



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**«ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΑΡΑΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ ΜΕ ΚΕΝΑ
ΜΕΤΩΠΑ»**

Διπλωματική Εργασία

Ανδρέας Δελέντας

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**«ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΑΡΑΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ ΜΕ ΚΕΝΑ ΜΕΤΩΠΑ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Ανδρέα Δελέντα

**Επιβλέπων : Ανδρέας Μπενάρδος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την Τριμελή Επιτροπή στις : /..... /

Υπογραφές

Ιωάννης Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ανδρέας Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Νομικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αθήνα, 2020

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας το ταξίδι των προπτυχιακών μου σπουδών νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν και συνέβαλαν στην εξέλιξή μου ως σπουδαστή αλλά και ως άνθρωπο.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές και το προσωπικό της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών για την εξαιρετική δουλειά, την οποία έπραξαν κατά την διδασκαλία των μαθημάτων. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής και επιβλέποντα καθηγητή για την διπλωματική μου εργασία, για την ανάθεση του θέματος της εργασίας, αλλά και για τον χρόνο που διέθεσε για την επίβλεψη της προόδου αυτής, τις ιδιαίτερες καθοδηγητικές συμβουλές προς την εξέλιξή της και την τελική μελέτη και διόρθωσή της. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Παύλο Νομικό, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής, για τον χρόνο που διέθεσε και τις σημαντικές γνώσεις και συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια διενέργειας των αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες συνέβαλαν στην διαρκή εξέλιξη των μοντέλων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κύριο Γεώργιο Παπαντωνόπουλο, ο οποίος ανήκει στο Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό της σχολής, για την σημαντική συμβολή του σε ζητήματα τεχνικής υποστήριξης.

Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ εκ νέου τους κυρίους Ανδρέα Μπενάρδο, Παύλο Νομικό αλλά και τον κύριο Ιωάννη Ζευγώλη, Επίκουρο καθηγητή της σχολής, οι οποίοι δέχτηκαν να πλαισιώσουν την τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την τεράστια αγάπη και στήριξη που μου έχουν δώσει όλα αυτά τα χρόνια και κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση του φαινομένου των προσμίξεων σε ένα χρήσιμο εξορυχθέν πέτρωμα σε περιπτώσεις υπογείων εκμεταλλεύσεων με κενά μέτωπα. Στην προσπάθεια αυτή αναλύονται και ζητήματα που σχετίζονται με την ευστάθεια των μετώπων εξόρυξης, ενώ ακολουθεί η βασική προσέγγιση της εργασίας που είναι η συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού πρόσμιξης με βασικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε εξεταζόμενης επιφάνειας.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρατίθεται πληθώρα πληροφοριών σχετιζόμενες με τις προσμίξεις, τον τρόπο υπολογισμού τους και των πηγών προέλευσής τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα και σκιαγραφείται η βασική μεθοδολογία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού ενός τέτοιου εξορυκτικού χώρου. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση των εμπειρικών προσεγγίσεων πρόβλεψης της ευστάθειας επιφανειών μετώπων εξόρυξης και του τρόπου υπολογισμού των δεικτών ευστάθειας. Από αυτές τις προσεγγίσεις κατά το κομμάτι των αναλύσεων που διενεργείται γίνεται χρήση τριών πολύ βασικών γραφημάτων, που είναι το Modified Stability Graph κατά Potvin (1988), το Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001) και το Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015).

Οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία περιλαμβάνουν εκτός των προαναφερθέντων εμπειρικών μοντέλων και αριθμητικές αναλύσεις με την χρήση του λογισμικού RS2 της Rocscience, το οποίο βασίζεται σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Κάνοντας χρήση των συγκεκριμένων εργαλείων εξετάστηκε ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα κρίνονται ως ικανοποιητικά, χωρίς βέβαια να λείπουν και περιπτώσεις απόκλισης των αποτελεσμάτων από τα αναμενόμενα.

Τέλος, μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν εξισώσεις υπολογισμού των προσμίξεων ανά εξεταζόμενη επιφάνεια μετώπου και ένα εμπειρικό διάγραμμα ευστάθειας μέσα από το οποίο προσδιορίζεται το αναμενόμενο εύρος ποσοστού αραίωσης του μεταλλεύματος ανά εξεταζόμενη περίπτωση.

Abstract

The present diploma thesis deals with the analysis of the phenomenon of dilution of an exploitable rock in underground mining cases with open stopes. In addition, issues related to the stability of stopes are analyzed, while the basic approach of the thesis is followed, which is the correlation between the percentage of impurity with key characteristics of area under consideration.

The first part of the paper presents a wealth of information related to impurities, how they are calculated and their sources. Also, reference is made to the basic characteristics of the underground mining methods with open stopes and the basic methodology for optimizing the design of such an extractive region is outlined. Furthermore, an extensive analysis of empirical approaches to predicting the stability of stopes' surfaces and the methodology to calculate stability indicators is carried out. From these approaches three basic and very useful graphs are used in the part of the analysis that is performed, which are the Modified Stability Graph by Potvin (1988), the Extended Mathews' Stability Graph by Mawdesley et al (2001) and the Dilution-based Stability Graph by Papaioanou and Suorineni (2015).

In addition to the empirical models mentioned above, the practical part of this thesis also include numerical analyzes using Rocscience RS2 software that is based on finite element code. With the use of these tools a significant number of simulation models were tested. In general, the results are judged as satisfactory, without missing cases of deviation from the expected results.

Finally the results' processing led to create equations for calculating the percentage of dilution per examined stope's surface and also an empirical Dilution-based Stability Graph.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	21
1.1 Ανάλυση σημαντικότητας μελέτης του φαινομένου των προσμίξεων	21
Κεφάλαιο 2 ^ο : Φαινόμενο προσμίξεων – αραίωσης μεταλλεύματος	22
2.1 Ορισμός πρόσμιξης.....	22
2.2 Κατηγοριοποίηση προσμίξεων	22
2.2.1 Εσωτερική αραίωση.....	23
2.2.2 Εξωτερική αραίωση	24
2.2.3 Απώλεια μεταλλεύματος	25
2.2.4 Αραίωση του Murphy (Murphy's Dilution)	27
2.3 Επιπτώσεις της αραίωσης στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις.....	27
2.3.1 Εισαγωγή.....	27
2.3.2 Οικονομικές επιπτώσεις.....	27
2.3.3 Λοιπές επιπτώσεις.....	28
2.4 Ανάλυση του φαινομένου των προσμίξεων στην μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα (Sublevel Open Stoping).....	29
2.4.1 Εισαγωγή	29
2.4.2 Βασικά στοιχεία μεθόδου	29
2.4.2 Ανάλυση Προσμίξεων.....	31
2.4.2.1 Εισαγωγή.....	31
2.4.2.2 Εσωτερική αραίωση.....	32
2.4.2.3 Εξωτερική αραίωση	33
2.4.2.4 Απώλεια μεταλλεύματος	33
2.4.3 Παράγοντες προσμίξεων και απώλειας μεταλλεύματος.....	34
2.4.3.1 Εισαγωγή.....	34
2.4.3.2 Σχεδιαστικοί παράγοντες.....	35
2.4.3.3 Γεωλογικοί – Γεωτεχνικοί παράγοντες.....	35
2.4.3.4 Διάτρηση - Ανατίναξη	36
2.4.3.5 Παράγοντες οφειλόμενοι στο ανθρώπινο λάθος.....	37
2.5 Τρόποι υπολογισμού των προσμίξεων	38
2.6 ELOS	40
2.6.1 Βασικά στοιχεία	40
2.6.2 Ποσοτικοποίηση των προσμίξεων μέσω ανάλυσης της υπέρθραυσης.....	41
2.7 Ανίχνευση προσμίξεων – Έλεγχος απόληψης.....	43

2.8 Επίδοση μετώπου εξόρυξης	47
2.9 Τεχνικές Back Analysis της επίδοσης ανοικτών μετώπου	49
2.9.1 Εισαγωγή	49
2.9.2 Παράδειγμα Εφαρμοζόμενης Μεθοδολογίας	49
2.9.3 Διάγραμμα διεργασιών back analysis της επίδοσης του μετώπου εξόρυξης ...	50
2.9.4 Εφαρμογή των τεχνικών της back analysis.....	51
2.10 Έλεγχος και προεξέταση των προσμίξεων πριν την εκμετάλλευση	51
2.11 Περιορισμός του φαινομένου των προσμίξεων	55
2.12 Ανάλυση οικονομικών επιπτώσεων αραίωσης μεταλλεύματος.....	57
2.13 Βελτιστοποίηση ανοικτού μετώπου εξόρυξης.....	61
2.13.1 Βέλτιστος προγραμματισμός μεταλλείου	61
2.13.2 Βελτιστοποίηση μετώπου εξόρυξης	62
2.13.2.1 Εισαγωγή.....	62
2.13.2.2 Βήματα διαδικασίας βελτιστοποίησης	62
2.13.2.3 Τυπικές κατηγορίες χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων.....	65
Κεφάλαιο 3 ^ο : Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης ευστάθειας	66
3.1 Εισαγωγή.....	66
3.2 Μέθοδος Stability Graph	67
3.2.1 Εισαγωγή.....	67
3.2.2 Παρουσίαση συμβατικού διαγράμματος Stability Graph	68
3.2.3 Δείκτης ευστάθειας N.....	70
3.2.3.1 Τροποποιημένος δείκτης ποιότητας βραχόμαζας (Q')	70
3.2.3.1.1 Δείκτης κερματισμού βραχόμαζας (RQD).....	71
3.2.3.1.2 Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (Jn).....	71
3.2.3.1.3 Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (Jr).....	72
3.2.3.1.4 Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (Ja)	73
3.2.3.2 Συντελεστής τασικού πεδίου (A).....	75
3.2.3.3 Συντελεστής προσανατολισμού ασυνεχειών (B)	76
3.2.3.4 Συντελεστής διόρθωσης αστοχίας λόγω βαρύτητας (C).....	77
3.2.4 Υδραυλική ακτίνα (HR).....	78
3.2.5 Τροποποιήσεις της μεθόδου ευστάθειας μετώπου.....	79
3.2.5.1 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Potvin (1988).....	79
3.2.5.2 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Stewart and Forsyth (1995)	
.....	84

3.2.5.3 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Nickson (1992).....	85
3.3 Μέθοδος Extended Stability Graph.....	86
3.4 Περιορισμοί εμπειρικών μεθόδων ευστάθειας - Stability Graph και επιπρόσθετοι παράγοντες επίδρασης στην ευστάθεια μετώπου	89
3.4.1 Περιορισμοί μεθόδου Stability Graph.....	89
3.4.2 Επιπλέον παράγοντες επίδρασης στην ευστάθεια μετώπου.....	91
3.4.2.1 Εισαγωγή.....	91
3.4.2.2 Παράγοντας ρηγμάτων (F).....	91
3.4.2.3 Χρονικές επιδράσεις.....	92
3.4.2.4 Επιδράσεις ανατινάξεων.....	94
3.5 Κατηγορίες Stability Graph βασισμένες στην αραίωση του μεταλλεύματος και την υπέρθραυση του εξορυκτικού χώρου.....	95
3.5.1 Μέθοδος Stability Graph βασισμένη στο φαινόμενη της αραίωσης.....	95
3.5.1.1 Εισαγωγή.....	95
3.5.1.2 Αρχική προσέγγιση κατά Pakalnis (1986,1993).....	95
3.5.1.3 Προσέγγιση dilution-based Stability Graph κατά Pakalnis, Poulin, & Hadjigeorgiou (1995).....	98
3.5.1.4 Προσέγγιση Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou & Suorineni (2015).....	99
3.5.2 Μέθοδος ELOS Stability Graph.....	100
3.5.2.1 Διαγράμματα συσχέτισης ELOS και σχεδιαστικών παραμέτρων.....	100
3.5.2.2 Παρουσίαση ELOS Stability Graph.....	102
Κεφάλαιο 4^ο : Παρουσίαση αριθμητικών αναλύσεων – Ανάλυση παραδοχών και τιμών παραμέτρων.....	105
4.1 Εισαγωγή.....	105
4.2 Παραδοχές.....	105
4.2.1 Βασικές παραδοχές.....	105
4.2.2 Παραδοχές τιμών παραμέτρων.....	108
4.2.2.1 Εξεταζόμενες γεωμετρίες μετώπων εξόρυξης.....	108
4.2.2.1.1 Εισαγωγή.....	108
4.2.2.1.2 Πρώτος τύπος μετώπου εξόρυξης.....	110
4.2.2.1.3 Δεύτερος τύπος μετώπου εξόρυξης.....	112
4.2.2.2 Εξεταζόμενα υλικά.....	113
4.2.2.2.1 Εισαγωγή.....	113
4.2.2.2.2 Υλικό 1 – Γνεύσιος.....	114

4.2.2.2.3 Υλικό 2 – Μάρμαρο	116
4.2.2.2.3.1 Υλικό 2 – Μάρμαρο (χωρίς υλικό πλήρωσης ασυνεχειών).....	116
4.2.2.2.3.2 Υλικό 2 – Μάρμαρο (με ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης ασυνεχειών)	117
4.2.2.2.3.2 Υλικό 2 – Μάρμαρο (με αργιλικό υλικό πλήρωσης ασυνεχειών)...	117
4.2.2.3 Υλικά πλήρωσης.....	118
4.2.2.3.1 Εισαγωγή.....	118
4.2.2.3.2 Υλικό 1 – Ασβεστιτικό	118
4.2.2.3.3 Υλικό 2 - Αργιλικό	119
4.2.2.4 Ασυνέχειες	119
4.2.2.4.1 Απόσταση ασυνεχειών	119
4.2.2.4.2 Εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών	120
4.2.2.4.3 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών ανά περίπτωση.....	121
4.2.2.4.4 Αριθμός οικογενειών ασυνεχειών	124
4.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας παραδοχών παραμέτρων	126
4.3 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης.....	126
4.3.1 Εισαγωγή.....	126
4.3.2 Πρώτος (1 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης.....	126
4.3.3 Δεύτερος (2 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης.....	127
4.3.4 Τρίτος (3 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης.....	127
4.3.5 Τέταρτος (4 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης	128
4.3.6 Πέμπτος (5 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης.....	128
4.3.7 Έκτος (6 ^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης.....	129
4.3.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αντιστοίχισης παραμέτρων στους κύκλους αναλύσεων	131
Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	133
5.1 Εισαγωγή.....	133
5.1.1 Γενικά	133
5.1.2 Μεθοδολογία υπολογισμού υπέρθραυσης – Μεθοδολογία υπολογισμού συντελεστή A.....	135
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 1 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	137
5.2.1 Εισαγωγή.....	137
5.2.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	138
5.2.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	138

5.2.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	138
5.2.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	139
5.2.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	139
5.2.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	139
5.2.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	141
5.2.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	143
5.2.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	143
5.2.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	143
5.2.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	143
5.2.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	143
5.2.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	144
5.2.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	144
5.2.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	145
5.2.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	147
5.2.4 Κατηγορία 3 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	148
5.2.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	148
5.2.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	148
5.2.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	148
5.2.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	149
5.2.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	149
5.2.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	150
5.2.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	152
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 2 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	152
5.3.1 Εισαγωγή.....	152
5.3.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	153
5.3.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	153
5.3.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	153
5.3.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	154
5.3.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	154
5.3.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	154
5.3.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	155

5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	156
5.3.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	156
5.3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	156
5.3.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	156
5.3.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	157
5.3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	157
5.3.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	157
5.3.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	158
5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	159
5.3.4 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	159
5.3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	159
5.3.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	159
5.3.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	160
5.3.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	160
5.3.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	160
5.3.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	161
5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	162
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 3 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	162
5.4.1 Εισαγωγή.....	162
5.4.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	162
5.4.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	162
5.4.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	162
5.4.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	163
5.4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	163
5.4.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	163
5.4.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	164
5.4.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	167
5.4.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	167
5.4.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	167
5.4.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	167
5.4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	168

5.4.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	168
5.4.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	169
5.4.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	172
5.4.4 Κατηγορία 3 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	172
5.4.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	172
5.4.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	172
5.4.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	173
5.4.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	173
5.4.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	174
5.4.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	177
5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 4 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	177
5.5.1 Εισαγωγή	177
5.5.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	178
5.5.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	178
5.5.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	178
5.5.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	178
5.5.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	179
5.5.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	179
5.5.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	179
5.5.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	181
5.5.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	181
5.5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	181
5.5.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	181
5.5.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	182
5.5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	182
5.5.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	182
5.5.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	183
5.5.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	184
5.5.4 Κατηγορία 3 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	185
5.5.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	185
5.5.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	185

5.5.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	185
5.5.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	186
5.5.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	186
5.5.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	187
5.5.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	188
5.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 5 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	188
5.6.1 Εισαγωγή.....	188
5.6.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	189
5.6.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	189
5.6.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	189
5.6.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	189
5.6.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	190
5.6.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	190
5.6.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	190
5.6.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	192
5.6.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	192
5.6.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	192
5.6.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	192
5.6.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	193
5.6.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	193
5.6.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	193
5.6.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	194
5.6.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	195
5.6.4 Κατηγορία 3 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	196
5.6.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	196
5.6.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	196
5.6.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	196
5.6.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs.....	197
5.6.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N').....	197
5.6.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	197
5.6.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	201

5.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 6 ^{ου} κύκλου αναλύσεων	201
5.7.1 Εισαγωγή	201
5.7.2 Κατηγορία 1 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°	201
5.7.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	201
5.7.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών	201
5.7.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	202
5.7.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	202
5.7.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	202
5.7.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	203
5.7.2.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	204
5.7.3 Κατηγορία 2 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°	204
5.7.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	204
5.7.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών	204
5.7.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	205
5.7.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	205
5.7.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	205
5.7.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	206
5.7.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	207
5.7.4 Κατηγορία 3 ^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°	208
5.7.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	208
5.7.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών	208
5.7.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	208
5.7.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs	209
5.7.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')	209
5.7.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας	210
5.7.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	211
5.8 Εκτίμηση συνολικής ευστάθειας μετώπων εξόρυξης	211
5.9 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	214
Κεφάλαιο 6 ^ο : Σχολιασμός αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις	217
6.1 Εισαγωγή	217
6.2 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Στέψη (Crown)	219

6.2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων	219
6.2.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα.....	220
6.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις.....	220
6.3 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Αριστερή παρειά (Left Sidewall)	225
6.3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων	225
6.3.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα.....	226
6.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις.....	226
6.4 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Δεξιά παρειά (Right Sidewall)	230
6.4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων	230
6.4.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα.....	231
6.4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις.....	231
6.5 Σύγκριση εξισώσεων υπολογισμού ποσοστών πρόσμιξης	234
6.6 Εμπειρική προσέγγιση Dilution-based Stability Graph.....	235
Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα.....	238
7.1 Ανακεφαλαίωση.....	238
7.2 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις.....	238
Βιβλιογραφία.....	242
Ξένη βιβλιογραφία.....	242
Ελληνική βιβλιογραφία.....	246

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

1.1 Ανάλυση σημαντικότητας μελέτης του φαινομένου των προσμίξεων

Η μελέτη του φαινομένου των προσμίξεων και η ποσοτικοποίηση αυτών κρίνεται ως ιδιαίτερα σημανσίας όσον αφορά την οικονομική εφικτότητα της υλοποίησης ενός μεταλλευτικού έργου. Οι προσμίξεις στείρου ή χαμηλής ποιότητας υλικού στην μάζα του εξορυσσόμενου μεταλλεύματος αν και αυξάνει την συνολική απόληψη, έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της τελικής ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος (Τερζόπουλος, 2003). Το γεγονός αυτό οδηγεί επιπλέον στην αύξηση του κόστους επεξεργασίας του υλικού και κατ' επέκταση συνολικά της εκμετάλλευσης. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε μεταλλευτικό έργο προκαθορίζονται ορισμένα αποδεκτά ποσοστά αραίωσης του μεταλλεύματος, πέραν των οποίων η συνέχιση της εξορυκτικής διαδικασίας κρίνεται ασύμφορη (Τουλίκας, 2019). Συνεπώς, κατ' αυτό το τρόπο ορίζεται και ο χρόνος ζωής ενός έργου, ο οποίος αντιστοιχεί και στον χρόνο επίτευξης του μέγιστου ποσοστού προσμίξεων στο εξορυσσόμενο υλικό.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αξίζει να δοθεί ο ορισμός της οριακής περιεκτικότητας, πέραν της οποίας κρίνεται η εκμετάλλευση ως ασύμφορη.

Ως οριακή περιεκτικότητα ορίζεται η ελάχιστη περιεκτικότητα του κοιτάσματος σε χρήσιμο συστατικό, για την οποία υπό δεδομένες συνθήκες, οι οποίες αφορούν το κόστος εκμετάλλευσης και επεξεργασίας και την τιμή πώλησης του υλικού, η εκμετάλλευση του κοιτάσματος κρίνεται ως οικονομικά συμφέρουσα (Μενεγάκη, 2010). Η οριακή περιεκτικότητα σύμφωνα και με τα παραπάνω εκφράζει την περιεκτικότητα ανά τόνο μεταλλεύματος στην οποία εξισώνονται τα κόστη εκμετάλλευσης, επεξεργασίας και διάθεσης του τελικού προϊόντος με τα έσοδα από την πώληση αυτού. Είναι κατανοητό ότι η παράμετρος αυτή χαρακτηρίζεται ως δυναμική, καθώς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του μεταλλεύματος και του κόστους που απαιτείται για την εξόρυξη του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω για δεδομένες συνθήκες, όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό των προσμίξεων στο εξορυσσόμενο μέταλλευμα, τόσο η συνολική περιεκτικότητα του παραγόμενου προϊόντος προσεγγίζει την οριακή.

Επομένως, σύμφωνα με τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτή η υψηλή σημαντικότητα της μελέτης και του προσδιορισμού του ποσοστού των προσμίξεων στο παραγόμενο υλικό.

Κεφάλαιο 2^ο : Φαινόμενο προσμίξεων – αραίωσης μεταλλεύματος

2.1 Ορισμός πρόσμιξης

Πρόσμιξη ή αραίωση μεταλλεύματος χαρακτηρίζεται η παρεμβολή σε αυτό στείρου ή υλικού με χαμηλή περιεκτικότητα σε χρήσιμα συστατικά (Villaescusa, 1998). Ακόμη σε περίπτωση που η μέθοδος εκμετάλλευσης είναι κάποια εκ των λιθογομούμενων μετώπων, ως πρόσμιξη θα μπορούσε να θεωρηθεί και η ανεπιθύμητη πρόσληψη, μαζί με το χρήσιμο – μέταλλευμα, μίας ποσότητας από το υλικό της λιθογόμωσης. Αποτέλεσμα της αραίωσης του μεταλλεύματος αποτελεί η μείωση της περιεκτικότητας του παραγόμενου προϊόντος σε χρήσιμο συστατικό και κατ' επέκταση η μείωση της αξίας του. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε όλες τις μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης, με τα τυπικά ποσοστιαία όρια εμφανιζόμενης πρόσμιξης ανά κατηγορία μεθόδου να παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης και ποσοστά προσμίξεων (Μπενάρδος, 2014)

Μέθοδος Εκμετάλλευσης	Συντελεστής Αραίωσης
Κενά μέτωπα - Open stopes method	5-15%
Κατακρήμνιση οροφής - Caving method	10-20%
Με λιθογόμωση - Filling method	<5%

Παρακάτω παρατίθεται ένας ακόμη πίνακας (Εικόνα 2.1), ο οποίος παρουσιάζει αναλυτικότερα το ποσοστό των προσμίξεων αλλά και την απώλεια μεταλλεύματος ανά μέθοδο εκμετάλλευσης. Για κάθε μία από τις περιπτώσεις αποδίδονται τρία διαφορετικά προσεγγιστικά διαστήματα, σύμφωνα με τρεις διαφορετικές μελέτες.

Mining Method	Rock Dilution (%)			Ore Losses (%)		
	Ingler	Wright	Arioglu	Ingler	Wright	Arioglu
Stoping	5-30	5-10	10-15	5-15	3-5	5-10
Room and Pillar	0-10	-	15-35	5-30	-	10-15
Cut and Fill	5-10	15-30	3-7	5-10	5-7	5-10
Shrinkage	-	10-15	10-15	-	5-7	10-15
Sublevel Caving	10-30	10-15	10-20	10-30	12-15	10-20
Block Caving	10-30	15-20	10-20	0-30	15-20	13-15

Εικόνα 2.1: Ποσοστά αραίωσης και απώλειας μεταλλεύματος ανά μέθοδο εξόρυξης (Ingler, 1984; Wright, 1983; Arioglu, 1994)

2.2 Κατηγοριοποίηση προσμίξεων

Η αραίωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί βασικώς σε τρεις γενικότερους τύπους, οι οποίοι είναι:

- Εσωτερική αραίωση ή Προγραμματισμένη αραίωση ή Πρωτεύουσα αραίωση

- Εξωτερική αραίωση ή Μη προγραμματισμένη αραίωση ή Δευτερογενής αραίωση
- Απώλεια μεταλλεύματος (Προγραμματισμένη και μη προγραμματισμένη)

Οι παραπάνω κατηγορίες τείνουν να επηρεάσουν τον βαθμό μεταλλοφορίας, ιδίως σε περιπτώσεις όπου διενεργείται κάποια μέθοδος εκμετάλλευσης μαζικής παραγωγής (bulk mining) (Suglo & Orok, 2012). Ανάλογα με τη μέθοδο εκμετάλλευσης που χρησιμοποιείται εντοπίζεται και διαφορετικός κυρίαρχος τύπος αραίωσης. Παραδείγματος χάριν, στην μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κατακρημνιζόμενα μέτωπα η κύρια πρόσμιξη που καταγράφεται είναι εξωτερική καθώς μετά την αποκομιδή του μεταλλεύματος γίνεται πλήρωση του κενού χώρου με τα υπερκείμενα του ορόφου, στείρα υλικά. Αντίθετα, στην μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα αναμένεται να είναι εντονότερη η εσωτερική αραίωση, καθώς επιθυμείται, όπως συνάδεται και από την ανάλυση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες, ο περιορισμός των εξωτερικών προσμίξεων.

