ανάμεσα στα 94-102 μέτρα.

- Η κλίση διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στον συντελεστή ασφαλείας με μικρότερες κλίσεις να δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας και αντίστροφα. Το ίδιο ισχύει και στις αποστασίες επιρροής της αστοχίας, όπου μετά από την 1^η αστοχία η απόσταση της 2^{ης} είναι μικρότερη καθώς η κλίση μειώνεται. Το ίδιο με τα παραπάνω ισχύει και για το ύψος δηλαδή μεγαλύτερο ύψος δίνει μεγαλύτερη απόσταση αστοχίας και αντίστροφα.
- Η πιθανότητα αστοχίας στον Μαθιάτη είναι 21.3% και στο Corta Atalaya 100% για το φάσμα των συνοχών και των γωνιών τριβής που εξετάζουμε

Προτείνεται ότι :

Για βελτίωση των αποτελεσμάτων σε μελλοντικές ερευνητικές εργασίες θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι με μεγαλύτερη ακρίβεια στην απόσταση αστοχίας. Επίσης θα ήταν χρήσιμη και η περεταίρω εξέταση μεθόδων για την καταλληλότητα στον υπολογισμό της οριζόντιας απόστασης φρύδι-αστοχία.

Βιβλιογραφία

Chen, W.F. (1975) *“Limit Analysis and Soil Plasticity”*, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands

Duncan, J.M. (1996) **State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes.** *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 577-596.

Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) *“Rock Slope Engineering”*, Revised third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341-351..

Emmanouil Steiakakis, George Xiroudakis, Ilias Lazos, Dionysios Vavadakakis and George Bazdanis (2023) *“Stability Analysis of a Multi-Layered Slope in an Open Pit Mine”*, *Geosciences* 2023, **13**, 359

Georgios Saratsis, George Xiroudakis, George Exadaktylos, Alexandros Papaconstantinou and Ilias Lazos (2023), *“Use of UAV Images in 3D Modelling of Waste Material Stock-Piles in an Abandoned Mixed Sulphide Mine in Mathiatis—Cyprus”*, *Mining* 2023, **3**, 79–95

T. William Lambe, Robert V. Whitman (1969) *“Soil Mechanics”*, New York, Wiley

Ter-Stepanian G. (1980) *“Creep on natural slopes and cuttings”*, *Proc 3rd ISL*, New Delhi 2, pp. 95-108.

Varnes, D. (1978). *“Slope movement types and processes. Landslides: Analysis and Control”*, Transport Research Board Special Report, 176. Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (Editors). National Academy of Science, Washington D.C.

Whitman, R.V. and Bailey, W.A. (1967) *“Use of Computers for Slope Stability Analysis”*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **93**, 475-498.

Wyllie & Mah. (2005). *"Rock Slope Engineering"*, Spon Press, New York.

Zaruba, Q. and Mencil, V. (1982). "Landslides and their control", Developments in Geotechnical Engineering 31. Elsevier Scientific Publ. Co.

ZeRun Tian , YanHong Zhang et al. (2023) *"An Improved Approach of Classical Upper Bound Theory for Stability Analysis of Layered Slopes"*, Advances in Civil Engineering, WILEY Online Library, 10.1155/2023/4286038

Καλλέργης Γ. και Κούκης Γ. (1985). *"Τεχνική Γεωλογία"*, ΟΕΔΒ, Αθήνα.

Καροτσιέρης Ζ. (1993). *"Στοιχεία μηχανικής πετρωμάτων και γεωτρήσεων"*. Εδαφομηχανική – Βραχομηχανική – Γεωτρήσεις. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Γεωλογικό Τμήμα. Τομέας Δυναμικής – Τεκτονικής – Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Λουπασάκης Κ. (2014). *"Εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων"*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις ΕΜΠ

Λογισμικό HYRCAN . Developer : Roozbeh Geraili Mikola, *"Geowizard.org"*.

Μονόπωλης, Δ. (1995). *"Εφαρμοσμένη Γεωλογία"*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά

Ξηρουδάκης Γ.- Εξαδάκτυλος Γ. (2021). *"Γεωτεχνική Μηχανική-Κατασκευές Σηράγγων-Διάλεξη 1"*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης

Στειακάκης, Ε. (2019). *"Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής"*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις Πολυτεχνείο Κρήτης.

Χρηστίδης Γ. (2015). *"Κοιτασματολογία"*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης

Παπακωνσταντίνου Α. (2022). *“Διπλωματική «Σχεδιασμός Επιφανειακής Εκμετάλλευσης Ούμπρας και Ανάκτησης Στείρων στον Μαθιάτη της Κύπρου»”, Σχολή ΜΗΧΟΠ, Πολυτεχνείο Κρήτης.*