2.2.1 Εσωτερική αραίωση

Εσωτερική αραίωση χαρακτηρίζεται το χαμηλής ποιότητας υλικό, το οποίο έχει εγκλωβιστεί εντός της μάζας του μεταλλεύματος (Jang, 2014). Αυτή μπορεί να προκληθεί από την ανεπαρκή εσωτερική οριοθέτηση των παρεμβολών στείρου υλικού εντός της μάζας του πετρώματος, αλλά και σε καταστάσεις όπου η μέθοδος εξόρυξης απαιτεί ένα ελάχιστο πλάτος εκσκαφής. (Villaescusa, 1998). Η αραίωση αυτή είναι αναμενόμενη και δεν προκύπτει από τυχόν λάθη κατά τις εξορυκτικές διαδικασίες.

Όπως είναι λογικό αυτός ο τύπος αραίωσης είναι δύσκολο έως αδύνατο να αποφευχθεί (Harratz, 2019). Ο βαθμός εσωτερικής αραίωσης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τα διαφορετικά λιθολογικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος. Ως ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλλει έμμεσα στην αύξηση ή μείωση του βαθμού της εσωτερικής αραίωσης είναι η τιμή της οριακής περιεκτικότητας.

Επιπροσθέτως, αυτή η κατηγορία δύναται να διαιρεθεί στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- Σαφώς καθορισμένα γεωμετρικά σώματα σχηματισμών : Η γεωμετρική εσωτερική αραίωση προκύπτει από την παρουσία παρεμβολών στείρου υλικού καθώς καθορισμένων τοιχωμάτων εντός της μάζας του μεταλλεύματος.
- “Ενυπάρχουσα” (inherent) εσωτερική αραίωση, η οποία προκύπτει από τη μείωση της εκλεκτικότητας που συνοδεύει την αύξηση του μεγέθους του εξορυχθέντος όγκου. Ο

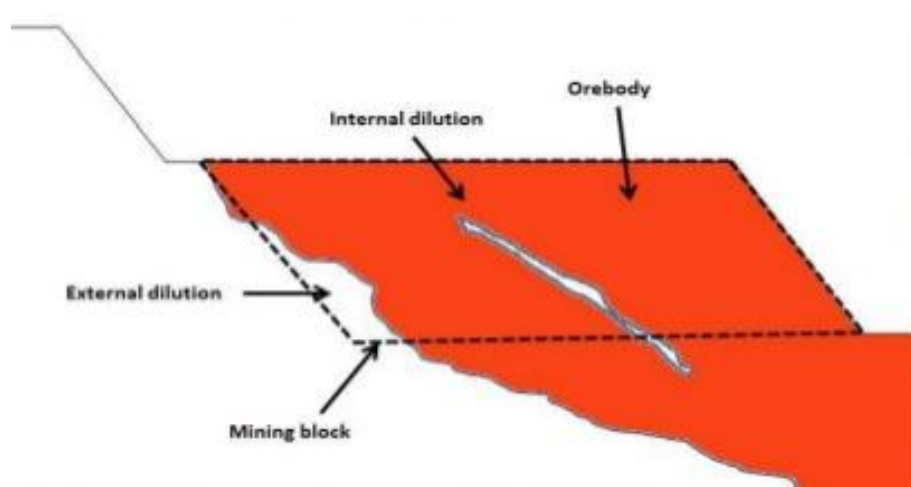
τύπος αυτός χρησιμοποιείται ως βάση για τη διάκριση του μεταλλεύματος από τα στείρα, ακόμη και όταν δεν υπάρχει εντελώς άγονο υλικό.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η αναμενόμενη αραιώση μπορεί να αγγίξει και το 40% του συνόλου του παραγόμενου υλικού. (Suglo & Oroku, 2012)

2.2.2 Εξωτερική αραιώση

Η εξωτερική αραιώση ορίζεται σύμφωνα με τον Villaescusa (1995) ως το στείρο υλικό, το οποίο εισέρχεται στην μάζα του εξορυγμένου χρήσιμου υλικού από πηγές που βρίσκονται εξωτερικά από την οριοθετούσα περιοχή εξόρυξης του μεταλλεύματος. Το υλικό αυτό προέρχεται από την υπέρθραυση των σχηματιζόμενων τοιχωμάτων του μετώπου εξόρυξης ή λόγω γεωτεχνικών αστοχιών των επιφανειών. Τα φαινόμενα αυτά ταξινομούνται σύμφωνα με τους Mandal & Sight (2009) σε δυναμικά και σε οιονεί στατικά. Τα πρώτα λαμβάνουν χώρα ακριβώς την στιγμή της έκρηξης του μετώπου, ενώ τα δεύτερα με μία μικρή χρονική απόκλιση από αυτήν. Το φαινόμενο αυτό δύναται να ελεγχθεί μέχρι ενός σημείου και μερικές φορές συνδέεται με τον τρόπο διάτρησης και την τεχνική ανατίναξης που εφαρμόζεται (Dominy et al, 1997) Σύμφωνα με τον Harraz (2019) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα εξής μέτρα για την ελαχιστοποίηση του συγκεκριμένου τύπου προσμίξεων:

- Διάκριση μεταξύ των ορίων του στείρου υλικού και του μεταλλεύματος
- Επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού με σκοπό να επιτευχθεί η απαιτούμενη εκλεκτικότητα
- Εξόρυξη κατά μήκος των επιφανειών επαφής
- Μοντελοποίηση των επιπτώσεων της αναπόφευκτης αραιώσης



Εικόνα 2.2: Διάκριση εσωτερικής και εξωτερικής αραιώσης (Harraz, 2019)

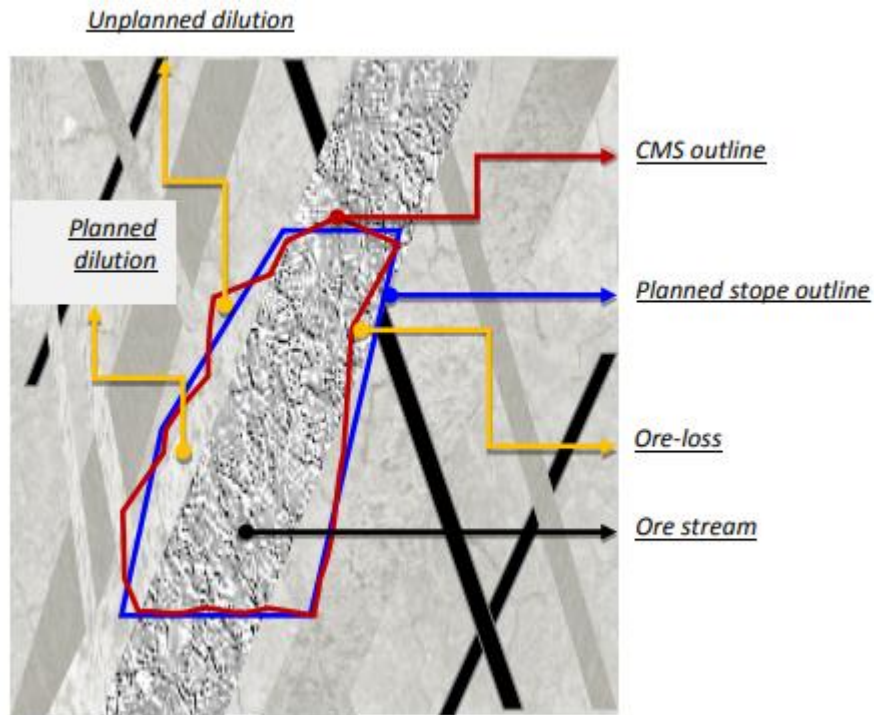
2.2.3 Απόλεια μεταλλεύματος

Η απόλεια μέρους από το μέταλλευμα σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την μέθοδο εκμετάλλευσης, η οποία χρησιμοποιείται. Η απόλεια αυτή αναφέρεται στο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υλικό που παραμένει στη θέση του εντός των ορίων του προγραμματισμένου μετώπου εξόρυξης (Villaescusa, 1998).

Η ποσότητα αυτού του “χαμένου” χρήσιμου υλικού μπορεί να προσεγγιστεί μόνο με κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης (Crawford, 2004). Όπως και με την αραίωση, αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα του εξορυκτικού τομέα και προϋποθέτει καλή γνώση της γεωλογίας. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι μεταξύ αραίωσης και απόλειας μεταλλεύματος υπάρχει συσχέτιση. Τυπικά μπορεί σε γενικά πλαίσια να επισημανθεί ότι πραγματοποιώντας περισσότερες εργασίες προς την αύξηση του βαθμού απόληψης του μεταλλεύματος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα παράλληλα την επίτευξη υψηλότερων ποσοστών αραίωσης. Αντίθετα, η μείωση της αραίωσης μέσω της εκλεκτικής εξόρυξης συχνά οδηγεί σε υψηλότερα ποσοστά απωλειών χρήσιμου υλικού. Παρόλα αυτά και για τις δύο περιπτώσεις, όπως θα παρουσιαστεί και σε επόμενη ενότητα τα διορθωτικά μέτρα είναι παρόμοια.

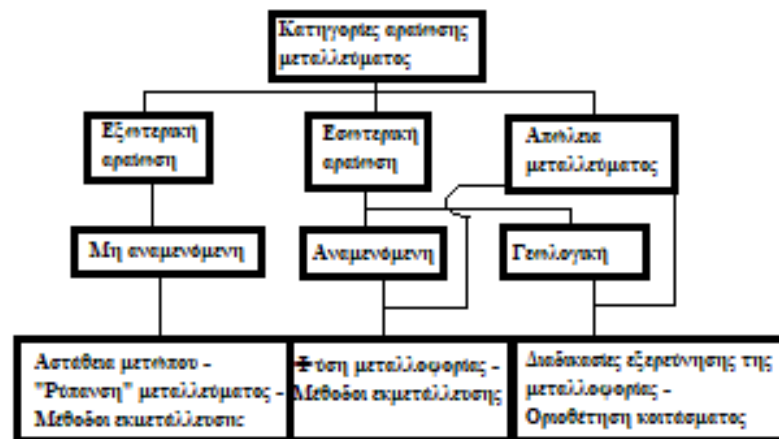
Επιπροσθέτως, σε επόμενη υποενότητα (βλ. ενότητα 2.4.2.4) θα αναλυθεί ειδικότερα το θέμα της απόλειας μεταλλεύματος, όσον αφορά την κυρίως εξεταζόμενη περίπτωση υπόγειας εκμετάλλευσης, αυτήν των διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα.

Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.3) παρουσιάζεται μια γραφική απεικόνιση των προσμίξεων και της απόλειας μεταλλεύματος στην μέθοδο εκμετάλλευσης κενών μετώπων.



Εικόνα 2.3: Περίγραμμα μετώπου, προσμίξεις και απώλεια μεταλλεύματος (Jang, 2014)

Συμπερασματικά παρακάτω παρατίθεται μία σχηματική απεικόνιση των προαναφερθέντων τύπων προσμίξεων (Εικόνα 2.4). Η εικόνα αυτή έχει τροποποιηθεί σε σχέση με την πρωτότυπη και πιο συγκεκριμένα οι όροι που εμφανίζονται είναι μεταφρασμένοι από την αγγλική γλώσσα.



Εικόνα 2.4: Κατηγοριοποίηση προσμίξεων (Villaescusa E., 1998)

Όσον αφορά την γεωλογική αραίωση, η οποία εμπεριέχεται στο ανωτέρω γράφημα, αυτή αναφέρεται στο στέρνο πέτρωμα ή στις απώλειες μεταλλεύματος που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια των σταδίων οριοθέτησης της εξερεύνησης και της οριζόντιας κατανομής, όπου μπορεί να γίνει μόνο ένα εκτιμώμενο μοντέλο του “σώματος” του μεταλλεύματος (Villaescusa, 1998).

2.2.4 Αραιώση του Murphy (Murphy's Dilution)

Σύμφωνα με τον Crawford (2004), δύναται να οριστεί και μία ακόμη γενική μορφή αραιώσης, η οποία χαρακτηρίζεται ως “Η αραιώση του Murphy”. Ο όρος αυτός βασίζεται στον νόμο του Murphy που πρεσβεύει ότι “Οτιδήποτε μπορεί να πάει στραβά, θα πάει στραβά.” (“Anything that can go wrong, will go wrong.”). Η αραιώση του Murphy είναι πρωτίστως ανθρώπινης προέλευσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, βασική αιτία προέλευσης αποτελεί η έλλειψη προσοχής εκ μέρους της διοίκησης και των αρμοδίων ή η έλλειψη έμφασης στην σημαντικότητα του βαθμού αραιώσης του προϊόντος. Κατ’ αυτό το τρόπο δύναται να πραγματοποιηθούν αρκετά λάθη κατά την διενέργεια των διαδικασιών της εξόρυξης αλλά και της αποκομιδής, τα οποία μπορούν να αυξήσουν τον βαθμό πρόσμιξης του επιθυμητού υλικού προς απόληψη. Αυτός ο τύπος αποτελεί και τη πιο αμφιλεγόμενη μορφή αραιώσης και λόγω του ότι οφείλεται κατά κύριο λόγο στον ανθρώπινο παράγοντα, μπορεί να είναι ένας από τους δυσκολότερους προς αντιμετώπιση.

2.3 Επιπτώσεις της αραιώσης στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις

2.3.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της αραιώσης παρουσιάζει μία πληθώρα επιπτώσεων στην εύρυθμη λειτουργία ενός μεταλλείου. Καταρχάς, ως άμεσες συνέπειες του φαινομένου αυτού αποτελούν καταρχάς η υπονόμηση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος και κατά δευτερευόντως, όσον αφορά την περίπτωση παρουσίας εξωτερικής αραιώσης προκαλείται δημιουργία ενός σχετικά επισφαλούς χώρου εργασίας, εντός του οποίου θα πρέπει να παρθούν ειδικά μέτρα διαχείρισης με σκοπό την αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων.

2.3.2 Οικονομικές επιπτώσεις

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις που αποφέρει το εξεταζόμενο φαινόμενο (και αντιστοίχως και η απώλεια μεταλλεύματος) εντοπίζονται στον οικονομικό τομέα. Η μη προγραμματισμένη αραιώση μεταλλεύματος επηρεάζει σημαντικά τη ζωή ενός μεταλλείου και την κερδοφορία της επιχείρησης (Mouhabbis, 2013). Η επιβλαβής επίδραση της αραιώσης στα οικονομικά της εξορυκτικής βιομηχανίας είναι τεράστια (Suglo & Oroku, 2012). Λόγω της δεδομένης σημαντικότητας που έχουν η αραιώση και η απώλεια μεταλλεύματος, όπως επισημαίνεται και από τους Elbrond (1994) και Puhakka (1991), κατά τις διαδικασίες της γεωλογικής μοντελοποίησης και της αξιολόγησής τους λαμβάνονται σημαντικά υπόψιν με σκοπό να παρθούν οι κατάλληλες αποφάσεις τόσο για την κατώτατη περιεκτικότητα του παραγόμενου προϊόντος σε χρήσιμο συστατικό, όσο και για τις σχεδιαστικές παραμέτρους της μεθόδου εξόρυξης. Σημαντικό κρίνεται να σημειωθεί ότι για τη μέτρηση της αραιώσης πρέπει

πραγματοποιηθεί η υπόθεση ότι το μεταλλεύμα οριοθετείται σε ποσότητα και ποιότητα και ο όγκος του πετρώματος μπορεί να μετρηθεί αποτελεσματικά με υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης. Παρόλα αυτά η αραίωση εκτιμάται συχνότερα και πιο αποτελεσματικά μέσα από την φυσική μέτρηση. Κατ' αυτό το τρόπο επειδή η ακριβής ποσότητα λόγω της μη in-situ μέτρησης των όγκων του άγονου υλικού και του μεταλλεύματος είναι άγνωστη, η εκτίμηση του ποσοστού των προσμίξεων επί του συνολικού προϊόντος επιφέρει μία σημαντική πιθανότητα σφάλματος. Τέλος, όσον αφορά τον τομέα των οικονομικών επιπτώσεων αξίζει να σημειωθεί ότι το εξεταζόμενο φαινόμενο επιφέρει ορισμένες επιβαρύνσεις, όπως αναλύεται περαιτέρω και στην ενότητα που ακολουθεί, στο λειτουργικό και συνολικό κόστος εξόρυξης, στο μεταλλουργικό κόστος επεξεργασίας του παραγόμενου υλικού, καθώς ακόμη και αυξημένη φθορά και μειωμένη ικανότητα λειοτρίβησης (Cokayne, 1982, Butcher, 2002).

2.3.3 Λοιπές επιπτώσεις

Όσον αφορά τις λοιπές επιπτώσεις που επιφέρει η αραίωση, αυτές αφορούν κατά κύριο λόγο στην εμφάνιση υπερμεγεθών όγκων στείρου πετρώματος εντός του μετώπου εξόρυξης. Τα αποτελέσματα αυτής της παρουσίας έχουν σαν συνέπεια :

- Την ανάγκη διενέργειας ορισμένων διεργασιών δευτερογενούς θραύσης. Για αυτό το σκοπό απαιτείται είτε η χρήση κάποιας επιπλέον ποσότητας εκρηκτικής ύλης είτε η δέσμευση κάποιου ειδικού μηχανήματος δευτερογενούς θραύσης και η χρήση αυξημένης ποσότητας καυσίμων σε σχέση με την σχεδιαζόμενη. Το γεγονός αυτό επιφέρει πέραν των επιπρόσθετων οικονομικών επιβαρύνσεων και μικρή παρεμπόδιση στην ακριβή τήρηση του χρονοδιαγράμματος εργασιών.
- Σε περίπτωση δυνατότητας φόρτωσης των υπερμεγέθων όγκων στείρου πετρώματος από τους ειδικούς φορτωτές υπογείων LHD, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού όγκου υλικού, το οποίο μεταφέρεται από τον φορτωτή, λόγω αδυναμίας επίτευξης της μέγιστης δυνατότητας πλήρωσης του κάδου του. Επιπροσθέτως, αυξάνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό η επιβάρυνση του μηχανολογικού εξοπλισμού, και κατ' επέκταση η φθορά αυτών επέρχεται σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά κατά την συγκεκριμένη περίπτωση δεν απαιτείται η διενέργεια δευτερογενούς θραύσης.
- Όπως αναφέρθηκε, η παρουσία στείρων όγκων εντός του χώρου εξόρυξης προκαλεί μία κατάσταση ανασφάλειας για το προσωπικό. Παρόλα αυτά με την λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας επιτυγχάνεται άμεσα η ασφάλεια του προσωπικού και των μηχανημάτων.

2.4 Ανάλυση του φαινομένου των προσμίξεων στην μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα (Sublevel Open Stoping)

2.4.1 Εισαγωγή

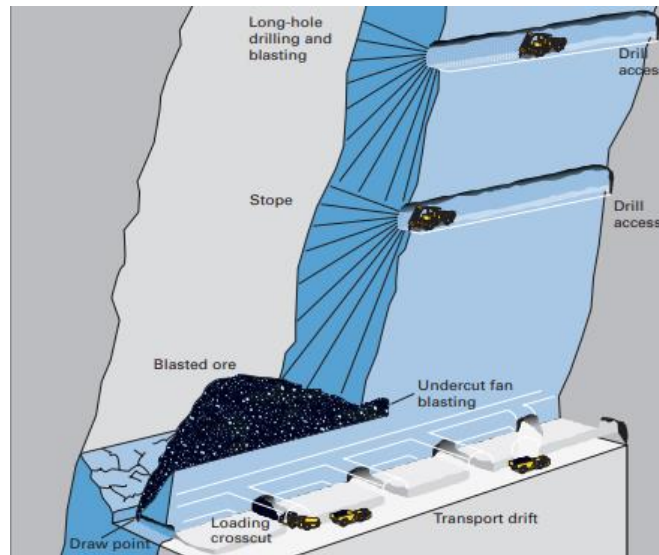
Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά διαδεδομένη και αποτελεί μία από τις βασικές, οι οποίες εφαρμόζονται στα σύγχρονα μεταλλεία. Η μέθοδος αυτή εναρμονίζει την μέθοδο των διαδοχικών ορόφων στην κατηγορία των μεθόδων με κενά μέτωπα, αυξάνοντας έτσι τα επίπεδα ασφαλείας. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου η εξόρυξη λαμβάνει χώρα μέσα σε σειρά διαδοχικών ορόφων όπου το μέταλλευμα καταπίπτει στον κενό χώρο. Από το χώρο αυτό το υλικό αποκομίζεται, με τη συμβολή της βαρύτητας, από την υποκείμενη στοά βάσεως του πατώματος (Μπενάρδος, 2014).

2.4.2 Βασικά στοιχεία μεθόδου

Η μέθοδος των διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα είναι μία μέθοδος υψηλής παραγωγικότητας, η οποία συχνά επιλέγεται ως εναλλακτική της μεθόδου των διαδοχικών ορόφων με κατακρημνιζόμενα μέτωπα, όταν μία ελάχιστη πρόσμιξη του μεταλλεύματος με στείρο υλικό είναι ανεκτή (Τερζόπουλος, 2003). Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί ένα υψηλό επίπεδο εργασιών προπαρασκευής παρά το γεγονός ότι το κόστος ανάπτυξης εξομαλύνεται λόγω του γεγονότος ότι οι εργασίες λαμβάνουν χώρα εντός του σώματος του μεταλλεύματος.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο δίδονται εκτός από τον χαρακτηρισμό “Sublevel Open Stoping” και οι ονομασίες “Bighole open stoping”, “Longhole open stoping” και “Blasthole open stoping” (Harraz, 2014).

Ακολούθως παρατίθεται μία τυπική εικόνα (Εικόνα 2.5) στην οποία παρατηρούνται όλες οι επιμέρους εργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά την διενέργεια της μεθόδου των διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα.



Εικόνα 2.5: : Τυπική μορφή μεταλλείου υπό την εκμετάλλευση με την μέθοδο «Διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα» (SLOS) (Atlas Copco Rock Drills AB, 2007)

Αυστηρή προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου σύμφωνα με τον Τερζόπουλο (2003) είναι το κοιτάσμα να έχει ομαλές παρυφές και κανονικό σχήμα, λόγω της αδυναμίας εκλεκτικής εκμετάλλευσης. Επιπροσθέτως, για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται το κοιτάσμα να είναι μεγάλων διαστάσεων και μέτριας έως μεγάλης ανθεκτικότητας. Όσον αφορά τον περιβάλλοντα σχηματισμό θα πρέπει να εμφανίζει τέτοιες γεωτεχνικές ιδιότητες ώστε να μην απαιτούνται μέτρα υποστήριξης για την διατήρηση της ευστάθειας του κενού χώρου. Το πλάτος του κοιτάσματος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 6 μέτρα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση πιθανότατα η χρησιμοποίηση των διατηρημάτων μεγάλου μήκους να μην είναι αποδοτική. Τα διατηρήματα μεγάλου μήκους ορύσσονται μέσω διατηρητικού εξοπλισμού μεγάλου μήκους διατηρητικής στήλης και είναι αναγκαία ώστε να επιτευχθεί στην συνέχεια η θραύση μέσω εκρηκτικής ύλης του όγκου του κοιτάσματος μεταξύ δύο διαδοχικών υποορόφων.

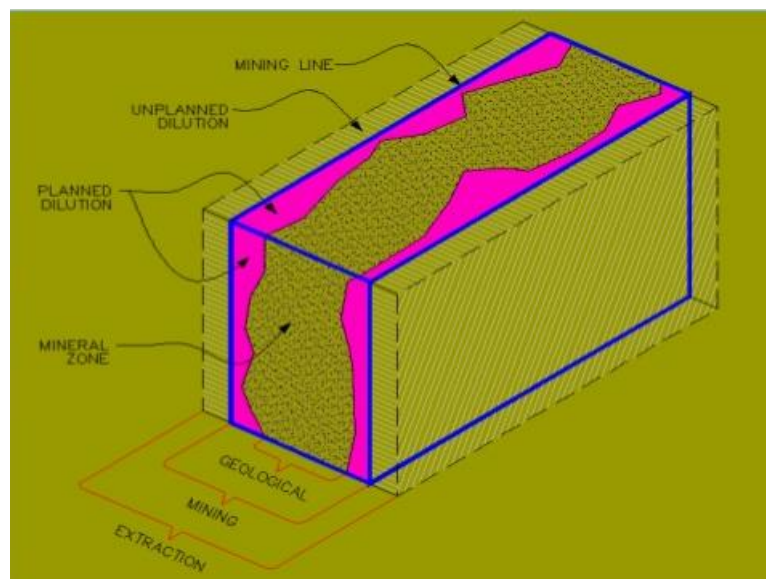
Συνηθέστερα η εκμετάλλευση ξεκινά από τον κατώτερο όροφο και συνεχίζεται διαδοχικά προς τους ανώτερους. Ως σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου κρίνονται η υψηλή παραγωγικότητα και τα επίπεδα ασφαλείας, ο υψηλός βαθμός απόληψης και το σχετικά μικρό ποσοστό προσμίξεων, καθώς επίσης και η άμεση απόληψη του μεταλλεύματος κατά τα πρώτα παραγωγικά στάδια της εξόρυξης. Ως μειονεκτήματα μπορούν να χαρακτηριστούν το αρχικά υψηλό κεφαλαιακό κόστος επένδυσης, η μη δυνατή διενέργεια εκλεκτικής απόληψης και τέλος η ανεπάρκεια εφαρμογής της μεθόδου σε κοιτάσματα μικρής κλίσης.

2.4.2 Ανάλυση Προσμίξεων

2.4.2.1 Εισαγωγή

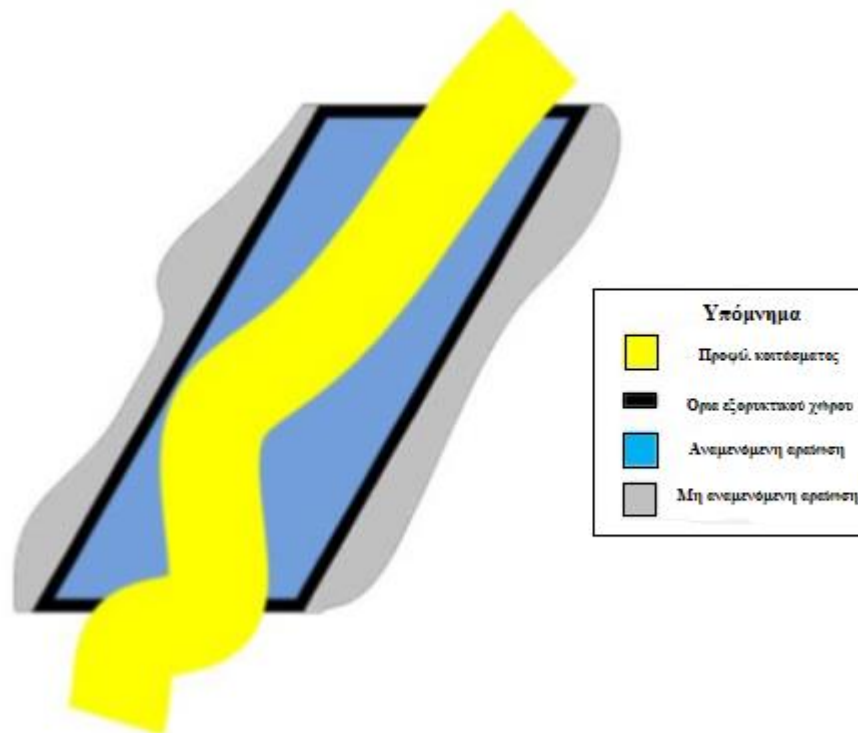
Όσον αφορά το υποκεφάλαιο της ανάλυσης των προσμίξεων για την εξεταζόμενη μέθοδο αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εντοπίζεται ιδιαίτερη διαφοροποίηση από την αντίστοιχη γενική κατηγοριοποίηση που αναλύθηκε στην ενότητα 2.2. Παρόλα αυτά αξίζει να δοθούν ορισμένες επιπρόσθετες πληροφορίες, χαρακτηριστικές για το φαινόμενο της αραίωσης για τη μέθοδο διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα.

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένας εξορυκτικός χώρος, ο οποίος διαχωρίζεται σε ζώνες και αποδίδονται σχηματικά και οι δύο τύποι πρόσμιξης.



Εικόνα 2.6: Εξορυκτικός χώρος - Τύποι προσμίξεων (SOYER, 2006)

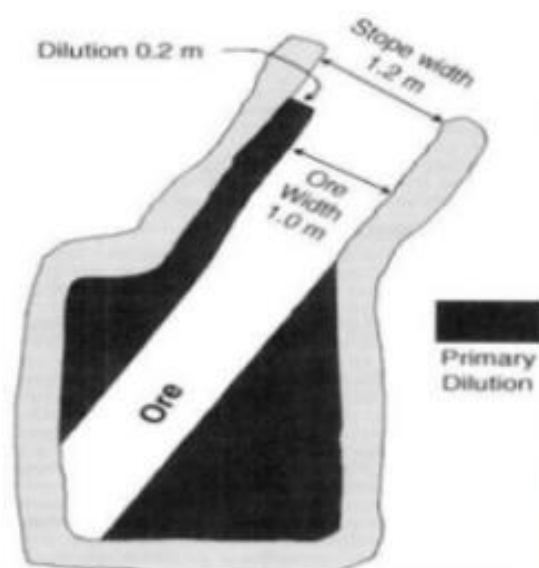
Παρόλα τα πλεονεκτήματα που ενέχει η εφαρμογή των μεθόδων κενού μετώπου, αυτές μπορεί να πλήττονται από μη αναμενόμενη αραίωση και απώλεια μεταλλεύματος (βλ. Εικόνα 2.7), των οποίων η συνδυασμένη δράση μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στην αναστολή της λειτουργίας ενός μεταλλείου (Jang, 2014).



Εικόνα 2.7: Αναμενόμενη, μη αναμενόμενη αραίωση και προφίλ μεταλλεύματος (Tommila, 2014)

2.4.2.2 Εσωτερική αραίωση

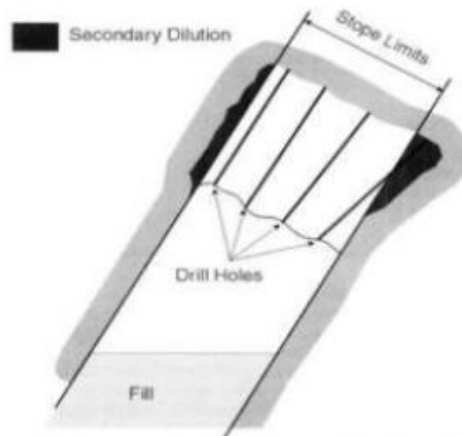
Όπως αναφέρθηκε η εσωτερική αραίωση αφορά παρεμβολές στείρου υλικού εντός της μάζας του μεταλλεύματος και έχει σχεδιαστεί να παραληφθεί μαζί με αυτό. Αυτός ο τύπος πρόσμιξης χαρακτηρίζεται και ως πρωτογενής, ενώ ενδεδειγμένη ανάλυση πραγματοποιείται στην ενότητα 2.2.1. Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζεται μία γραφική αναπαράσταση, όπου γίνεται εμφανής η πρωτογενής αραίωση, η οποία συνοδεύει τον παραληπτόμενο χρήσιμο υλικό.



Εικόνα 2.8: Τυπική αναπαράσταση πρωτογενούς αραίωση (Crawford, 2004)

2.4.2.3 Εξωτερική αραίωση

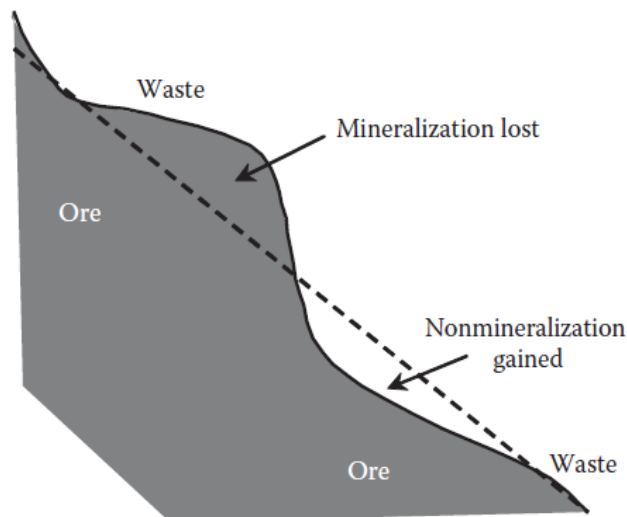
Η εξωτερική αραίωση προκύπτει σαν αποτέλεσμα υπερεκσκαφής του προσχεδιασμένου χώρου εξόρυξης. Το υλικό αυτό μπορεί είτε να είναι εντελώς στείρο είτε να κρίνεται ως ενδιάμεσης ποιότητας ως προς το μέταλλευμα. Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.9) παρουσιάζεται με ιδιαίτερη σαφήνεια το συγκεκριμένο φαινόμενο.



Εικόνα 2.9: Δευτερογενής αραίωση (Crawford, 2004)

2.4.2.4 Απώλεια μεταλλεύματος

Η απώλεια μεταλλεύματος στην εξεταζόμενη περίπτωση μεθόδου εκμετάλλευσης παρατηρείται σε διάφορα σημεία του κενού χώρου και οφείλονται κατά κύριο λόγο σε λάθη τα οποία προέρχονται κατά την διαδικασία της διάνοιξης και όρυξης του ακριβούς προσχεδιασμένου μετώπου εντός του μεταλλεύματος (βλ. Εικόνα 2.10) (Τουλίκας, 2019).



Εικόνα 2.10: Απώλεια μεταλλεύματος (Villaescusa, 2014)

Επιπροσθέτως, είναι πολύ συχνή η τακτική να αφήνονται ηθελημένα εντός του μεταλλείου άθικτοι όγκοι μεταλλεύματος με σκοπό την ενίσχυση των επιπέδων ασφαλείας ως προς την

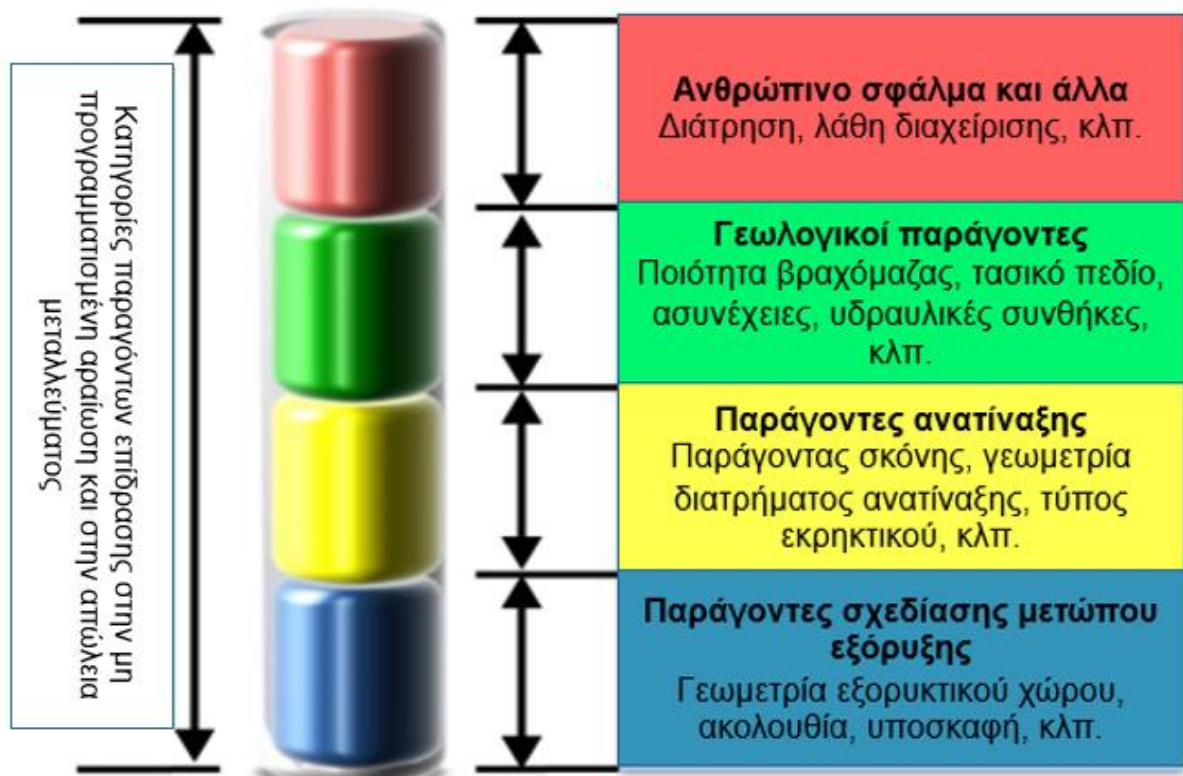
ευστάθεια των κενών μετώπων εντός του μεταλλείου. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μέταλλευμα, το οποίο εγκαταλείπεται άθικτο εντός του μεταλλείου, αποτελεί και αυτή μία απώλεια μεταλλεύματος.

2.4.3 Παράγοντες προσμίξεων και απώλειας μεταλλεύματος

2.4.3.1 Εισαγωγή

Οι παράγοντες που επιδρούν στα εξεταζόμενα φαινόμενα και κατά κύριο λόγο στην εμφάνιση δευτερογενούς αραίωσης και απώλειας μεταλλεύματος είναι πλείστοι και μεγάλης σημαντικότητας. Όσον αφορά την πρωτογενή ή προγραμματισμένη αραίωση αυτή, όπως έχει αναφερθεί, αυτή οφείλεται κυρίως στο περιβάλλον ανάπτυξης του μεταλλεύματος και στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά αυτού και των περιβαλλόντων στειρών πετρωμάτων. Όλοι αυτοί οι παράγοντες δύνανται να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικούς πυλώνες, οι οποίοι είναι (βλ. Εικόνα 2.11):

- Σχεδιαστικοί παράγοντες του μετώπου εξόρυξης
- Διάτρηση και Ανατίναξη
- Γεωλογικοί - Γεωτεχνικοί παράγοντες
- Παράγοντες οφειλόμενοι στο ανθρώπινο λάθος και λοιποί παράγοντες



Εικόνα 2.11: Παράγοντες εμφάνισης της προγραμματισμένης αραίωσης και της απώλειας μεταλλεύματος (Jang, 2014) (Μεταφρασμένη μορφή)

2.4.3.2 Σχεδιαστικοί παράγοντες

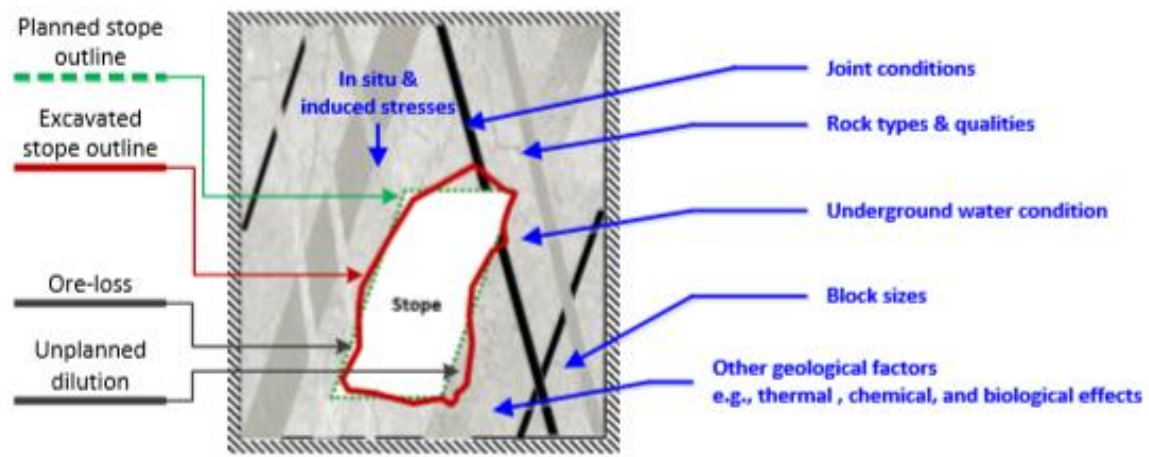
Η εμφάνιση αραίωσης λόγω του σχεδιασμού ανάπτυξης του μεταλλείου είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι τα όρια των μετώπων εξόρυξης δεν ακολουθούν την ανάπτυξη του μεταλλεύματος στον χώρο και είναι σχεδόν αναπόφευκτη (Tommila, 2014). Υπάρχουν πολλές διορθωτικές σχεδιαστικές κινήσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μείωση της αραίωσης ή/και της απώλειας μεταλλεύματος αλλά αυτές πιθανότατα να οδηγούσαν σε διαταραχή κάποιας άλλης ιδιότητας του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Κατ' αυτό το τρόπο θα πρέπει η μελέτη που θα διενεργηθεί να αποσκοπεί πέραν από την μείωση της αραίωσης και της απώλειας χρήσιμου υλικού και στην εξυπηρέτηση της βελτιστοποίησης των εργασιών της διάτρησης, καθώς ακόμη και στην επίτευξη της ευστάθειας εντός του μετώπου εξόρυξης (Villaescusa, 1998). Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του μετώπου διαδραματίζει η κλίση της οροφής του κενού χώρου αλλά και η απόσταση μεταξύ των κενών μετώπων (Harraz, 2019). Όσον αφορά το μήκος των κενών μετώπων, δηλαδή την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εξορυκτικών χώρων, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτωπο τόσο αυξάνεται η αστάθεια αυτού και ο κίνδυνος κατάπτωσης κάποιου τοιχώματος, οδηγώντας ταυτοχρόνως σε αύξηση της μη προγραμματισμένης αραίωσης.

2.4.3.3 Γεωλογικοί – Γεωτεχνικοί παράγοντες

Η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία και ετερογενή χαρακτηριστικά, τα οποία είναι εγγενώς πολύπλοκα (Jang, 2014). Κατ' αυτό το τρόπο ο καθορισμός των γεωλογικών παραγόντων και της σοβαρότητας των επιπτώσεων αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα.

Οι γεωτεχνικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την επίδραση των τάσεων και της κατάστασης του περιβάλλοντος σχηματισμού (Tommila, 2014). Οι αστοχίες προκαλούνται συνήθως από την αλληλεπίδραση αυτών των δύο παραγόντων, όπως η χαλάρωση των φτωχών πετρωμάτων. Τα γεωτεχνικά θέματα συμβαδίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό με τον προγραμματισμό και τον σχεδιασμό της ανάπτυξης του μεταλλείου, αφού με καλό σχεδιασμό τα ζητήματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν ή τουλάχιστον οι επιπτώσεις τους να έχουν μικρότερο αντίκτυπο.

Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι, οι οποίες επιδρούν στην εμφάνιση των εξεταζόμενων φαινομένων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες (Jang, 2014)

2.4.3.4 Διάτρηση - Ανατίναξη

Οι διαδικασίες της διάτρησης και της ανατίναξης είναι δύο εκ των βασικών στην ανάπτυξη και στην παραγωγή της εξορυκτικής διαδικασίας ενός μεταλλείου. Αξίζει δε να σημειωθεί, σύμφωνα με τον Jang (2014) ότι για αυτό το λόγο αποτελούν και τις εργασίες, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το συνολικό κόστος της εξορυκτικής διαδικασίας. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις, μία εκ των βασικών ιδιοτήτων του πετρώματος που καθορίζουν την δυσκολία εξόρυξής του, η δυσθραυστότητα είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί με μικρό συντελεστή σφάλματος. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση της διάτρησης και της ανατίναξης στο φαινόμενο της αραίωσης είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί καθώς δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα τα οποία να συσχετίζουν την ακρίβεια της διάτρησης με το ELOS (βλ. ενότητα 3.4.2) (Tommiila, 2014).

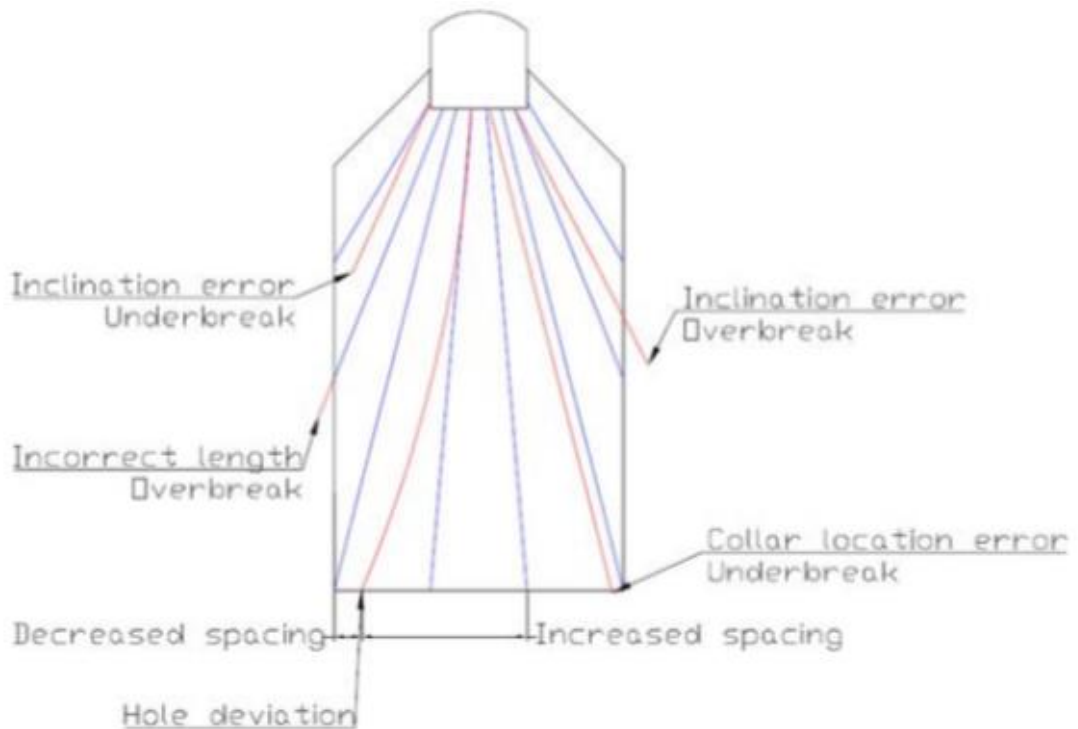
Όσον αφορά τον παράγοντα της διάτρησης θα πρέπει να τονιστεί ότι η μη ακριβής διάτρηση σύμφωνα με τον Tommiila (2014) καθορίζεται από :

- Λανθασμένες ενέργειες κατά την τοποθέτηση της διατρητικής στήλης
- Λανθασμένη επιλογή κλίσης διάτρησης σε σχέση με την προσχεδιασμένη
- Παρέκλιση διατρημάτων και λανθασμένο μήκος διάτρησης

Οι πιο πιθανές επιδράσεις μίας λανθασμένα εκτελεσμένης διάτρησης, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 2.13) είναι οι εξής :

- Υποσκαφή (οφειλόμενη σε λανθασμένη επιλογή κλίσης)
- Υποσκαφή (οφειλόμενη σε λανθασμένη τοποθέτηση της διατρητικής στήλης)
- Υπερεκσκαφή (οφειλόμενη σε λανθασμένη επιλογή κλίσης)

- Υπερεκσκαφή (οφειλόμενη σε διάτρηση μεγαλύτερου μήκους διατρήματος από το επιθυμητό)
- Επίσης αυξάνοντας ή μειώνοντας την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών διατρημάτων ή έχοντας παρέκκλιση αυτών, τότε έχουμε την σχηματισμό όγκων πετρώματος μετά την ανατίναξη με μη επιθυμητό μέγεθος.



Εικόνα 2.13 Πιθανές επιπτώσεις αποτυχημένης ανατίναξης (Tomilla, 2014)

Όσον αφορά τον παράγοντα της ανατίναξης έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες επάνω στους μηχανισμούς προξένησης βλάβης στο περιβάλλον πέτρωμα λόγω της δράσης των εκρηκτικών (Jang, 2014). Μέσα σε αυτούς συγκαταλέγονται οι παρακάτω:

- Η επίδραση του φωστικού κύματος που προκαλείται από την ανατίναξη
- Η επίδραση της υψηλής πίεσης των αερίων της ανατίναξης
- Η επίδραση της μεθοδολογίας της ανατίναξης
- Τα χαρακτηριστικά του διατρήματος ανατίναξης και της εκρηκτικής ύλης
- Συνθήκες διενέργειας ανατίναξης κλπ

2.4.3.5 Παράγοντες οφειλόμενοι στο ανθρώπινο λάθος

Οι παράγοντες που συντελούν στην αραίωση και στην μείωση του αποληφθέντος μεταλλεύματος και οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια συνδέονται σε ένα βαθμό με τον τύπο αραίωσης που αναλύθηκε κατά την ενότητα 2.2.4, δηλαδή την αραίωση του Murphy.

Τα ανθρώπινα σφάλματα που μπορεί να οδηγήσουν στα εξεταζόμενα φαινόμενα μπορούν να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγής (Jang, 2014). Παραδείγματος χάριν, μπορούν να προκύψουν πλείστα προβλήματα σε τυχόν μη βέλτιστες επιλογές κατά τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης, κατά τις εργασίες της παραγωγής όπως η διάτρηση κλπ.

2.5 Τρόποι υπολογισμού των προσμίξεων

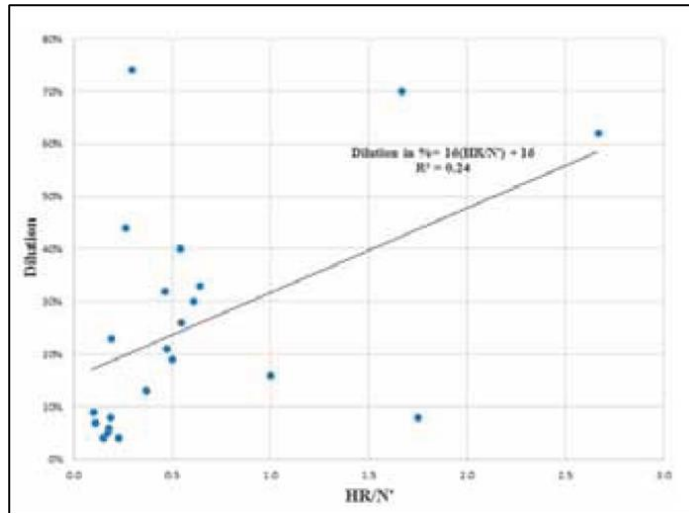
Όσον αφορά το ζήτημα της ποσοτικοποίησης της αραίωσης, η οποία προκύπτει τελικώς από την εξορυκτική διαδικασία έχουν διατυπωθεί αρκετές σχέσεις υπολογισμού της. Ο Pakalnis (1986) πραγματοποιώντας μελέτη επάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα σε μεταλλεία του Καναδά προχώρησε στην εξαγωγή αρκετών μαθηματικών σχέσεων υπολογισμού - ορισμών της αραίωσης. Ακολούθως παρατίθενται οι σχέσεις αυτές, αναφέροντας ότι η τιμή της αραίωσης που προκύπτει από τις σχέσεις αυτές δίδεται σε ποσοστό επί τις εκατό (%), όπως είναι και ο συνήθης τρόπος αναφοράς της.

Πίνακας 1.2: Σχέσεις υπολογισμού πρόσμιξης - αραίωσης	
Αριθμός Σχέσης	Μαθηματική σχέση ορισμού
1	Πρόσμιξη = (Εξορυγμένοι τόνοι αγόνου)/(Εξορυγμένοι τόνοι μεταλλεύματος)
2	Πρόσμιξη = (Εξορυγμένοι τόνοι στείρου)/(Εξορυγμένοι τόνοι μεταλλεύματος + τόνοι στείρου)
3	Πρόσμιξη = (Ποσοστό μη αραιωμένου υλικού από in-situ μετρήσεις σε τμήματα γεωτρήσεων)/(Ποσοστό ανίχνευσης δείγματος στο σημείο πρόσληψης)
4	Πρόσμιξη = (Μη αραιωμένα επιτόπου αποθέματα)/(Ποσοστό μεταλλεύματος που οδηγείται προς τον μύλο λειοτρίβησης για την ίδια ποσότητα υλικού)
5	Πρόσμιξη = (Όγκοι φόρτωσης – όγκοι ανατίναξης)/(Όγκοι ανατίναξης)
6	Πρόσμιξη = Διαφορά μεταξύ τοποθετημένου όγκου λιθογόμωσης και θεωρητικά αναμενόμενου όγκου στο μέτωπο
7	Πρόσμιξη = Η αραίωση που παρατηρείται και αξιολογείται οπτικά

Αριθμός Σχέσης	Μαθηματική σχέση ορισμού
8	Πρόσμιξη = $(x \text{ μέτρα αποφλοιώσης του τοίχου οροφής} + y \text{ μέτρα αποφλοιώσης του τοίχου πατώματος}) / (\text{πλάτος μεταλλοφορίας})$
9	Πρόσμιξη = $[(\text{Ποσότητα (σε τόνους) αποληπτόμενου υλικού στο μέτωπο}) / (\text{Υπολογισμένη αποληπτόμενη ποσότητα})]$ τα τελευταία δέκα έτη λειτουργίας του μεταλλείου

Αξίζει επιπλέον να παρουσιαστεί και μία διαφορετική προσέγγιση της μαθηματικής σχέσης υπολογισμού των προσμίξεων, η οποία εξήχθη από τους Le Roux & Stacey (2017). Το ερευνητικό τους έργο στηρίχθηκε πάνω σε θεωρητικούς υπολογισμούς σταθερότητας μετώπων με τη χρήση της μεθόδου του Stability Graph (βλ. Κεφάλαιο 3^ο). Ακόμα, στην μελέτη τους συνέκριναν την πραγματική έκταση της υπέρθραυσης, δηλαδή του υλικού πρόσμιξης που υπολογίστηκε μέσω μετρήσεων σάρωσης μετώπου, CMS, με τις αναμενόμενες προσμίξεις κατά τον σχεδιασμό των μετώπων εκμετάλλευσης, δηλαδή πριν την εκτέλεση της εξορυκτικής διαδικασίας.

Η μελέτη τους με σκοπό την εξαγωγή μίας σχέσης υπολογισμού των προσμίξεων βασίστηκε σε 28 διαφορετικές μελέτες περιπτώσεων (case studies), κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούσε και σε ένα διαφορετικό εξεταζόμενο μέτωπο εξόρυξης. Από τον συνολικό αριθμό των εξεταζόμενων περιπτώσεων απομονώθηκαν οι 22 από αυτές, στις οποίες παρουσιαζόταν αραίωση μεγαλύτερη του μηδενός, ενώ οι περιπτώσεις με πολύ υψηλά υπολογιζόμενα ποσοστά αραίωσης απορρίπτονταν. Από τις 22 αυτές περιπτώσεις αναπτύχθηκε τελικώς μία σχέση υπολογισμού του ποσοστού των προσμίξεων για τα ανοικτά μέτωπα εξόρυξης. Για κάθε περίπτωση προέκυψε ένα υπολογιζόμενο ποσοστό αραίωσης και μία τιμή του λόγου «HR/N'». Τοποθετώντας την πρώτη τιμή στον άξονα των τεταγμένων και την δεύτερη στον αντίστοιχο άξονα των τετημένων και για τις 22 περιπτώσεις πραγματοποίησαν σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο παραμέτρων (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Διάγραμμα Προσμίξεων – HR/N' (Le Roux & Stacey, 2017)

Κατ' αυτό το τρόπο προέκυψε μία γραμμή τάσης ή καλύτερα μία εξίσωση συσχέτισης, η οποία περιλαμβάνει όπως αναφέρθηκε τον λόγο της υδραυλικής ακτίνας HR προς τον δείκτη ευστάθειας N' για μία εξεταζόμενη επιφάνεια μετώπου, όπως προέκυψε από κάποιο εμπειρικό μοντέλο Stability Graph, και του αναμενόμενου ποσοστού προσμίξεων που παρουσιάζει το ο εξορυκτικός χώρος στον οποίο ανήκει η επιφάνεια. Η εξίσωση που εξήχθη κρίνεται ως χαμηλής ακρίβειας και είναι η εξής:

$$\text{Προσμίξεις (\%)} = 16 \times \left(\frac{HR}{N'}\right) + 16$$

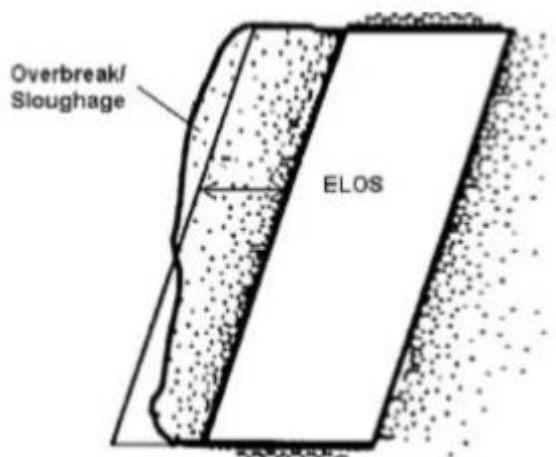
2.6 ELOS

2.6.1 Βασικά στοιχεία

Ο δείκτης του Equivalent Linear Overbreak/Slough (ELOS) χρησιμοποιείται με σκοπό την ποσοτικοποίηση του υλικού που έχει προκύψει από την υπέρθραυση του περιβαλλόντος στο χώρο εκμετάλλευσης πέτρωμα (Stephenson & Sandy, 2013). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δίδεται και μία ποσοτική εικόνα της εξωτερικής αραίωσης του μεταλλεύματος με την υπόθεση ότι εξωτερικά από το μέτωπο δεν παρεμβάλλονται ποσότητες μεταλλεύματος ή αυτές θεωρητικώς συμπεριλαμβάνονται στο σύνολο του υλικού αραίωσης. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Pakalnis et al. (1996) και η εξίσωση υπολογισμού του ELOS είναι η ακόλουθη:

$$ELOS = \frac{\text{Μετρημένος Όγκος Υλικού Υπέρθραυσης (m}^3\text{)}}{\text{πλάτος (m)} \times \text{ύψος (m)}}$$

Ο όγκος υπέρθραυσης που υπολογίζεται ορίζεται για ένα συγκεκριμένο πλευρικό τοίχωμα, δηλαδή το δάπεδο ή την οροφή του κενού μετώπου. Παρακάτω παρατίθεται μία σχηματική απεικόνιση του ορίου της εκσκαφής και της υπέρθραυσης (Εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.15: Σχηματική απεικόνιση υπέρθραυσης/αποκόλλησης (Clark & Pakalnis, 1997)

Μία σημαντική κατηγοριοποίηση της συμπεριφοράς της υπό εξέταση επιφάνειας σύμφωνα με την υπολογιζόμενη τιμή του ELOS δόθηκε από τους Pakalnis et al. (1996) και είναι η εξής:

Τιμή ELOS (m)	Περιγραφή κατηγορίας
0-1	Ευστάθεια
1-3	Υπέρθραυση
> 3	Σημαντική υπέρθραυση

Εικόνα 2.16: Αντιστοίχιση ELOS - Συμπεριφορά τοιχώματος (Pakalnis, et al., 1996)

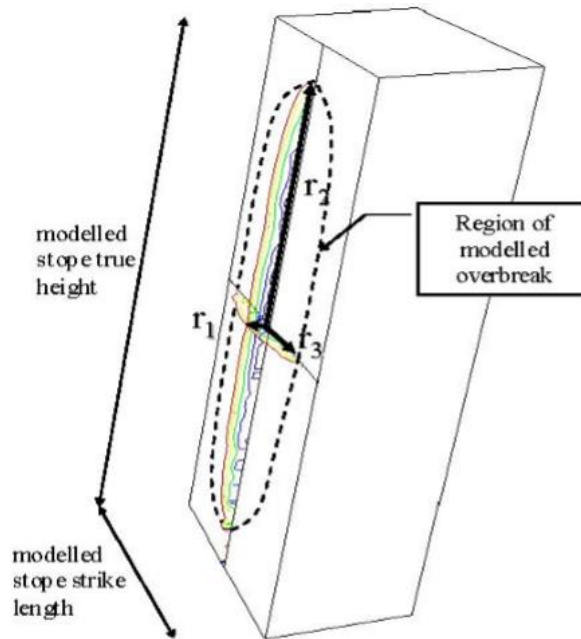
2.6.2 Ποσοτικοποίηση των προσμίξεων μέσω ανάλυσης της υπέρθραυσης

Οι Papanicolaou & Suorineni (2015) εξέδωσαν μία εξίσωση προσδιορισμού του ποσοστού της αραίωσης του μεταλλεύματος μέσω συσχέτισης αυτού με το ELOS, η οποία είναι η εξής:

$$\text{Ποσοστό πρόσμιξης (\%)} = \frac{ELOS}{\text{Πλάτος Μεταλλοφορίας}} \times 100$$

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση του δυνητικού ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος μέσα από ένα τρισδιάστατο μοντέλο εισήχθη από τους Henning & Mitri (2007) ο όρος της

Πυκνότητας Αραίωσης (Dilution Density) DD, με μονάδα μέτρησης το μέτρο (m). Αυτός ο όρος μπορεί να προβλέψει την πιθανή αποφλοίωση σε οποιοδήποτε από τα τοιχώματα του χώρου εξόρυξης (Mouhabbis, 2013). Στην Εικόνα 2.17 δίδεται μία σχηματική απεικόνιση του μισού ελλειψοειδούς, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι για την κατασκευή του μεγέθους της περιοχής αστοχίας του μοντέλου ως μοντέλο αστοχίας χρησιμοποιείται είτε η θεώρηση “ $\sigma_3 = 0$ ”, δηλαδή μηδενισμός της ελάχιστης κύριας τάσης είτε η θεώρηση “ $\sigma_3 = \sigma_1$ ”, δηλαδή θεώρηση ισότητας μεταξύ της ελάχιστης κύριας τάσης και της εφαλκυστικής τάσης.



Εικόνα 2.17: Αναπαράσταση του μισού ελλειψοειδούς (Henning & Mitri, 2007)

Η σχέση υπολογισμού της πυκνότητας αραίωσης δίδεται παρακάτω:

$$DD = \frac{V_{pe} (m^3)}{\text{Surface area exposed} (m^2)}$$

όπου,

$$V_{pe} = \frac{2}{3} \times \pi \times r_1 \times r_2 \times r_3$$

Όπου, r_1, r_2 και r_3 : Ακτινικές αποστάσεις από το κέντρο του μετώπου ως προς την διαγραμματική απεικόνιση της τάσης σ_3

Σε περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δεδομένα από συστήματα παρακολούθησης κοιλοτήτων (CMS) (βλ. ενότητα 2.7) στον αριθμητή της σχέσης υπολογισμού της πυκνότητας αραίωσης τοποθετείται ο όγκος του πλεονάζοντος υλικού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο παράγοντας DD είναι ίδιος με την ιδιότητα του ELOS, με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει να εντοπίζονται στο γεγονός ότι με την χρήση του μοντέλου αυτού δεν λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι όπως το RMR και το πλάτος της μεταλλοφορίας, αλλά ακόμη και οι διαστάσεις του μετώπου εξόρυξης, η εντατική κατάσταση του πετρώματος, η τοποθεσία αυτού, η κλίση και το βάθος της εξεταζόμενης επιφάνειας, ενώ δίδεται η δυνατότητα χρήσης συστημάτων CMS.

2.7 Ανίχνευση προσμίξεων – Έλεγχος απόληψης

Η βασική παράμετρος για την ανίχνευση των προσμίξεων αλλά και για τον έλεγχο της απόληψης του μεταλλεύματος είναι η οριακή περιεκτικότητα. Ο υπολογισμός αυτής της τιμής αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα, καθώς αποτελεί έναν πολύ σημαντικό οικονομικό όρο για την λειτουργία ενός μεταλλευτικού έργου και βασίζεται σε παραμέτρους όπως τα λειτουργικά κόστη, τις τιμές των μετάλλων κλπ (Τερζόπουλος, 2003). Κατ' αυτό το τρόπο αν η περιεκτικότητα του παραγόμενου υλικού σε χρήσιμο συστατικό φτάσει σε επίπεδα χαμηλότερα από την οριακή περιεκτικότητα για δεδομένες συνθήκες τότε το γεγονός αυτό είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει μέχρι και στον τερματισμό της παραγωγικής διαδικασίας. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι λόγω της σημαντικότητας της παραμέτρου αυτής, εκείνη είναι και η πρώτη που θα πρέπει να οριστεί.

Για να πραγματοποιηθεί ο προαναφερθέντας έλεγχος θα πρέπει να γίνει μία αρχική δειγματοληψία από το μέτωπο. Οι βασικές τεχνικές δειγματοληψίας είναι η οπτική και η δειγματοληπτική.

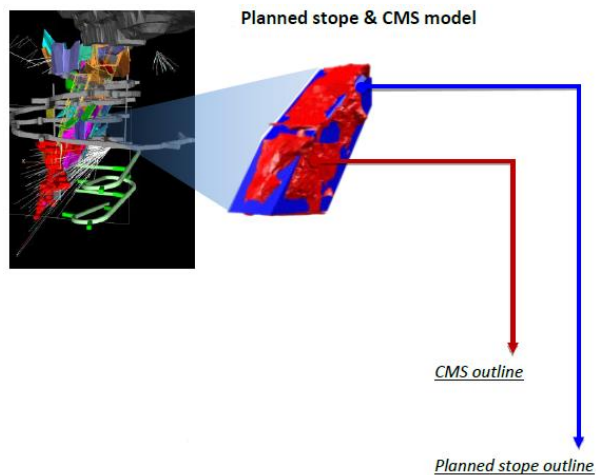
Όσον αφορά την οπτική τεχνική, αυτή εφαρμόζεται σύμφωνα με τον Τερζόπουλο (2003) όταν είναι δυνατός ο μακροσκοπικός διαχωρισμός μεταξύ μεταλλεύματος και στείρου πετρώματος. Για τους σκοπούς αυτούς σε έναν σωρό εξορυσσόμενου υλικού πραγματοποιείται προσδιορισμός της αναλογίας μεταλλεύματος – στείρου, με γνώμονα την περιεκτικότητά τους σε χρήσιμο συστατικό, όπως αυτή προκύπτει από την ανάλυση των θρυμμάτων της διάτρησης και της οριακής περιεκτικότητας. Είναι ιδιαίτερος σημαντικό επίσης μέταλλευμα και στέιρο να εμφανίζουν διαφορετικές χρωματικές ιδιότητες.

Η δειγματοληπτική τεχνική κατά τον Τερζόπουλο (2003) εφαρμόζεται όταν ο μακροσκοπικός διαχωρισμός μεταξύ μεταλλεύματος και στείρου είναι δύσκολος και υλοποιείται με τη συλλογή ενός σημαντικού πλήθους δειγμάτων από τον σωρό του εξορυγμένου μεταλλεύματος και τη χημική ανάλυση αυτών.

Η επιλογή μεταξύ των παραπάνω δύο τεχνικών κρίνεται τις περισσότερες φορές αρκετά δύσκολη. Κατ' αυτό το τρόπο απαιτείται η διενέργεια προσεκτικής εξέτασης των ακόλουθων σημείων (Τερζόπουλος, 2003):

- Λόγω του ότι η εξορυκτική διαδικασία είναι συνεχής, η συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος από έναν εξορυγμένο σωρό είναι σχεδόν απαγορευτική, λόγω μη ικανού όγκου για την κάλυψη του συνολικού αριθμού των απαιτούμενων δειγμάτων.
- Ο σωρός που ελέγχεται μέσω της δειγματοληψίας θα πρέπει να παραμείνει στην ίδια θέση μέχρι να εξαχθούν τα αποτελέσματα αυτής. Επίσης, είναι πολύ πιθανό δύο σωροί που έχουν προκύψει από διαδοχικές ανατινάξεις να εμφανίζουν πολύ σημαντικές διαφοροποιήσεις.
- Όταν είναι δυνατή η πραγματοποίηση της οπτικής τεχνικής, αυτή συνήθως προτιμάται λόγω της δυνατότητας εξαγωγής άμεσων αποτελεσμάτων χωρίς την παραμικρή καθυστέρηση της παραγωγής.
- Το κόστος διενέργειας δειγματοληψίας και χημικής ανάλυσης είναι υψηλό, κάτι που όμως αντισταθμίζεται από την σημαντική ακρίβεια των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν.

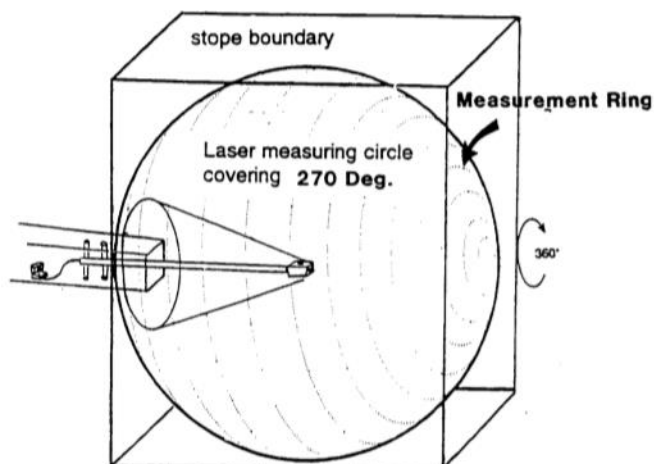
Πέραν της περιεκτικότητας του αποληφθέντος υλικού σε χρήσιμο και άγονο υλικό αντίστοιχα κατά τον έλεγχο του φαινομένου των προσμίξεων είναι πολύ σημαντική η κατανόηση της συμπεριφοράς του μετώπου και η παρακολούθηση των συνθηκών που επικρατούν σε αυτό. Κατ' αυτό το τρόπο έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι ελέγχου των συνθηκών του μετώπου εξόρυξης με μία από αυτές, η παρακολούθηση των κατακρημνίσεων των τοιχωμάτων του μετώπου, να κρίνεται ως μία από τις σημαντικότερες. Με σκοπό την μετατροπή της παρακολούθησης αυτής σε μία αυτοματοποιημένη διαδικασία, γεγονός που θα ήταν ιδιαίτερα ευεργετικό προς την ασφάλεια των εργαζομένων που πλέον δεν θα ήταν σε θέση να εισέρχονται εντός του πιθανώς επισφαλούς μετώπου εξόρυξης, δημιουργήθηκαν συστήματα αυτόματης παρακολούθησης μετακινήσεων μη επαφής τύπου laser όπως το Cavity Monitoring System (CMS). Τυπική εικόνα αποτύπωσης του συστήματος αυτού δίδεται στην ακόλουθη Εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18: Αποτύπωση ορίων μετώπου εξόρυξης και ορίων υπερεκσκαφής με την τεχνική CMS (Jang, 2014)

Το σύστημα παρακολούθησης κοιλοτήτων (CMS) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά μέσα από μία από κοινού συνεργασία των Noranda Technology Centre (NTC) and OPTECH Systems, Canada (Miller et al, 1992). Το σύστημα αυτό συνδυασμένο με λογισμικό 3D χαρτογράφησης και σχεδιασμού μεταλλείων σε H/Y είναι η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη πρακτική για την κάλυψη των δεδομένων έρευνας της διαδικασίας ελέγχου αραίωσης (Jarosz & Shepherd, 2000).

Το CMS χρησιμοποιεί μία κεφαλή laser, η οποία έχει την δυνατότητα περιστροφής κατά 360 μοίρες σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονά του και 270 μοίρες παράλληλα προς αυτόν τον άξονα (βλ. Εικόνα 2.19) (Germain & Hadjigeorgiou, 1997). Επιπροσθέτως, έχει την ικανότητα καταγραφής για αποστάσεις έως και 100 μέτρα χωρίς τη χρήση ανακλαστήρων. Σε μία τυπική έρευνα μπορεί να παράσχει έως και 50.000 σημεία για να καθορίσει ένα τρισδιάστατο πλέγμα που μπορεί να εισαχθεί σε ένα υπολογιστικό σύστημα με τη βοήθεια υπολογιστή.



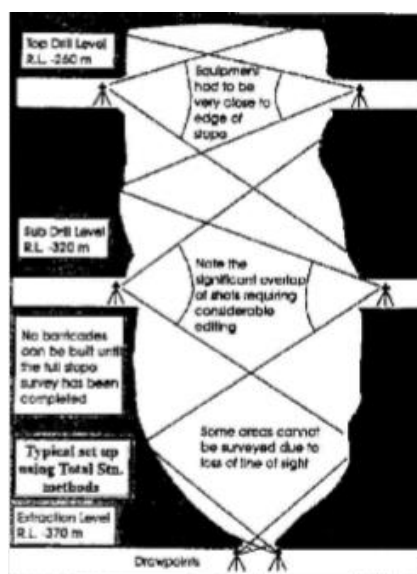
Εικόνα 2.19: Λεπτομέρειες δυνατοτήτων μέτρησης CMS (Clark L. , 1998)

Με σκοπό την πραγματοποίηση μίας διερευνητικής σάρωσης ο βραχίονας με την κεφαλή σάρωσης εισάγεται στο μέτωπο σε μια θέση όπου το περίγραμμα του κενού είναι ορατό και μπορεί να ελεγχθεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.20 (Jarosz & Shepherd, 2000).



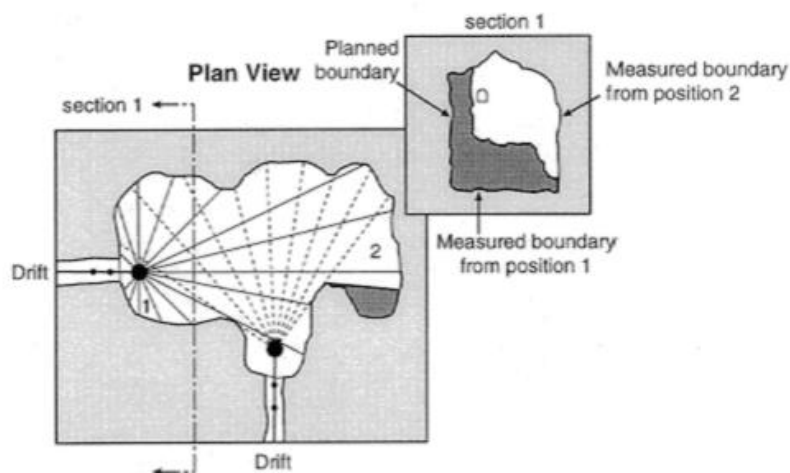
Εικόνα 2.20: Τοποθέτηση CMS εντός του εξεταζόμενου μετώπου (Jarosz & Shepherd, 2000)

Η συμβατική χρήση της μεθόδου πραγματοποιείται σε ανοικτά μέτωπα εξόρυξης. Σε αρκετές περιπτώσεις η εφαρμογή αυτής της τεχνικής κρίθηκε ως αδύνατη είτε λόγω της σημαντικής αστάθειας των μετώπων είτε λόγω μη δυνατής προσέγγισης αυτών (Jarosz & Shepherd, 2000). Επιπροσθέτως η διαδικασία της ακριβούς τοποθέτησης του συστήματος, η λήψη των δεδομένων και η εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων είναι μία αρκετά επίπονη διαδικασία και προκαλεί σημαντικές καθυστερήσεις στην παραγωγική διαδικασία. Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου διαδοχικών ορόφων με ανοικτά μέτωπα ο εξοπλισμός συχνά πρέπει να τοποθετείται πολύ κοντά στην άκρη κάθε ορόφου, ενώ κάθε κενό μέτωπο δύναται να προσεγγιστεί από δύο έως και οκτώ εγκάρσιες διόδους (Εικόνα 2.21).



Εικόνα 2.21: Συμβατική εφαρμογή της τεχνικής σε ανοικτά μέτωπα (Jarosz & Shepherd, 2000)

Η εφαρμογή της μεθόδου ενέχει επίσης και ορισμένους περιορισμούς. Όπως αναφέρει ο Clark (1998) ο σαρωτής μπορεί να μετρήσει μόνο ότι μπορεί να “δει”, ένα γεγονός που συντελεί στο να μην υπολογίζονται περιοχές του μετώπου, οι οποίες δεν γίνονται ορατές από των σαρωτή. Για το σκοπό απαλοιφής του περιορισμού της οπτικής ευχαίριας, απαιτείται πολλαπλή πρόσβαση στον εξορυκτικό χώρο ώστε να εξασφαλιστεί αντιπροσωπευτική κάλυψη των επιφανειών, όπως γίνεται αντιληπτό στην Εικόνα 2.22 (Germain & Hadjigeorgiou , 1997).



Εικόνα 2.22: Ερμηνεία των περιορισμών του CMS (Germain & Hadjigeorgiou , 1997)

Ο Clark (1998) μέσα από την μελέτη του αναφέρει ορισμένες συνήθεις δυσμενείς συνθήκες εντός του υπογείου μεταλλευτικού χώρου, οι οποίες μπορούν να συντελέσουν στον περιορισμό της γραμμής φωτός, δηλαδή της ορατής απόστασης από τον σαρωτή. Οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

- Ύπαρξη λεπτομερούς λασπώδους υλικού, το οποίο καλύπτει ορισμένα τοιχώματα και πιθανώς αυξάνει την ευστάθειά του.
- Ύπαρξη κάποιου επικρεμάμενου πλέγματος στα τοιχώματα ή πίσω από αυτά.
- Ύπαρξη καλωδίων στα τοιχώματα ή πίσω από αυτά.
- Εμφάνιση αυξημένων ποσοτήτων σκόνης εντός του μετώπου ή ορισμένων παρεμβολών μεγάλων όγκων πετρώματος.
- Εμφάνιση ανομοιογενειών στην μορφή του κενού μετώπου.

2.8 Επίδοση μετώπου εξόρυξης

Σύμφωνα με τους Ceruritis & Villaescusa, 2006, τα δύο βασικά φυσικά κριτήρια αξιολόγησης της επίδοσης ενός μετώπου εξόρυξης είναι ο όγκος του υπερθραυσμένου πετρώματος, δηλαδή του υλικού που έχει προέλθει από την θραύση εκτός των προσχεδιασμένων ορίων του μετώπου

και ο όγκος του υποσκαμμένου πετρώματος, δηλαδή του ποσοστού της συνολικής εκσκαφής που έχει παραμείνει στην αρχική του θέση μετά το πέρας της εξορυκτικής διαδικασίας.

Πλήθος παραγόντων επηρεάζουν την επίδοση ενός ανοικτού μετώπου, οι βασικοί εκ των οποίων είναι οι εξής (Cepuritis & Villaescusa, 2006):

- Η γεωμετρία του μετώπου εξόρυξης (μέγεθος, σχήμα, προσανατολισμός)
- Η θέση της υπάρχουσας εκμετάλλευσης
- Τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της περιοχής ενδιαφέροντος
- Οι εντατικές συνθήκες
- Οι γεωλογικοί σχηματισμοί μεγάλης εξάπλωσης
- Τα μέτρα ενίσχυσης της αντοχής των μετώπων εξόρυξης
- Η διαδικασίες διάτρησης και ανατίναξης
- Τα χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα

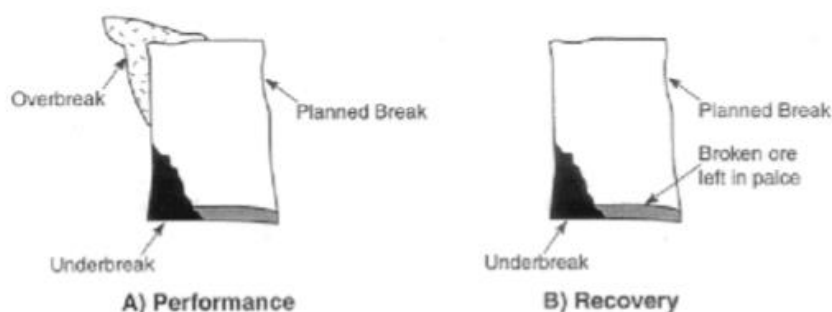
Η μαθηματική έκφραση της επίδοσης του μετώπου σύμφωνα με τους Germain και Hadjigeorgiou (1997) είναι η εξής:

$$\text{Επίδοση} = 1 - \frac{\text{Υπερεκσκαφή (m}^3\text{)} + \text{Υποσκαφή (m}^3\text{)}}{\text{Αναμενόμενη Θραύση (m}^3\text{)}}$$

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί η διαφοροποίηση που εμφανίζεται μεταξύ των όρων της επίδοσης και της ανάκτησης (βλ. Εικόνα 2.23). Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην ποσότητα του μεταλλεύματος, η οποία φορτώνεται και απομακρύνεται έξω από τα αρχικώς προκαθορισμένα όρια του μετώπου, και η μαθηματική της έκφραση είναι η εξής :

Ανάκτηση

$$= \frac{\text{Αναμενόμενη Θραύση (m}^3\text{)} - \text{Υποσκαφή (m}^3\text{)} - \text{Παραμένον insitu μετάλλευμα (m}^3\text{)}}{\text{Αναμενόμενη Θραύση (m}^3\text{)}}$$



Εικόνα 2.23: Ορισμός επίδοσης και ανάκτησης (Germain & Hadjigeorgiou, 1997)

2.9 Τεχνικές Back Analysis της επίδοσης ανοικτών μετώπου

2.9.1 Εισαγωγή

Κατά την ενότητα 2.8 αναλύθηκε το ζήτημα της επίδοσης του μετώπου εξόρυξης και η σημαντικότητα εξέτασης αυτής. Η εφαρμογή τεχνικών back analysis για την εξέταση της επίδοσης των κενών μετώπων εξόρυξης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο προς τον έλεγχο της αραίωσης (Cepuritis et. al, 2010). Πιο συγκεκριμένα, δίδεται η δυνατότητα κατανόησης των μηχανισμών που επιδρούν στην επίδοση, ενώ μπορούν τόσο να αξιολογηθεί η καταλληλότητα των αρχικών υποθέσεων, συντελώντας τελικώς στην εξαγωγή νέων ιδανικότερων προσεγγίσεων του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η επίδοση ενός εξορυκτικού χώρου καθορίζεται από την ικανότητα επίτευξης της μέγιστης απόληψης του μεταλλεύματος και του ελάχιστου ποσοστού πρόσμιξης σε αυτόν (Cepuritis & Villaescusa, 2006). Οι τυπικές τεχνικές back analysis που χρησιμοποιούνται είναι οι εμπειρικές προσεγγίσεις των μεθόδων του Stability Graph (βλ. Κεφάλαιο 3^ο), οι οποίες όμως φέρουν ένα σχετικό περιορισμό στην ικανότητα αναγνώρισης και ποσοτικοποίησης της συνεισφοράς των επιμέρους παραγόντων στην επίδοση της εκσκαφής. Πληθώρα τεχνικών έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την κατανόηση της επίδρασης των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η επίδοση του μετώπου εξόρυξης. Το αποτέλεσμα των τεχνικών αυτών σε αρκετές περιπτώσεις ήταν ορισμένες από τις ειδικές τροποποιημένες μορφές του διαγράμματος ευστάθειας που αναλύονται στο τρίτο κεφάλαιο.

2.9.2 Παράδειγμα Εφαρμοζόμενης Μεθοδολογίας

Οι Cepuritis και Villaescusa (2006) πρότειναν μία μεθοδολογία με σκοπό να συντελέσουν στην επαλήθευση ή στον επαναπροσδιορισμό μίας υπόθεσης εξετάζοντας την σχετική συνεισφορά διαφόρων παραγόντων και της επίδρασής τους στην επίδοση του κενού μετώπου εξόρυξης. Η μεθοδολογία αυτή δύναται να χρησιμοποιήσει ως δεδομένα, παραδείγματος χάριν, τα εξής αποτελέσματα:

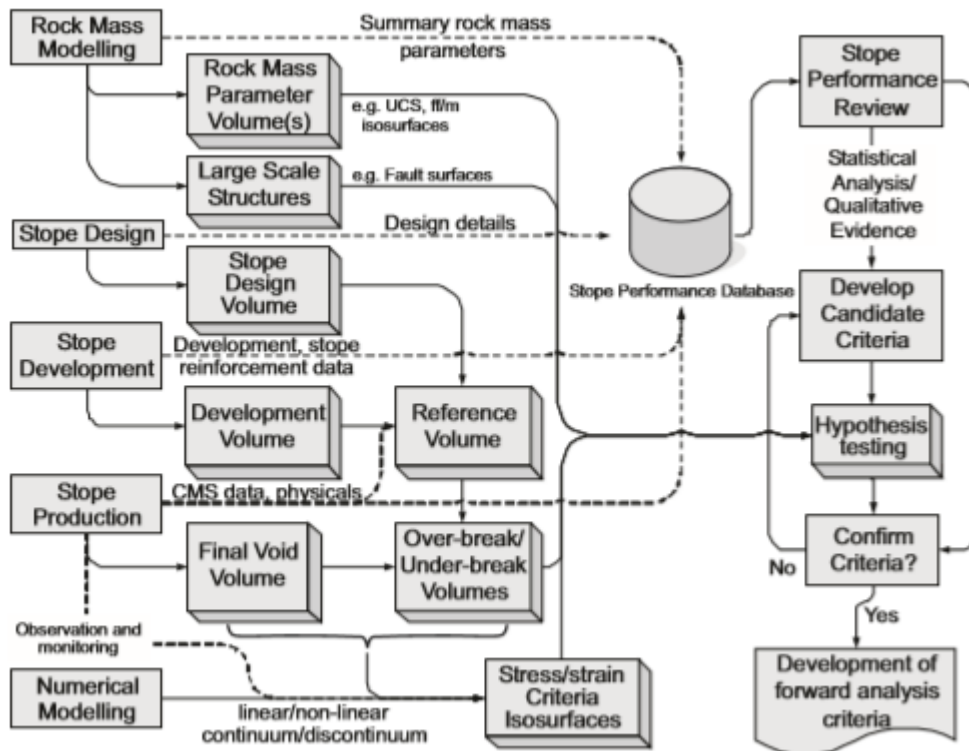
- Κριτήρια που έχουν προκύψει από αριθμητική μοντελοποίηση
- Αποτελέσματα ανάλυσης υπέρθραυσης και υποσκαφής
- Μοντελοποίηση μεγάλου εύρους γεωλογικών σχηματισμών της εξεταζόμενης περιοχής
- Αποτελέσματα μοντελοποίησης της ποιότητας της βραχόμαζας

Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην δυνατότητα διερεύνησης των επικρατούντων συνθηκών του πετρώματος γύρω από την εκσκαφή, με σκοπό να προσδιοριστούν κάποιες περιοχές, οι οποίες έχουν μεγάλη πιθανότητα να αστοχήσουν οδηγώντας στην υπέρθραυση του μετώπου, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορα κριτήρια. Η μεθοδολογία αυτή εμφανίζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων εμπειρικών προσεγγίσεων, το οποίο είναι η δυνατότητα διενέργειας ταυτόχρονης εξέτασης διαφόρων υποψήφιων κριτηρίων αστοχίας. Τέλος, λαμβάνεται υπόψιν και η χωρική μεταβλητότητα που εμφανίζουν οι διάφορες παράμετροι της βραχώμαζας.

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Ceruritis και Villaescusa (2006), δημιουργούνται “υπονοούμενες” επιφάνειες σύμφωνα με τις συναρτήσεις ακτινικής βάσης ώστε να ικανοποιούνται ένα ή παραπάνω συγκεκριμένα κριτήρια αστοχίας. Οι “υπονοούμενες” επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές διαδικασίες ανάλυσης, όπως στις αναλύσεις υπέρθραυσης και υποσκαφής. Πρακτικά, τα αποτελέσματα που λαμβάνεται από αυτήν την διαδικασία ανάλυσης είναι η απεικόνιση της αναμενομένης μορφής των επιφανειών του μετώπου εξόρυξης μετά το πέρας της εξορυκτικής διαδικασίας.

2.9.3 Διάγραμμα διεργασιών back analysis της επίδοσης του μετώπου εξόρυξης

Όπως γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 2.24 που ακολουθεί η διαδικασία βασίζεται αρχικά στην συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων και αποτελεσμάτων από την ανάλυση των γεωμηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας και των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται και αφορούν τους όγκους υπερεκσκαφής και υποσκαφής. Εν συνεχεία προστίθενται και τα δεδομένα που προκύπτουν από τις αριθμητικές επιλύσεις, οι οποίες βασίζονται σε συγκεκριμένα κριτήρια, με βάση τα οποία προκύπτουν και ορισμένα αποτελέσματα. Όλα τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί επεξεργάζονται με σκοπό να γίνει η επαλήθευση ή μη του ή των επιλεγμένων κριτηρίων που έχουν τεθεί εξ αρχής. Με αυτό το τρόπο σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται τα αρχικά κριτήρια, τότε αυτά ανασχηματίζονται και σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί η επαλήθευση τότε εν συνεχεία αναπτύσσονται νέα κριτήρια σύμφωνα με ανάλυση προς τα εμπρός (forward analysis).



Εικόνα 2.24: Διάγραμμα διεργασιών back analysis (Cepuritis, Villaescusa, Beck, & Varden, 2010)

2.9.4 Εφαρμογή των τεχνικών της back analysis

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία διαδικασία back analysis, η οποία έχει ως απώτερο στόχο την εξαγωγή μίας σχέσης εκτίμησης του αναμενόμενου ποσοστού αραίωσης, σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης επιφάνειας και τον δείκτη ευστάθειας αυτής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αποτελέσματα αναλύσεων από εμπειρικά διαγράμματα ευστάθειας, τα οποία συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων.

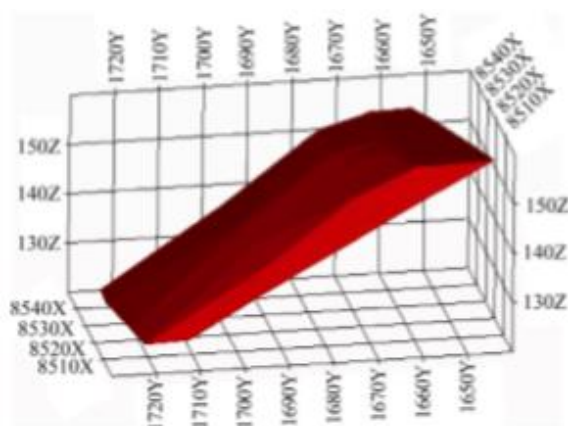
2.10 Έλεγχος και προεξέταση των προσμίξεων πριν την εκμετάλλευση

Ακόμη και πριν την έναρξη της εξορυκτικής διαδικασίας είναι αρκετά ουσιώδες να εξεταστεί το φαινόμενο των προσμίξεων ώστε να προκύψει ένα αρχικό επίπεδο αναμενόμενης αραίωσης στο τελικό εξαχθέν υλικό, εφόσον φυσικά δεν μπορεί να αποφευχθεί εντελώς, γεγονός πρακτικά αδύνατον.

Τα βασικά στοιχεία του ελέγχου αυτού βασίζονται στη γεωλογική και γεωτεχνική μελέτη και στην χρήση κατάλληλων εργαλείων υπολογισμού του δείκτη ευστάθειας, τα οποία θα οδηγήσουν στην όσο το δυνατόν καλύτερη οριοθέτηση του κοιτάσματος και σχεδιασμού της εκμετάλλευσης.

Αναφορικά με τα εργαλεία υπολογισμού ευστάθειας επισημαίνεται η πολύ σημαντική χρήση του stability graph (βλ. κεφάλαιο 3^ο), ως ένα μέσο πρόβλεψης της ευστάθειας επιφανειών του μετώπου εξόρυξης. Με βάση αυτήν την πρόβλεψη μπορούν να πραγματοποιηθούν ορισμένες διορθωτικές κινήσεις, ώστε να αυξηθεί ο βαθμός ευστάθειας της διάνοιξης και ο συντελεστής ασφαλείας αυτού αλλά και να περιοριστούν φαινόμενα αραίωσης.

Η γεωλογική μελέτη για την οριοθέτηση του προς εκμετάλλευση μεταλλεύματος είναι πάρα πολύ σημαντική, γι' αυτό και η κατασκευή δισδιάστατων και τρισδιάστατων γεωλογικών μοντέλων είναι πολύ συχνό και βοηθητικό φαινόμενο. Για την λήψη των γεωλογικών δεδομένων δύνανται να χρησιμοποιηθούν αρκετές πηγές, όπως για παράδειγμα γεωτρητικά δεδομένα, τα οποία αποτελούν και την βασικότερη πηγή γεωλογικών δεδομένων, γεωφυσικά δεδομένα κλπ. Κατ' αυτό το τρόπο τα γεωλογικά δεδομένα συλλέγονται, επεξεργάζονται και συνήθως μέσω της χρήσης ειδικού λογισμικού εξάγονται γεωλογικά μοντέλα απεικόνισης της μεταλλοφορίας στον χώρο (βλ. Εικόνα 2.25).

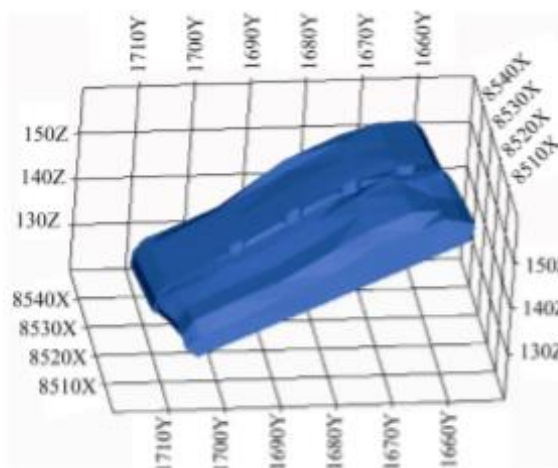


Εικόνα 2.25: Παράδειγμα κατασκευής γεωλογικού μοντέλου (Wang, Huang, Wu, & Ma, 2011)

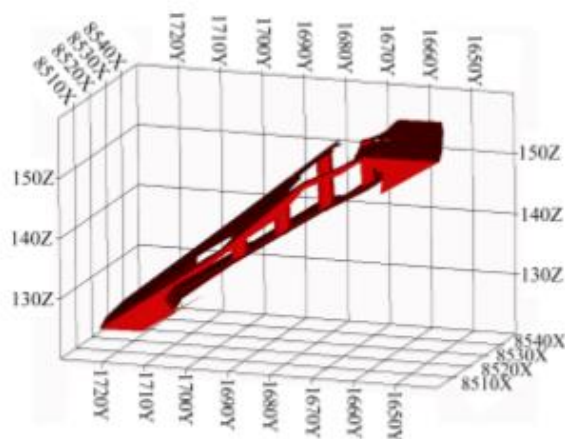
Ιδιαίτερης σημασίας κρίνεται και η διενέργεια γεωτεχνικής μελέτης. Κατά τα αρχικά στάδια σχεδιασμού του μεταλλείου λίγες είναι οι δυνατές ενέργειες που μπορούν να γίνουν προς αυτόν τον σκοπό. Σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται ο δείκτης RQD από τα γεωτρητικά δεδομένα τα οποία λαμβάνονται, ως ένας δείκτης της εντατικής κατάστασης και των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας, αλλά και για την αναγνώριση πιθανών θέσεων εμφάνισης ρηγματώσεων. Για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων απαιτείται η διενέργεια ενός μεγάλου αριθμού διερευνητικών γεωτρήσεων, με σκοπό την συλλογή ενός ικανοποιητικού όγκου δεδομένων. Παρόλα αυτά η συλλογή δεδομένων για τις γεωτεχνικές ιδιότητες της βραχώμαζας συνεχίζεται και κατά την διάρκεια της εξορυκτικής διαδικασίας. Σύμφωνα με τον Laubscher (2000) μια γεωτεχνική μελέτη μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το σύστημα

ταξινόμησης της βραχώμαζας το οποίο περιλαμβάνει και τις παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα, τα οποία λαμβάνονται από την διαδικασία της ανατίναξης.

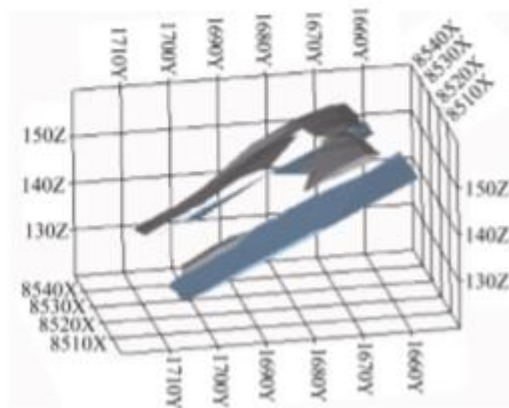
Συσχετίζοντας τα γεωλογικά και τα γεωτεχνικά δεδομένα μπορεί να προσδιοριστεί η βέλτιστη οριοθέτηση του κοιτάσματος και ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης, τα οποία έχουν την δυνατότητα αναθεώρησης και επιδιόρθωσης, μετά από την συλλογή νέων δεδομένων που προκύπτουν από την προχώρηση του σχεδιασμού της εξορυκτικής διαδικασίας. Με βάση τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης δύνανται να κατασκευαστούν και άλλα χρήσιμα μοντέλα, όπως αυτά του αποληφθέντος και του παραμένουτος μεταλλεύματος αλλά και το μοντέλο του στείρου υλικού που αναμένεται να προσληφθεί λόγω της διεύρυνσης των ορίων του μεταλλευτικού έργου έξωθεν των προκαθορισμένων, από τα χαρακτηριστικά της μεταλλοφορίας, σχεδιαστικών ορίων. Στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνες 2.26, 2.27, 2.28) παρατίθενται τα προαναφερθέντα μοντέλα για το γεωλογικό μοντέλο της Εικόνας 2.25.



Εικόνα 2.26: Μοντέλο αποληφθέντος μεταλλεύματος (Wang, Huang, Wu, & Ma, 2011)

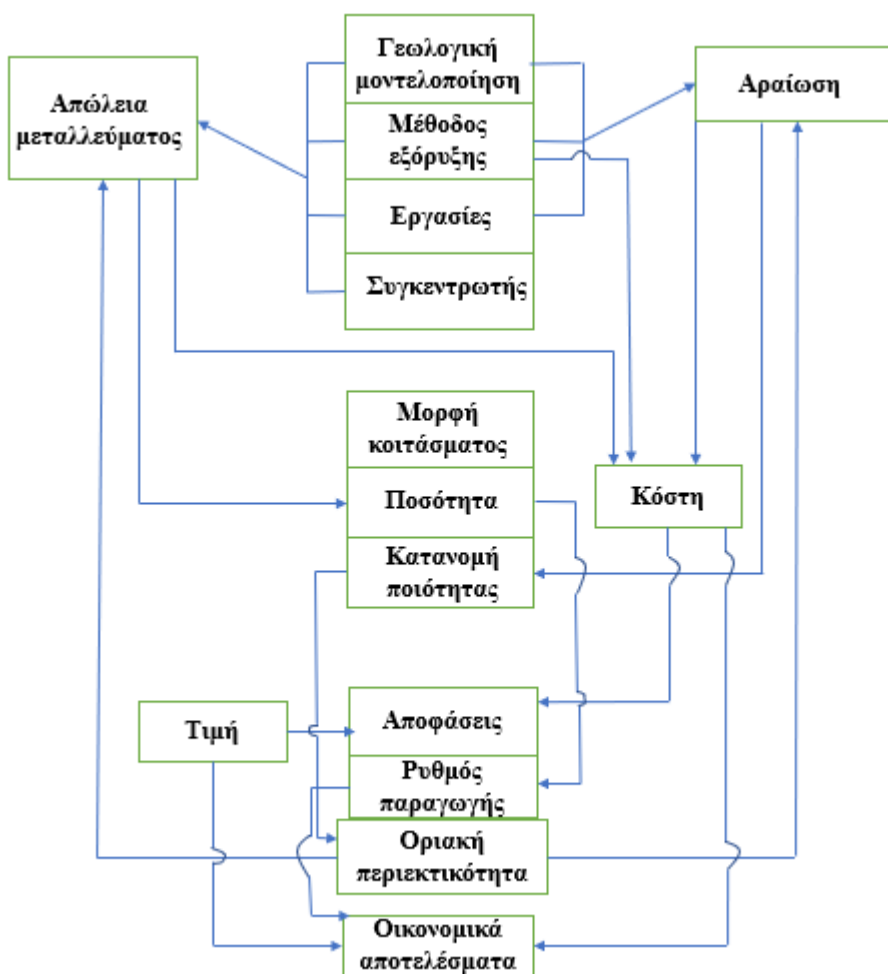


Εικόνα 2.27: Μοντέλο παραμένουτος μεταλλεύματος (Wang, Huang, Wu, & Ma, 2011)



Εικόνα 2.28: Μοντέλο άγονου αποληφθέντος υλικού (Wang, Huang, Wu, & Ma, 2011)

Όπως επισημάνθηκε, πριν την έναρξη της εκμετάλλευσης θα πρέπει να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις σχεδιασμού του έργου, οι οποίες θα έχουν το επιθυμητό αντίκτυπο τόσο στα ποσοστά απώλειας μεταλλεύματος, όσο και στο τελικό κόστος παραγωγής του εξαγόμενου υλικού. Ακολούθως παρατίθεται ένα διάγραμμα συσχέτισης και επιρροής μεταξύ των παραμέτρων, των μεταβλητών και των αποτελεσμάτων των υπολογισμών (Εικόνα 2.29).



Εικόνα 2.29: Μεταφρασμένο διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ παραμέτρων, μεταβλητών και αποτελεσμάτων υπολογισμών (Elbrond, 1994)

2.11 Περιορισμός του φαινομένου των προσμίξεων

Ο περιορισμός των προσμίξεων κατά την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος είναι ένα αρκετά πολύπλοκο ζήτημα. Πολύ σημαντικό ρόλο προς αυτήν την κατεύθυνση έχει η μορφή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος αλλά και η μέθοδος εκμετάλλευσης, η οποία εφαρμόζεται για την εξαγωγή του. Όλες οι μέθοδοι πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη αραίωση του χρήσιμου αποληπτόμενου υλικού, καθώς εφόσον αυτή δεν μπορεί να αποφευχθεί, αναγκαίο κρίνεται να ελαχιστοποιηθεί (Suglo & Orok, 2012). Εκλεκτικές μέθοδοι όπως εκείνες των θαλάμων και στύλων, κοπών και λιθογομώσεων έχουν την ικανότητα πλήρης ανάκτησης του κοιτάσματος και την ίδια στιγμή ελέγχου της αραίωσης (Villaescusa, 1998). Στην περίπτωση αρκετά μεγάλων κοιτασμάτων ομοιόμορφης κατανομής δύνανται να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία μέθοδοι διαδοχικών ορόφων με κατακρήμνιση ή ανοικτού μετώπου. Σχεδόν μέγιστα επίπεδα απόληψης μπορούν να επιτευχθούν με την συνδυαστική χρήση υλικού λιθογομώσεως, προσδίδοντας παράλληλα και υψηλότερα επίπεδα ευστάθειας. Στις περιπτώσεις ανοικτών μετώπων η ευαισθησία στην αραίωση είναι αρκετά υψηλή, ιδιαίτερα στις διεπαφές μεταξύ του μητρικού πετρώματος και το δάπεδο και την οροφή του μετώπου. Επίσης προβλήματα εξωτερικής αραίωσης μπορούν να προκύψουν και λόγω αστάθειας της στέψης του μετώπου εξόρυξης. Σύμφωνα με τον Elbrond (1994) τίθεται ένα πολύ σημαντικό δίλημμα μεταξύ μίας μεθόδου, η οποία θα επιτρέψει την απόληψη μεγάλων ποσοτήτων πετρώματος με ταυτόχρονα χαμηλό κόστος εξόρυξης, η οποία όμως μπορεί να οδηγήσει σε ένα πολύ υψηλό βαθμό πρόσμιξης.

Κατά τους Suglo & Orok (2012) βασικός παράγοντας στην παρεμπόδιση της αραίωσης αποτελεί η καλή γεωλογική και γεωτεχνική ερμηνεία του κοιτάσματος και του μητρικού πετρώματος. Υπό αυτήν την συνθήκη απαιτείται προσδιορισμός της εσωτερικής αραίωσης και καλή εναρμόνιση των τοιχωμάτων του μετώπου εκσκαφής με τα φυσικά όρια του κοιτάσματος. Επιπροσθέτως, πολύ σημαντική είναι η ανάπτυξη μίας ορθής στρατηγικής απόληψης. Για αυτόν τον σκοπό σύμφωνα με τον Villaescusa (1998), πριν την οριστικοποίηση της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί, θα πρέπει να έχει προηγηθεί μία δοκιμαστική περίοδος που θα αφορά την επιθεώρηση των σημείων απόληψης σε σχέση με την ποιότητα του μεταλλεύματος, τον βαθμό “μόλυνσης” αυτού και την ευστάθεια του μετώπου εξόρυξης.

Επιπροσθέτως, προς τον εξεταζόμενο σκοπό τα εναλλακτικά σχέδια μπορούν να περιλαμβάνουν την τροποποίηση της κλίμακας, του τύπου υποστήριξης, της ακολουθίας εξόρυξης, του ρυθμού εξόρυξης και της γεωμετρίας του μετώπου ώστε να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός σχεδιασμός (Suglo & Orok, 2012). Κατά τον Butcher (2002), η μείωση

της αραίωσης μπορεί να ενισχυθεί μέσω της αποφυγής απόληψης τμημάτων μεταλλεύματος με εξαιρετικά χαμηλά μηχανικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, καθώς ελαχιστοποιούνται τα επίπεδα πλευρικής και εσωτερικής αραίωσης. Τέλος, οι πλευρικές προσμίξεις δύνανται να περιοριστούν σε μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποιώντας καλύτερες τεχνικές διάτρησης και ανατίναξης (Dominy et al, 1997).

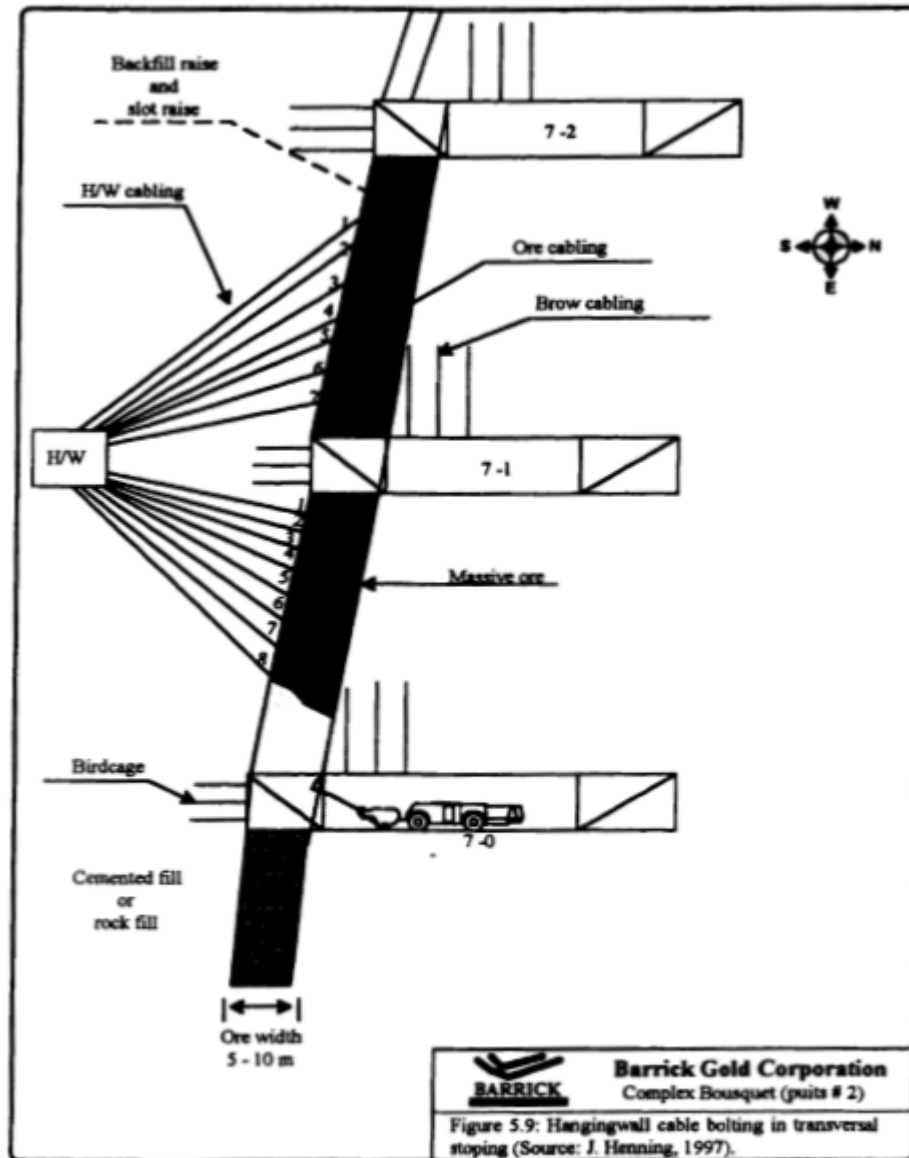
Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν ακόμη να γίνουν αρκετές ενέργειες με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της αραίωσης. Ο Crawford (2004) εκτός των άλλων αναφέρει ότι πολύ σημαντικά ζητούμενα είναι η εμπειριστατωμένη ενημέρωση του προσωπικού για τις απαιτήσεις αλλά και την εκπαίδευση πάνω σε αυτά τα θέματα, με σκοπό την κατανόηση των αρνητικών επιπτώσεων που θα επιφέρει η αύξηση της περιεκτικότητας του παραγόμενου υλικού σε άγονο. Τέλος, θα ήταν αρκετά σημαντική η θεσμοθέτηση επιβραβεύσεων σε θέματα προσμίξεων, θέτοντας συνεχώς στόχους περιεκτικότητας σε άγονο υλικό.

Με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου των προσμίξεων, συχνή είναι η χρήση ορισμένων μέσων υποστήριξης – ενίσχυσης του μετώπου. Αρκετά συνήθως κρίνεται η χρήση συρματόσχοινων, τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε όλα τα τοιχώματα του μετώπου. Η εφαρμογή τους δημιουργεί ζώνες υψηλής ενίσχυσης της βραχόμαζας, οι οποίες θα συντελέσουν στην μείωση των καθιζήσεων και των καταπτώσεων (Diakité, 1998).

Σύμφωνα με τον Diakité (1998) οι παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση των συρματόσχοινων ενίσχυσης αλλά δεν μπορούν να ελεγχθούν είναι ορισμένες επιδράσεις οφειλόμενες στην εξορυκτική διαδικασία αλλά και οι γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες της βραχόμαζας. Οι παράγοντες που επιδέχονται ρυθμίσεως και ελέγχου είναι οι εξής:

- Το υλικό ενεμάτωσης : Η αναλογία νερού και τσιμέντου στο ένεμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των τοιχωμάτων της διάτρησης και των αγκυρίων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή αυτού.
- Εξαρτήματα επαφής : Η χρήση κατάλληλων εξαρτημάτων συγκράτησης των συρμάτων, συνήθως σε στοές διανοιγμένες ακριβώς για αυτόν τον σκοπό, είναι πολύ σημαντική ώστε αυτά να συγκρατούνται πακτωμένα στην ίδια θέση και να μειώνεται εν γένει και η πυκνότητα τοποθέτησης αυτών.
- Διαμόρφωση αγκυρίων με συρματόσχοινα : Αυτός ο παράγοντας περιλαμβάνει τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγκυρίου, όσο και όλα τα στοιχεία που εμπίπτουν στην διάτρηση και την διαμόρφωση αυτού.
- Αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών αγκυρώσεων και προσανατολισμός

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 2.30) παρουσιάζεται μία τυπική εφαρμογή των αγκυρίων με συρματόσχοινα σε ένα μεταλλείο, που εφαρμόζεται η μέθοδος εκμετάλλευσης με διαδοχικούς υποορόφους με κενά μέτωπα, τοποθετημένα στην οροφή του μετώπου εξόρυξης.



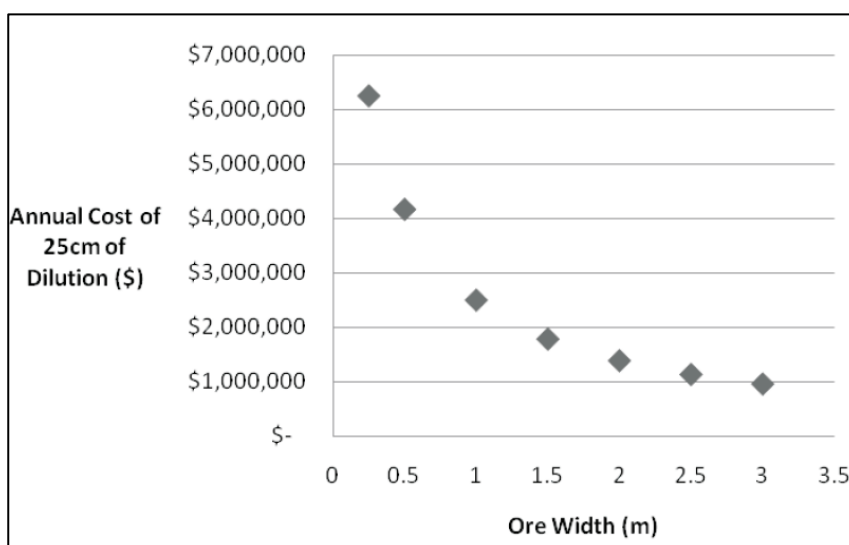
Εικόνα 2.30: Εφαρμογή αγκυρίων με καλώδια στην οροφή του μετώπου (Henning, Gauthier, & Ruest, 1997)

2.12 Ανάλυση οικονομικών επιπτώσεων αραίωσης μεταλλεύματος

Η αραίωση του μεταλλεύματος όπως ήδη έχει επισημανθεί, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, χαμηλώνοντας την οικονομική αξία του παραγόμενου προϊόντος, αυξάνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής και εν συνεχεία το κόστος της μετέπειτα επεξεργασίας. Παρόλα αυτά το απόλυτο κόστος της επιρροής που επιφέρει το φαινόμενο της αραίωσης δύσκολα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι η αραίωση επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό μαζί με την απώλεια μεταλλεύματος τόσο την τιμή

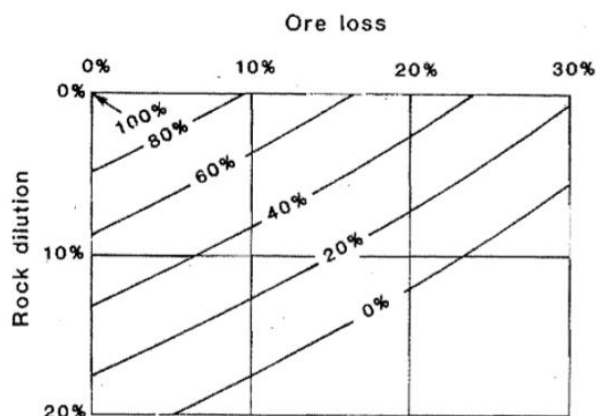
πώλησης του τελικού προϊόντος, όσο και έμμεσα τα λειτουργικά κόστη της επιχείρησης λόγω των απαιτούμενων μέσων υποστήριξης, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν για τον περιορισμό του φαινομένου.

Κατά τους Stewart και Trueman (2008) το τυπικό κόστος της αραίωσης σε στενά φλεβικά κοιτάσματα ανέρχεται περί των 25 AUD ανά τόνο παραγόμενου τελικού προϊόντος, με αυτό το κόστος να διαχωρίζεται σε 7AUD/t για τις εργασίες φόρτωσης και μεταφοράς και 18 AUD/t για τις εργασίες δευτερογενούς θραύσης και λειοτρίβησης. Θεωρώντας ετήσια παραγωγή 500.000 τόνων μεταλλεύματος και ένα τυπικό πάχος 0,25 m προσμίξεων παρατηρείται η αύξηση του κόστους πρόσμιξης καθώς το πλάτος της φλέβας μειώνεται (βλ. Εικόνα 2.31).



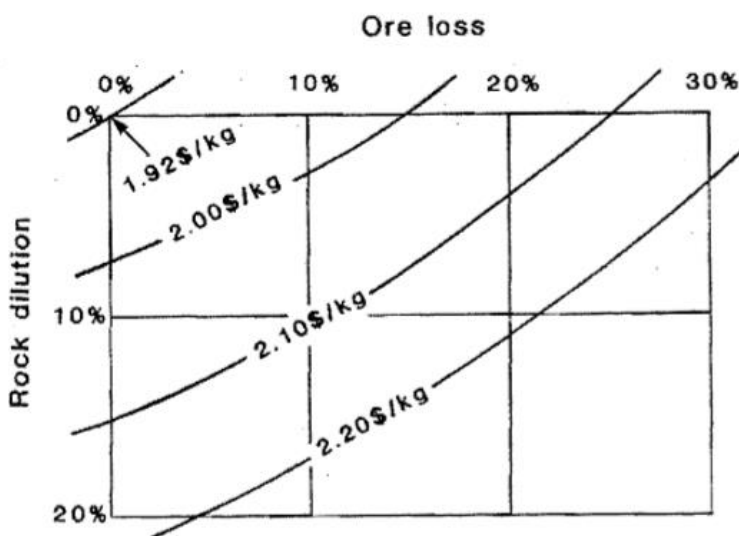
Εικόνα 2.31: Ετήσιο λειτουργικό κόστος για 25cm πρόσμιξης σε εκμετάλλευση συνήθους στενής φλεβικής μεταλλοφορίας (Stewart & Trueman, 2008)

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, τα εξεταζόμενα φαινόμενα επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την καθαρή παρούσα αξία του παραγόμενου μεταλλεύματος (βλ. Εικόνα 2.32) όσο και το συνολικό κόστος παραγωγής του τελικού προϊόντος (βλ. Εικόνα 2.33), δηλαδή του μετάλλου (ή μετάλλων) ενδιαφέροντος στις περισσότερες περιπτώσεις (Elbrond, 1994).



Εικόνα 2.32: Εμπειρικό διάγραμμα υπολογισμού Καθαρής Παρούσας Αξίας Μεταλλεύματος (Elbrond, 1994)

Η προηγούμενη εικόνα (Εικόνα 2.32), αποτελεί ένα εμπειρικό διάγραμμα υπολογισμού της ΚΠΑ, η οποία λαμβάνει ως την μέγιστη δυνατή επιτεύξιμη καθαρή παρούσα αξία τα 42,5M\$. Όπως παρατηρείται από την εικόνα αυτή, η ΚΠΑ δύναται να μειωθεί έως και κατά 50% της μέγιστης δυνατής προσεγγίσιμης τιμής της σε περίπτωση εμφάνισης μόνο 20% απώλειας μεταλλεύματος ή εμφάνισης μόνο 10% αραίωσης αυτού ή ακόμη και σε συνδυασμό αυτών με ποσοστά 10% και 5% αντιστοίχως.



Εικόνα 2.33: Εμπειρικό διάγραμμα υπολογισμού κόστους παραγωγής τελικού προϊόντος (μετάλλου) (Elbrond, 1994)

Η Εικόνα 2.33 αποτελεί ένα εμπειρικό διάγραμμα υπολογισμού του κόστους παραγωγής του χρήσιμου συστατικού, θεωρώντας ελάχιστη τιμή παραγωγής τα 1.92 \$/kg . Μέσα από την εικόνα αυτή αντικατοπτρίζεται άμεσα η αύξηση της τιμής παραγωγής του χρήσιμου συστατικού σχετιζόμενη μόνο με την απώλεια αποληπτόμενης ποσότητας μεταλλεύματος και πρόσμιξης αυτού. Χάριν παραδείγματος αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην εικόνα αναμένεται αύξηση της τιμής παραγωγής κατά 20% σε

περίπτωση εμφάνισης μόνο 20% απώλειας μεταλλεύματος ή εμφάνισης μόνο 10% αραίωσης αυτού ή ακόμη και σε συνδυασμό αυτών με ποσοστά 10% και 5% αντιστοίχως.

Με σκοπό τον περιορισμό της εμφάνισης προσμίξεων στην μάζα του αποληφθέντος μεταλλεύματος, ιδίως σε περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδων εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα, συνήθης είναι η χρήση μέτρων υποστήριξης με ικανότητα ενίσχυσης εξαρτώμενη των μηχανικών ιδιοτήτων του περιβαλλόντος σχηματισμού. Κατ' αυτό το τρόπο σε περίπτωση όπου αναμένονται μεγαλύτερα ποσοστά αστάθειας των τοιχωμάτων του μετώπου τα μέτρα υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι πιο ενισχυμένα από την περίπτωση όπου δεν αναμένονται να αντιμετωπιστούν μεγαλύτερα ζητήματα αστάθειας.

Επιπλέον, το τελικό ποσοστό αραίωσης που επιτυγχάνεται από την εξορυκτική διαδικασία έχει σημαντικό αντίκτυπο σε πλείστες ιδιότητες του μεταλλεύματος αλλά και σε χαρακτηριστικά του ίδιου του μεταλλείου. Στην Εικόνα 2.34 κατά τους Planeta και Bourgoïn (1990) δίδεται ένας πίνακας, ο οποίος παρουσιάζει την μεταβολή ορισμένων ιδιαίτερος σημαντικών παραμέτρων για το μεταλλείο, όπως τα λειτουργικά κόστη, το ετήσιο κέρδος, τα έτη λειτουργίας του μεταλλείου κλπ, με βάση τα ποσοστά αραίωσης του μεταλλεύματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι ενδεικτικά, ενώ ως νομισματική μονάδα αναφέρεται το καναδικό δολάριο και μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον και εγγύτητα παρουσιάζει η μεταβολή που εμφανίζουν τα μεγέθη αυτά σε σχέση με τα παρατηρούμενα επίπεδα πρόσμιξης.

Mining parameters		Baseline	Minimum dilution	Actual dilution
Total dilution (%)	%	0.00	10.0	23.0
Diluted ore grade	g/t	6.00	5.40	4.60
Total tonnage blasted	t	1.25×10^6	1.25×10^6	1.62×10^6
Drawn tonnage	t	1.19×10^6	1.39×10^6	1.54×10^6
Yearly mining	t/year	0.18×10^6	0.18×10^6	0.18×10^6
Mining Life	years	6.60	7.30	8.60
Gold recovery rate		0.90	0.90	0.90
Yearly revenue	Can\$/year	14.6×10^6	13.1×10^6	11.2×10^6
Baseline operating cost (at Can\$55/tonne)	Can\$/year	9.90×10^6	9.90×10^6	9.9×10^6
Yearly gross profit	Can\$/year	4.68×10^6	3.22×10^6	1.28×10^6
Total gross profit	Can\$	31.0×10^6	23.5×10^6	11×10^6
Discounted gross profit	Can\$	18.8×10^6	13.8×10^6	5.98×10^6
Allowable unit operating cost for a constant profit equivalent to baseline (Can\$ 18.8×10^6)	Can\$/tonne	55.0	48.4	39.7

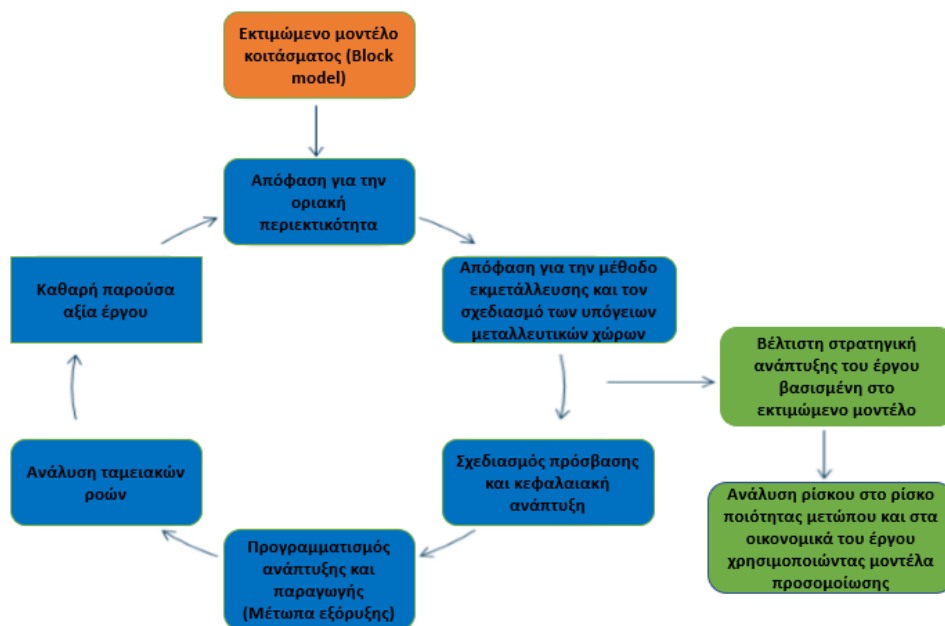
Εικόνα 2.34: Ενδεικτικός πίνακας μεταβολής παραμέτρων σε σχέση με τα ποσοστά αραίωσης (Planeta & Bourgoïn, 1990)

Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί με βάση την προηγούμενη εικόνα ότι με αύξηση των προσμίξεων κατά 13% από το 10% στο 23% παρατηρείται μία μείωση των ετήσιων εξόδων περί του 15%, μία παράταση του χρόνου ζωής του μεταλλείου κατά 18%, ενώ δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση όσον αφορά τα λειτουργικά κόστη.

2.13 Βελτιστοποίηση ανοικτού μετώπου εξόρυξης

2.13.1 Βέλτιστος προγραμματισμός μεταλλείου

Με σκοπό την μείωση απώλειας μεταλλεύματος, ενώ ταυτοχρόνως τα χρήσιμα συστατικά αυτού απευθύνονται ολοένα και σε πιο ευρείες αγορές προϊόντων, κρίνεται αναγκαίος ο σχεδιασμός της ανάπτυξης ενός μεταλλείου να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή οικονομική αποδοτικότητα του κόστους εκμετάλλευσης (Sens, 2011). Ένας τρόπος να επιτευχθεί το ανωτέρω εγχείρημα είναι η βελτιστοποίηση της οικονομικότητας του σχεδιασμού του μεταλλείου, ο οποίος φυσικά ταυτοχρόνως θα εξυπηρετεί και την ασφάλεια και υγιεινή εντός του εργασιακού χώρου. Προς αυτό το σκοπό κατασκευάζονται ειδικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι εξυπηρετούν όλες τις απαιτήσεις που διέπουν τον σχεδιασμό ενός μεταλλευτικού έργου. Ιδιαίτερος, στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας σημαντικό ενδιαφέρον εμφανίζεται στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των μετώπων εξόρυξης, λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του μεταλλεύματος σε ποσοστό προσμίξεων, στοχεύοντας πάντα στην όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση αυτών. Πιο συγκεκριμένα ο έλεγχος της αραίωσης πραγματοποιείται μέσω της επιλογής της κατάλληλης τιμής της οριακής περιεκτικότητας σε χρήσιμο συστατικό. Σύμφωνα με τον Bootsma (2013), πριν την αρχική επιλογή της οριακής περιεκτικότητας, κατασκευάζεται το γεωλογικό μοντέλο του κοιτάσματος, πάνω στο οποίο θα βασιστεί η δημιουργία ενός βέλτιστου σχεδιαστικού πλάνου του μεταλλείου. Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.35) παρουσιάζεται μία τυπική προσέγγιση του προγραμματισμού ενός μεταλλείου περιλαμβάνοντας την μεταγενέστερη ανάλυση κινδύνου, χρησιμοποιώντας μοντέλα προσομείωσης. Η εικόνα αυτή έχει τροποποιηθεί μέσω μετάφρασης των όρων που περιλαμβάνει από την αγγλική γλώσσα. Σύμφωνα με την εικόνα αυτή, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της πιθανότητας ενός μετώπου εξόρυξης συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών να ικανοποιήσει το βασικό κεφάλαιο βάσει της εκτίμησης (ανάλυση κινδύνου) και μια σειρά πιθανών ταμειακών ροών αλλά μπορούν να υπολογιστούν και οι προκύπτουσες καθαρές παρούσες τιμές με σκοπό τον ποσοτικό προσδιορισμό του οικονομικού κινδύνου του έργου. Ο υπολογισμός αυτών των τιμών κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντικότητα, καθώς όπως ήδη έχει επισημανθεί, η τελική επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός μετώπου εξόρυξης και εν γένει τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά ολόκληρου του μεταλλευτικού έργου, καθορίζονται εκτός από την γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά κύριο λόγο από την οικονομική εφικτότητα αυτής της επιλογής.



Εικόνα 2.35: Τυπική προσέγγιση προγραμματισμού υπόγειου έργου εκμετάλλευσης (Bootsma, 2013) (Μεταφρασμένη μορφή)

2.13.2 Βελτιστοποίηση μετώπου εξόρυξης

2.13.2.1 Εισαγωγή

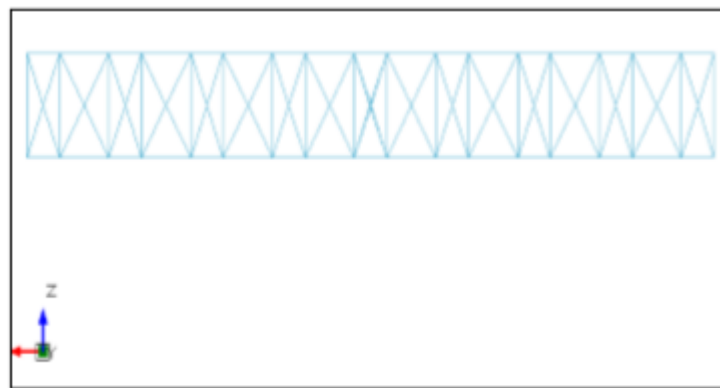
Η βελτιστοποίηση του μετώπου εξόρυξης αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα, κατά το οποίο μία μικρή αλλαγή σε μία από αυτές τις ιδιότητες μπορεί να προκαλέσει σημαντική ανισορροπία στο σύστημα, δηλαδή κατάσταση μειωμένης ευστάθειας στο μέτωπο. Παρόλα αυτά πάντοτε εκτός από το βασικό μέλημα, το οποίο είναι η επίτευξη σημαντικής γεωτεχνικής σταθερότητας και υψηλών επιπέδων ασφαλείας, πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι τελικοί οικονομικοί συντελεστές, με κυριότερους την οριακή περιεκτικότητα και το τελικό κέρδος. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις περισσότερες εξορυκτικές διαδικασίες, η βέλτιστη τιμή της οριακής περιεκτικότητας μπορεί να προσδιοριστεί από τον καθορισμό μερικών διαφορετικών τιμών αυτής της παραμέτρου και εν συνεχεία μέσα από την αξιολόγηση του σχεδιασμού της εξόρυξης να επιλεγεί η καλύτερη επιλογή (Alford & Hall, 2009).

2.13.2.2 Βήματα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με τον Bootsma (2013) ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας περιλαμβάνει τρία στάδια:

- Υπολογισμός μοναδιαίου τεμάχους σε δύο διαστάσεις και αναπαραγωγή αυτού
- Τελικός προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών μετώπου εξόρυξης
- Τελική επεξεργασία

Κατά το πρώτο στάδιο τα βέλτιστα αρχικά σχήματα (τα σχήματα των ‘‘σπόρων’’) των μετώπων και ο σχετικός προσανατολισμός τους στο πλαίσιο βελτιστοποίησης, ενώ τηρούνται οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού (Bootsma, 2013). Στον σκελετό - πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται η ακολουθία πρωτογενών και δευτερογενών μετώπων εξόρυξης σε δύο διαστάσεις, με την τρίτη διάσταση να απομένει προς προσδιορισμό μέσα από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Κάθε ένα από τα μέτωπα, έχει το σχήμα που έχει οριστεί για την μοναδιαία πρόσοψη του εξορυκτικού χώρου (βλ. Εικόνα 2.36). Πιο συγκεκριμένα οι διαστάσεις που ορίζονται είναι το ύψος και το πλάτος, ενώ όσον αφορά το πάχος αυτού, όσο πιο λεπτό είναι τόσο πιο ακριβές μπορεί να θεωρηθεί και το αρχικό δοθέν σχήμα, το οποίο έχει μηδενικό πάχος. Στην Εικόνα 2.36 καθ’ένα από τα ορθογώνια που απεικονίζονται αποτελούν τα μέτωπα εξόρυξης, ενώ υπάρχει εναλλαγή πρωτογενών και δευτερογενών εξορυκτικών χώρων. Αυτή η εικόνα αποτελεί την μορφή που παρατηρείται στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος βελτιστοποίησης.

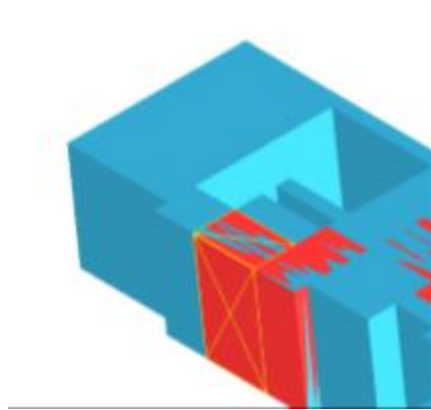


Εικόνα 2.36: Η ακολουθία των μετώπων εξόρυξης στο πλαίσιο βελτιστοποίησης (Bootsma , 2013)

Εν συνεχεία ο χρήστης αποδίδει μία τυπική τιμή για την τρίτη διάσταση και το πρόγραμμα βελτιστοποίησης (optimizer) εναρμονίζει το αρχικά δοθέν σχήμα των μετώπων με το γεωλογικό μοντέλο, με την οικονομική αξία του καθενός από αυτά να προκύπτει σύμφωνα με την δοθείσα τιμή της οριακής περιεκτικότητας. Κατ’ αυτό το τρόπο τόσο οι φέτες που έχουν περιεκτικότητα υψηλότερη της οριακής, όσο και αυτά που έχουν χαμηλότερη, καταγράφονται και χρησιμοποιούνται κατά την φάση της διαιώνισης της βασικής μονάδας και κατά το δεύτερο στάδιο.

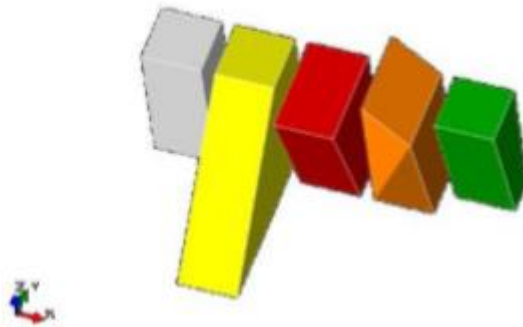
Κατά την δεύτερη φάση του πρώτου σταδίου πραγματοποιείται η ‘‘διαιώνιση’’ της μοναδιαίας δομής μέσω αλγορίθμου, ο οποίος στοχεύει στον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού μετώπων εξόρυξης, σεβόμενο τα σχεδιαστικά όρια που έχει θέσει ο χρήστης. Σύμφωνα με

αυτήν την διαδικασία προκύπτει ένα βασικό σχήμα χώρου εξορυκτικών εργασιών, το οποίο απαρτίζεται από μοναδιαία μέτωπα, τόσο υψηλότερης μέσης περιεκτικότητας από την οριακή, όσο και ορισμένα χαμηλότερης (Εικόνα 2.37).



Εικόνα 2.37: Ενδεικτικό αποτέλεσμα επιτυχούς εφαρμογής πρώτου σταδίου (Bootsma , 2013)

Κατά το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το προσδιορισθέν μέτωπο εξόρυξης από το προηγούμενο στάδιο υπόκειται περαιτέρω επεξεργασία (Bootsma, 2013). Πιο συγκεκριμένα, ενώ προσδιορίστηκε το βέλτιστο ύψος και πλάτος, σε αυτό το στάδιο μπορούν να πραγματοποιηθούν αλλαγές στην εγκάρσια διάσταση και τις εγκάρσιες γωνίες, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.38), όπου με γκρι χρώμα φαίνεται το αρχικό σχήμα του μετώπου.



Εικόνα 2.38: Παραδείγματα αλλαγών κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Bootsma , 2013)

Κατ' αυτό το τρόπο δύνανται να μεταβληθούν οκτώ σημεία του ορθογωνίου χώρου κατά την Υ διεύθυνση, στοχεύοντας στην επίτευξη μεγαλύτερου ποσοστού ανάκτησης μεταλλεύματος επιθυμητής συστάσεως. Αυτή η διαδικασία διενεργείται μέσω ενός επαναληπτικού αλγόριθμου εντοπισμού διαφορετικών λύσεων, με τον χρήστη να δηλώνει ορισμένα εύρη τιμών όσον αφορά την διαφορά γωνίας μεταξύ του μπροστινού και πίσω τμήματος του μετώπου αλλά και τις γωνίες βύθισης δαπέδου και οροφής.

Το τρίτο στάδιο αποτελεί μία χωριστή φάση βελτιστοποίησης, η οποία μπορεί και να παραληφθεί (Bootsma, 2013). Η ουσιαστική εφαρμογή του συγκεκριμένου σταδίου στοχεύει κατά κύριο λόγο στην εξομάλυνση των τοιχωμάτων του μετώπου εξόρυξης.

2.13.2.3 Τυπικές κατηγορίες χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων

Με σκοπό την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι, οι οποίοι βασίζονται πέραν της επίτευξης εξόρυξης μεταλλεύματος με την επιθυμητή σύσταση και σε κάποιο άλλο εξεταζόμενο πρόβλημα προς επίλυση.

Πιο συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί πλείστοι αλγόριθμοι, με ιδιαίτερη σημασία για την εξεταζόμενη ενότητα να εμφανίζουν εκείνοι που έχουν αναπτυχθεί για την μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα. Οι αλγόριθμοι αυτοί καλούνται να αντιμετωπίσουν σημαντικούς τομείς που επηρεάζουν την μέθοδο εξόρυξης αυτήν με τους σημαντικότερους να είναι οι εξής (Sens, 2011):

- Υποδομή
- Σύστημα διαχείρισης μεταλλεύματος
- Θέσεις και όρια μετώπων εξόρυξης

Από τις προαναφερθείσες κατηγορίες, ο Sens (2011) αναφέρει πως ως σημαντικότερη κρίνεται η τρίτη. Παρόλο που για τον σχεδιασμό των χώρων εξόρυξης συνήθως χρησιμοποιούνται βασικές αρχές και κύριος στόχος είναι η εξόρυξη σε τμήματα όπου το μέταλλευμα έχει περιεκτικότητα μεγαλύτερη της οριακής, αυτές οι συνθήκες δεν συντελούν στην επίτευξη του βέλτιστου κέρδους, της βέλτιστης Καθαρής Παρούσας Αξίας και της βέλτιστης ανάκτησης μεταλλεύματος. Κατ' αυτό το τρόπο με σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού του μεταλλείου, οι ήδη υπάρχοντες αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και στοχεύουν στον προσδιορισμό της ιδανικής θέσης και των ορίων των μετώπων εξόρυξης με οικονομικά κριτήρια είναι οι παρακάτω:

- Αλγόριθμος “πλωτού” μετώπου εξόρυξης («Πλωτού σημείου» (floating point))
- Αλγόριθμος πολλαπλής διάβασης μετώπου εξόρυξης
- Μέγιστες τιμές κοντινής περιοχής (γειτονίας)

Κεφάλαιο 3^ο : Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης ευστάθειας

3.1 Εισαγωγή

Κατά την εφαρμογή μεθόδων εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα είναι πολύ σημαντικό, τόσο για την διατήρηση υψηλών επιπέδων ασφαλείας όσο και για την συγκράτηση του ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος σε χαμηλά επίπεδα, να εφαρμόζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός των μετώπων εξόρυξης. Αστάθεια στα τοιχώματα του χώρου διενέργειας της εξορυκτικής διαδικασίας είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει στην απαίτηση μεγάλων εξόδων διορθωτικών ενεργειών για την αποκατάσταση του εδάφους, καθυστερήσεις στην παραγωγή, απώλεια εξοπλισμού εξόρυξης, απώλεια ανακτώμενου μεταλλεύματος, αλλά και ατυχήματα ή/και δυστυχήματα στους εργαζομένους του μεταλλείου (Potvin & Hadji Georgiou, 2001).

Κατ' αυτό το τρόπο πρώτοι από όλους οι Mathews et al. (1981) κατασκεύασαν ένα πολύ ιδιαίτερο διάγραμμα, το Stability Graph, το οποίο αποτελεί ένα εμπειρικό διάγραμμα με βάση το οποίο δύναται να προσδιοριστεί ποιοτικά η γεωτεχνική συμπεριφορά κάποιας εξεταζόμενης επιφάνειας του μετώπου εξόρυξης. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι πρώιμα μοντέλα εκτίμησης της ευστάθειας είχαν εξαχθεί και από τους Barton και Bieniawski, βασιζόμενοι στον σχεδιασμό σιράγγων αλλά και από τον Laubscher (1977), ο οποίος στήριξε την μελέτη του σε περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδων εκμετάλλευσης σχετιζόμενες με κατακρήμνιση.

Τις τελευταίες δεκαετίες το ζήτημα του Stability Graph, αναφορικά με τον σχεδιασμό κενών μετώπων εξόρυξης, γνώρισε σημαντική εξέλιξη μετά από την αρχική συμβατική του μορφή. Πιο συγκεκριμένα, το έργο των Mathews et al. (1981) ακολούθησαν οι Potvin, Hudyma, & Miller (1988) προχωρώντας στην εξαγωγή του modified Stability Graph και ο Nickson (1992), ο οποίος εξήγαγε μία παραλλαγή του διαγράμματος αυτού σχετιζόμενου με την δυνατότητα επίτευξης ή μη ευστάθειας με την χρήση ήλων από συρματόσχοινα. Πολλές ακόμη μεταγενέστερες παραλλαγές του αρχικού Stability Graph έχουν προταθεί με τις βασικές να είναι των Milne et al. (1996), οι οποίοι στηρίχθηκαν στον παράγοντα της υδραυλικής ακτίνας και των Clark και Pakalnis, (1997), Capes (2009), οι οποίοι συνέδεσαν το εμπειρικό διάγραμμα εκτίμησης της ευστάθειας μετώπου με το Equivalent Linear Overbreak Sloughing (ELOS) , που ερμηνεύει γραμμικά την αποφλοώση επιφανειών λόγω υπέρθραυσης. Περισσότερες λεπτομέρειες για την συγκεκριμένη μέθοδο (ELOS Stability Graph) παρατίθενται σε ακόλουθη ενότητα (βλ. εν. 3.4.2).

3.2 Μέθοδος Stability Graph

3.2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε από την προηγούμενη ενότητα, εμπνευστές του Stability Graph ήταν οι Mathews et al. (1981), οι οποίοι κατασκεύασαν την συμβατική μορφή του διαγράμματος ως ένα από τα αποτελέσματα της έκθεσης του CANMET ως προς την εξέταση της ευστάθειας μετώπων σε μεταλλεία μεγάλου βάθους στον Καναδά σε συμπαγείς σχηματισμούς μέτριων έως καλών μηχανικών χαρακτηριστικών (Stewart & Trueman, 2001; Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001). Το πρωτότυπο μοντέλο του Stability Graph στηρίχθηκε σε μελέτη 26 περιπτώσεων μετώπων σε τρία διαφορετικά μεταλλεία με κατ' ιδίαν εξέταση και 29 μελέτες περιπτώσεων από βιβλιογραφικές αναφορές (Potvin, 2014).

Το συμβατικό αυτό μοντέλο αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο ποιοτικής εκτίμησης της γεωτεχνικής συμπεριφοράς μίας επιφάνειας ενός κενού χώρου εξόρυξης, ενώ επίσης αυτό όπως και οι τροποποιημένες εκδοχές του αποτελούν ένα προκαταρκτικό βοήθημα σχεδίασης ανοικτών μετώπων εξόρυξης. Βελτιστοποιώντας τις σχεδιαστικές παραμέτρους των μετώπων μπορεί να προκύψει η επίτευξη της ελάχιστης δυνατής αραίωσης του μεταλλεύματος, συντελώντας ταυτόχρονα στην μείωση του κόστους εξόρυξης αυτού.

Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3.1) παρουσιάζεται συνεπτυγμένα η ιστορική εξέλιξη των διαγραμμάτων ευστάθειας μεταξύ των ετών 1981 - 2012, με χρονολογική σειρά.

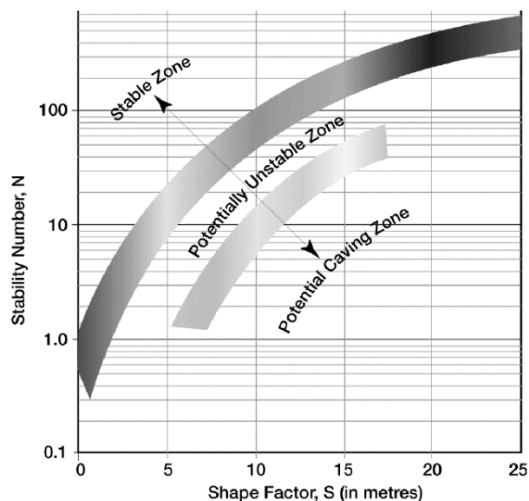
Εν συνεχεία, στις ενότητες που ακολουθούν αναλύεται η βασική μέθοδος αλλά και οι σημαντικότερες και επικρατέστερες εκ των εξελίξεών της.

Period	Developments
1980 - 1985	1. Introduction of stability graph – 26 case histories (Mathews et al., 1981)
1985 - 1990	1. Calibration of stability graph factors and zones – 175 cases (Potvin, 1988)
1990 - 1995	1. Tentative cablebolt support line (Potvin & Milne, 1992) 2. Re-definition of unstable/cave (supportable transition boundary – cablebolt support line) (Nickson, 1992) 3. 1 st partial statistical definition of stable/unstable zone (Nickson, 1992) 4. Proposed dilution lines added to stability graph (Scoble & Moss, 1994)
1995 - 2000	1. Re-definition of the transition zones (Stewart & Forsyth, 1995) 2. Modified gravity factor for sliding failure (Hadjigeorgiou, Leclaire & Potvin, 1995) 3. Second partial statistical definition of stable/unstable zones (Hadjigeorgiou et al., 1995) 4. Introduction of radius factor <i>RF</i> (Milne, Pakalnis & Lunder, 1996) 5. Calibration of proposed dilution lines <i>ELOS</i> (Clark & Pakalnis, 1997) 6. Modified gravity factor for footwalls with shallow dips <70° (Clark & Pakalnis, 1997) 7. Proposed volumetric index (Germain & Hadjigeorgiou, 1998) 8. First complete statistical analysis of stability graph using Bayesian likelihood statistic (Suorineni, 1998) 9. Introduction of fault factor (Suorineni, 1998; Suorineni et al. 1999) 10. Modified stress factor to include tension and stress-dependent transition zones (Diederichs & Kaiser, 1999)
2000 - 2005	1. Expanded database to about 400 cases and modified stability graph zones from Australian database (Trueman et al., 2000; Mawdesley et al., 2001) 2. Second complete statistical analysis using logistic regression – 483 case histories (Trueman & Mawdesley, 2003) 3. Time-dependent stability graph (Suorineni, Henning & Kaiser, 2001a)
2005-2010	1. Numerical modeling to validate the <i>B</i> -factor (Bewick & Kaiser, 2009)
2010 – to date	1. Second modification to stress factor to include tension (Mitri, Hughes, & Zhang, 2011)

Εικόνα 3.1: Ιστορική εξέλιξη τροποποιήσεων της μεθόδου του Stability Graph (Suorineni, 2012)

3.2.2 Παρουσίαση συμβατικού διαγράμματος Stability Graph

Η συμβατική μέθοδος του Stability Graph βασίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα, στο οποίο στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται ο δείκτης ευστάθειας *N* και στον οριζόντιο αντίστοιχα η υδραυλική ακτίνα *HR* ή τον συντελεστή σχήματος *S* (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Ζώνες γεωτεχνικής συμπεριφοράς σύμφωνα με το κατά Mathews αρχικό Stability Graph (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.2 γίνονται εμφανείς τρεις ζώνες, κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μία διαφορετική συμπεριφορά του μετώπου εξόρυξης.

Η πρώτη ζώνη, από τα αριστερά προς τα δεξιά, είναι η ζώνη της ευσταθούς κατάστασης (Stable Zone). Εάν μία εξεταζόμενη επιφάνεια, με βάση τα χαρακτηριστικά της (δείκτη ευστάθειας – N και υδραυλική ακτίνα - HR ή συντελεστή σχήματος – S) εντοπιστεί εντός της συγκεκριμένης ζώνης, τότε η επιφάνεια αυτή είναι πολύ πιθανό να εμφανίσει ευσταθή συμπεριφορά ως ανυποστήρικτη ή με την τοπική χρήση ελαφρών μέσων υποστήριξης (Vallejos, Delonca, & Pere, 2017).

Η δεύτερη ζώνη είναι εκείνη της δυνητικά ασταθούς κατάστασης (Potentially Unstable Zone) εντός της οποίας μία επιφάνεια συγκεντρώνει αρκετές πιθανότητες να εκδηλώσει κάποια μικρή ή/και εκτεταμένη αστοχία, η οποία όμως δύναται να αποφευχθεί με την χρήση των απαραίτητων μέτρων υποστήριξης.

Η τρίτη ζώνη είναι η ζώνη της δυνητικά εμφανιζόμενης κατακρημνιζόμενης συμπεριφοράς (Potential Caving Zone). Στην περίπτωση που μία επιφάνεια βρεθεί στην συγκεκριμένη ζώνη, υπάρχει πολύ σημαντική πιθανότητα, μεγαλύτερη του 30% να εμφανίσει σημαντικές αποφλοιώσεις – καταπτώσεις (Papaioanou & Suorineni, 2015). Είναι αρκετά ουσιώδες να διαχωριστεί η χρήση του όρου της κατακρήμνισης με τον αντίστοιχο που αναφέρεται στις μεθόδους εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση, όπου δεν συνάδει με την ονοματολογία των μεθόδων με κενά μέτωπα (Suorineni, 2010). Αντιθέτως, όπως αναφέρθηκε υπονοεί τον τρόπο βασικό τρόπος αστοχίας, τον οποίο είναι πολύ πιθανό να αντιμετωπίσει.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι μεταξύ δύο διαδοχικών ζωνών εντοπίζονται μεταβατικές ζώνες (transition zones) γεωτεχνικής συμπεριφοράς μετώπου εξόρυξης.

3.2.3 Δείκτης ευστάθειας N

Ο δείκτης ευστάθειας του Mathews (N) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$N = Q' \times A \times B \times C$$

όπου,

N : Δείκτης ή αριθμός ευστάθειας

Q' : Τροποποιημένος δείκτης ποιότητας βραχόμαζας κατά Barton et al (1974)

A : Συντελεστής τασικού πεδίου

B : Συντελεστής προσανατολισμού ασυνεχειών

C : Συντελεστής διόρθωσης αστοχίας λόγω βαρύτητας

3.2.3.1 Τροποποιημένος δείκτης ποιότητας βραχόμαζας (Q')

Ο τροποποιημένος δείκτης ποιότητας βραχόμαζας (Q') δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q' = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja}$$

Παρόλα αυτά για λόγους πληρότητας είναι σημαντικό να παρουσιαστεί και η βασική σχέση υπολογισμού του δείκτη ποιότητας βραχόμαζας (Q) :

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF}$$

όπου,

- RQD : Δείκτης κερματισμού βραχόμαζας
- Jn : Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων
- Jr : Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων
- Ja : Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων
- Jw : Συντελεστής παρουσίας νερού εντός των διακλάσεων
- SRF : Συντελεστής αναγωγής της εντατικής κατάστασης

Όπως συνάδεται από τα ανωτέρω, η τροποποιημένη μορφή του δείκτη ποιότητας προκύπτει με την παραδοχή ότι ο συντελεστής κατάστασης υδροφορίας των διακλάσεων (J_w) και ο συντελεστής μείωσης των τάσεων (SRF) λαμβάνουν την τιμή 1 και απαλείφονται.

3.2.3.1.1 Δείκτης κερματισμού βραχόμαζας (RQD)

Σύμφωνα με τους Deere et al. (1967) ο δείκτης RQD είναι το ποσοστό των αδιατάραχτων τεμαχών πετρώματος με μήκος μεγαλύτερο από 100 mm στο συνολικό μήκος διάτρησης με πυρηνοληψία. Ο δείκτης κερματισμού πετρώματος RQD είναι ένας καθιερωμένος δείκτης και σήμερα καταγράφεται σε κάθε γεώτρηση πυρηνοληψίας κατά τη γεωτεχνική έρευνα, ενώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα για τη συστηματική ταξινόμηση της βραχόμαζας, καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους όπως η τραχύτητα, η εξαλλοίωση των επιφανειών, το υλικό πλήρωσης και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών αλλά και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (Νομικός, 2015). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δειγματοληπτικά δεδομένα προερχόμενα από πυρηνοληψία για τον υπολογισμό του δείκτη δύναται να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση (Palmström, 1982):

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v$$

Όπου J_v : Ο συνολικός αριθμός διακλάσεων ανά m^3

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1) παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του πετρώματος ανάλογα με το εύρος της τιμής του RQD στην οποία εντάσσεται.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχόμαζας σύμφωνα με την τιμή RQD (Νομικός,2015)		
Κατηγορία	Χαρακτηρισμός βραχόμαζας	RQD
A	Πολύ πτωχή	0-25
B	Πτωχή	25-50
Γ	Μέτρια	50-75
Δ	Καλή	75-90
E	Άριστη	90-100

3.2.3.1.2 Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n)

Ο συντελεστής αυτός βαθμονομείται ανάλογα με το πλήθος των συνόλων των διακλάσεων της βραχόμαζας (Νομικός, 2015). Σύμφωνα με τους Priest και Hudson (1976) ο συντελεστής

αριθμού συστημάτων διακλάσεων λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 0.5-20 και η αποδιδόμενη τιμή ανά περίπτωση δίδεται σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή J_n (Priest & Hudson, 1976)		
Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	J_n
A	Συμπαγές, χωρίς ή με λίγες διακλάσεις	0.5 - 1.0
B	Ένα σύστημα διακλάσεων	2.0
Γ	Ένα σύστημα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	3.0
Δ	Δύο συστήματα διακλάσεων	4.0
E	Δύο συστήματα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	6.0
Z	Τρία συστήματα διακλάσεων	9.0
H	Τρία συστήματα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	12.0
Θ	Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα διακλάσεων, τυχαίες, ισχυρά διακλασμένο, «κύβοι ζάχαρης», κτλ.	15.0
I	Κονιορτοποιημένο πέτρωμα με μορφή εδαφικού σχηματισμού 1. Για διασταυρώσεις: $3J_n$ 2. Για εισόδους: $2J_n$	20.0

3.2.3.1.3 Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r)

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την βαθμό τραχύτητας των τοιχωμάτων των διακλάσεων σε μικρή κλίμακα αλλά και την κυμάτωσή τους σε μεγάλη κλίμακα (Νομικός, 2015). Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακα 3.3) δίδονται οι τιμές του συγκεκριμένου συντελεστή ανάλογα με τα την κατάσταση των διακλάσεων, όπως αυτή δίδεται από το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (N.G.I., 2015)

Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή J_r (N.G.I., 2015)		
Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	J_r
-	Περίπτώσεις	-
-	(α) Τοιχώματα βράχων σε επαφή	-
-	(β) Τοιχώματα βράχων σε επαφή πριν από διάτμηση 10 cm	-

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	Jr
A	Ασυνεχείς διακλάσεις	4.0
B	Τραχείες ή κυματώδεις, ακανόνιστες	3.0
Γ	Λείες, κυματώδεις	2.0
Δ	Ολισθηρές, επίπεδες	1.5
E	Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1.5
Z	Λείες, επίπεδες	1.0
H	Ολισθηρές, επίπεδες	0.5
-	(γ) Τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση	-
Θ	Ζώνη με ορυκτά αργίλου πάχους αρκετού ώστε να μην εφάπτονται τα τοιχώματα	1.0
I	Αμμώδεις, χαλικώδεις ή θραυστές ζώνες αρκετού πάχους ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος 1. Προστίθεται 1,0 αν η μέση απόσταση του κύριου συστήματος διακλάσεων είναι μεγαλύτερη από 3m 2. Jr = 0,5 δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθηρές διακλάσεις με προσανατολισμένες γραμμώσεις κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης αντοχής	1.0

3.2.3.1.4 Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (Ja)

Ο συγκεκριμένος συντελεστής λαμβάνει τιμές ανάλογα με το βαθμό εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των διακλάσεων, όταν αυτά βρίσκονται σε επαφή (Νομικός, 2015). Σύμφωνα με το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (N.G.I., 2015), ακολούθως στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι τιμές που μπορεί να λάβει ο δείκτης αυτός.

Πίνακας 3.4: Τιμές συντελεστή Ja (N.G.I., 2015)

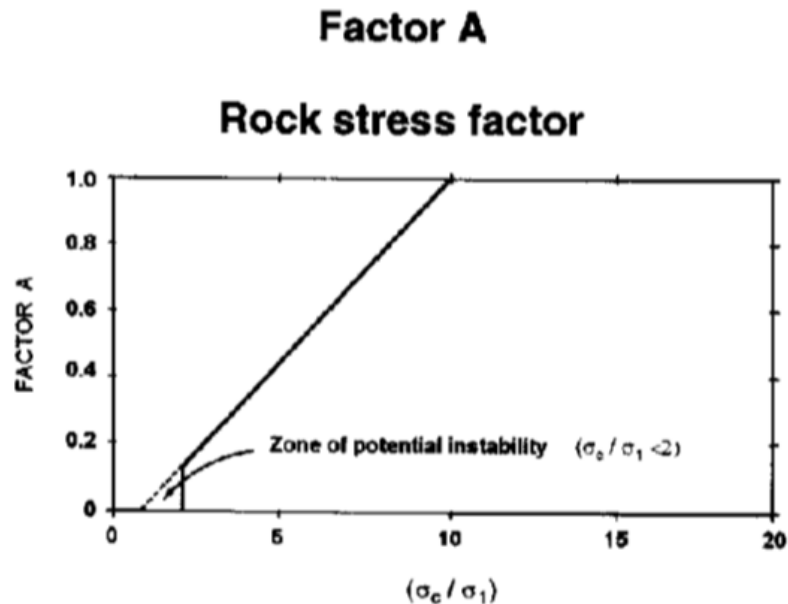
Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	-	Ja
-	Περιπτώσεις	∅	-
-	(α) Χωρίς ουσιαστικό υλικό πλήρωσης, επαφή τοιχωμάτων	-	-
A	«Πληρωμένες» υγιείς, σκληρές, αδιαπέρατο υλικό πλήρωσης όπως χαλαζίας ή επίδοτο	-	0.75
B	Επιφανειακά «λεκιασμένα» μόνο τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάθρωση	(25°-35°)	1.0
Γ	Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα διακλάσεων. Μη μαλακές επιστρώσεις ορυκτών, αμμώδεις κόκκοι, μη αργιλώδες αποσυντεθημένο πέτρωμα	(25°-30°)	2.0
Δ	Ιλυώδεις ή αμμώδεις επιστρώσεις αργίλου, μικρό κλάσμα αργίλου	(20°-25°)	3.0
E	Μαλακές η μικρής τριβής φ επιστρώσεις από αργιλικά ορυκτά (καολινίτης, μαρμαρυγίες), επίσης τάλκης, χλωρίτης, γύψος, γραφίτης, και μικρές ποσότητες από διογκούμενες αργίλους	(8°-16°)	4.0
-	(β) Με υλικό πλήρωσεως, τοιχώματα σε επαφή 10cm πριν από διάτμηση	-	-
Z	Αμμώδεις κόκκοι, χωρίς άργιλο, κονιορτοποιημένο πέτρωμα	(25°-30°)	4.0
H	Ισχυρά υπερστερεοποιημένα μη μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχείς, πάχους < 5mm)	(16°-24°)	6.0

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	Ø Ένδειξη	Ja
Θ	Μέσα ή χαμηλά υπερστερεοποιημένα μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχείς, πάχους <5mm)	(12°-16)	8.0
I	Διογκούμενη άργιλος πλήρωσης όπως μοντμοριλλονίτης, (συνεχείς, πάχους < 5mm). Οι τιμές του Ja εξαρτώνται από το ποσοστό του μεγέθους των διογκούμενων αργιλικών κόκκων και την πρόσβαση σε νερό.	(6°-12°)	8.0 – 12.0
-	(γ) Τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση	-	-
K,Λ,M	Ζώνες ή τμήματα από αποσυντεθημένο ή θρυμματισμένο πέτρωμα και άργιλο (ανάλογα με τον τύπο του αργιλικού υλικού, βλέπε H,Θ,I)	(6°-24°)	6.0 , 8.0 ή 8.0 – 12.0
N	Ζώνες ή τμήματα από ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο, μικρή ποσότητα μη μαλακής αργίλου	-	5.0
Ξ	Από στιφρή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς	(6°-24°)	10.0
Ο	Από μαλακή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς	(6°-24°)	13.0
Π	Από διογκούμενη άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς	(6°-24°)	13.0 – 20.0

3.2.3.2 Συντελεστής τασικού πεδίου (A)

Ο συντελεστής A χρησιμοποιείται με σκοπό να συνυπολογιστεί εκτός των υπολοίπων παραγόντων και η επίδραση του τασικού πεδίου στην εξεταζόμενη επιφάνεια στον υπολογισμό του δείκτη ευστάθειας και προκύπτει μέσω του λόγου της τιμής της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) προς την τάση που αυτό δέχεται (σ_1) (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001). Ο δείκτης αυτός δείχνει την πιθανότητα αστοχίας του εξεταζόμενου υλικού από υπέρβαση της αντοχής του. Το αρχικό διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή αυτού όπως αυτό αναπτύχθηκε από τους Mathews et al. (1981) δίδεται στην Εικόνα 3.3. Όπως είναι λογικό

όσο πιο υψηλές είναι οι τάσεις που ασκούνται στην βραχώμαζα τόσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή και κατ' επέκταση τόσο εντονότερη είναι η επίδραση στην μείωση της ευστάθειας του ανοίγματος.



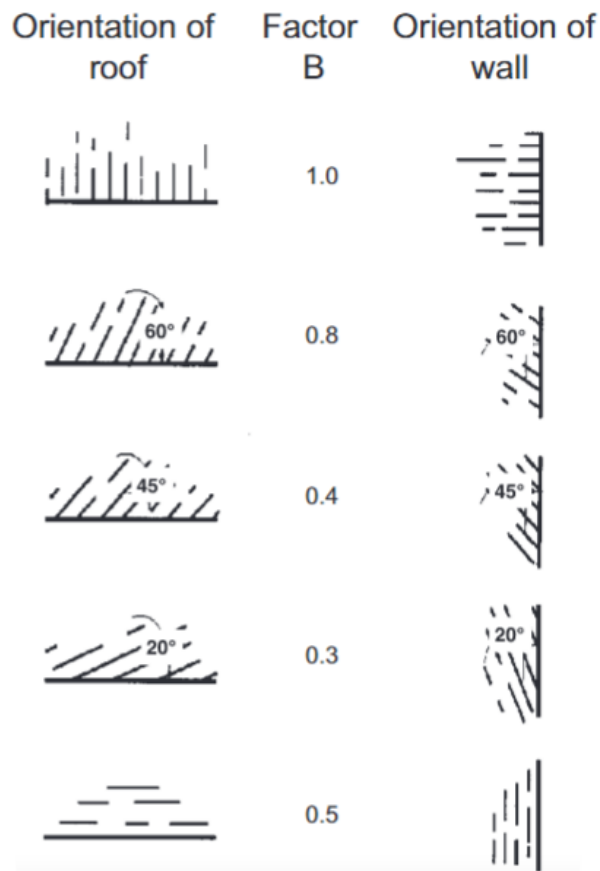
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή A (Mathews et al., 1981)

3.2.3.3 Συντελεστής προσανατολισμού ασυνεχειών (B)

Ο συντελεστής B εξετάζει τον προσανατολισμό της πιο κρίσιμης δομής ασυνέχειας ως προς την εξεταζόμενη επιφάνεια του εξορυκτικού χώρου (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001). Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην πιθανότητα αστοχίας της εξεταζόμενης επιφάνειας λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών και του δυσμενούς προσανατολισμού αυτών. Οι δομές ασυνέχειας μπορεί να είναι μία οικογένεια ασυνεχειών, στρωσιγενείς επιφάνειες ή εμφάνιση του φαινομένου της φύλλωσης των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των περιπτώσεων εμφάνισης αστοχίας σε μία επιφάνεια λόγω ασυνεχειών συμβαίνουν σε περιπτώσεις όπου οι ασυνέχειες σχηματίζουν μικρή κλίση με την εξεταζόμενη επιφάνεια του μετώπου εξόρυξης.

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται γραφικά η αρχική αντιστοίχιση των τιμών του συντελεστή B ανάλογα με την διαφορά κλίσης μεταξύ της εξεταζόμενης επιφάνειας και της κρίσιμης οικογένειας ασυνεχειών.

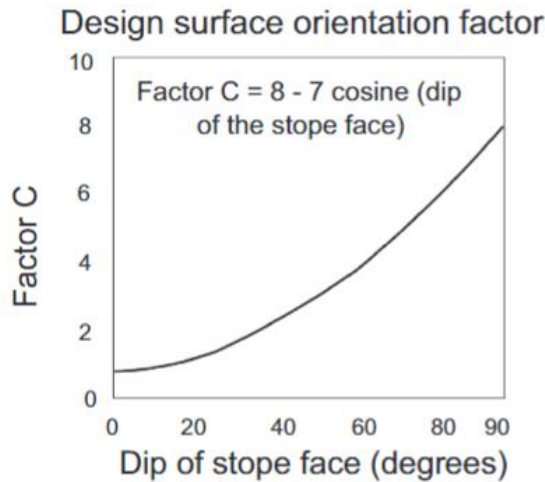
Joint orientation adjustment



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή B (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001)

3.2.3.4 Συντελεστής διόρθωσης αστοχίας λόγω βαρύτητας (C)

Ο συντελεστής C χρησιμοποιείται για με σκοπό να ληφθεί υπόψιν ο αναμενόμενος μηχανισμός αστοχίας του υλικού στην εξεταζόμενη επιφάνεια (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001). Οι μηχανισμοί επηρεαζόμενοι από την βαρύτητα που μπορούν να οδηγήσουν μία επιφάνεια σε αστοχία είναι η πτώση ή απολέπιση και η ολίσθηση. Ακολούθως δίδεται το διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή C, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται η τιμή του συντελεστή ενώ στον οριζόντιο τοποθετείται η διαφορά της κλίσης της επιφάνειας από την οριζόντιο. Στην Εικόνα 3.5 δίδεται επίσης και η μαθηματική εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή, όπως αυτή προκύπτει από την καμπύλη του διαγράμματος, η οποία είναι : $C = 8 - 7\cos(\text{Dip})$.



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή C (Vallejos, Delonca, & Pere, 2017)

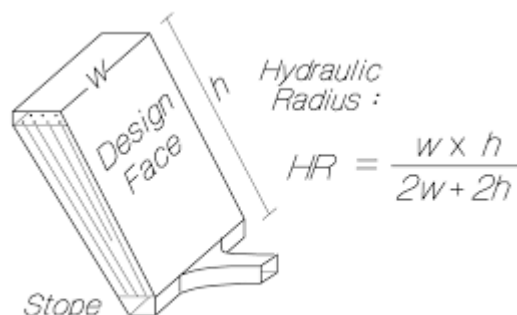
3.2.4 Υδραυλική ακτίνα (HR)

Η υδραυλική ακτίνα (HR) ή ο συντελεστής σχήματος (S), όπως αλλιώς ονομάζεται, χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του μεγέθους και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μία εξεταζόμενης επιφάνειας του μετώπου εξόρυξης. Η σχέση υπολογισμού της υδραυλικής ακτίνας είναι η εξής:

$$HR = \frac{\text{Εμβαδόν}}{\text{Περίμετρος}} = \frac{\text{πλάτος} \times \text{ύψος}}{2 \times (\text{πλάτος} + \text{ύψος})}$$

όπου,

- Εμβαδόν : Η εξεταζόμενη επιφάνεια του εξορυκτικού χώρου
- Περίμετρος : Η συνολική απόσταση περιμετρικά της εξεταζόμενης επιφάνειας



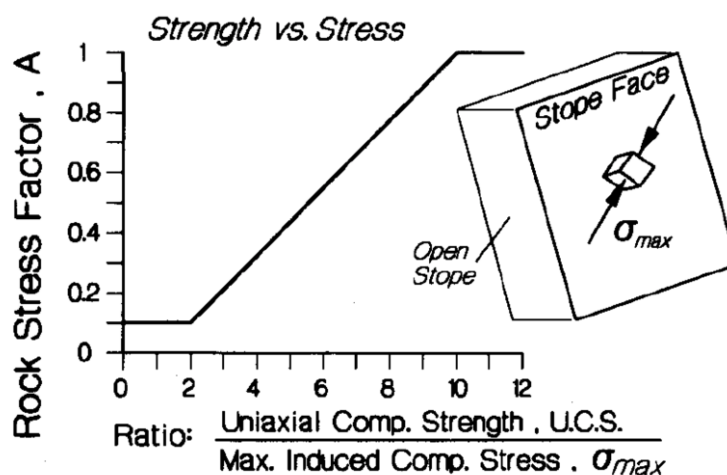
Εικόνα 3.6: Τρόπος υπολογισμού υδραυλικής ακτίνας (Ren Honggang et al, 2018)

3.2.5 Τροποποιήσεις της μεθόδου ευστάθειας μετώπου

3.2.5.1 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Potvin (1988)

Το έργο των Mathews et al. (1981) γνώρισε συνέχεια από τον Potvin (1988), ο οποίος μελετώντας 175 διαφορετικές περιπτώσεις σε ένα σύνολο 32 μεταλλείων προχώρησε στην τροποποίηση των διαγραμμάτων προσδιορισμού των συντελεστών A,B και C του δείκτη ευστάθειας N, καθώς επίσης και στην εξαγωγή ενός τροποποιημένου διαγράμματος Stability Graph. Κατ' αυτό το τρόπο στις περιπτώσεις όπου για τον υπολογισμό των συντελεστών χρησιμοποιούνται τα κατά Potvin τροποποιημένα διαγράμματα υπολογισμού των συντελεστών, ο δείκτης ευστάθειας λαμβάνει το προσωνύμιο "τροποποιημένος" και συμβολίζεται με «N'».

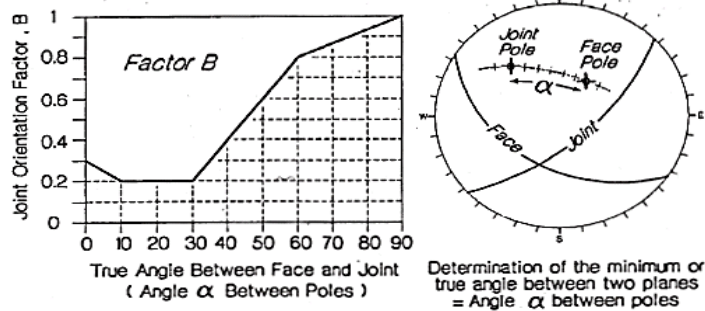
Όσον αφορά το νομόγραμμα προσδιορισμού του συντελεστή τασικού πεδίου A (βλ. Εικόνα 3.7), οι άξονες του διαγράμματος παραμένουν οι ίδιοι με διαφοροποίηση να εντοπίζεται στην καμπύλη συσχέτισης.



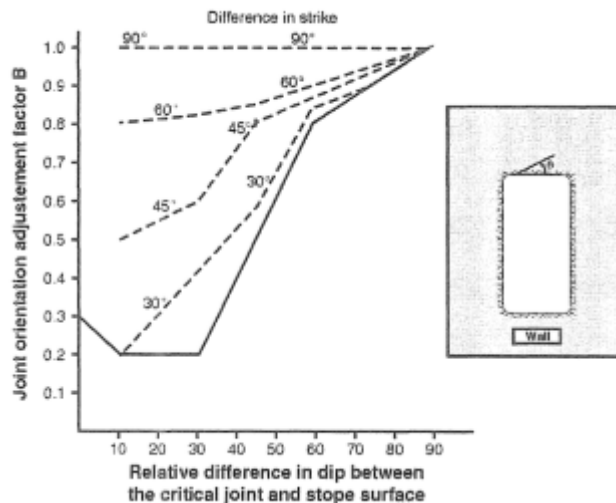
Εικόνα 3.7: Νομόγραμμα προσδιορισμού του συντελεστή A (Potvin, 1988)

Ο Potvin (1988) για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή προσανατολισμού των ασυνεχειών (B) προχώρησε στην εξαγωγή ενός διαγράμματος υπολογισμού της τιμής του συντελεστή αυτού, το οποίο συνοδεύεται με ένα πίνακα άμεσης αντιστοίχισης διαφοράς κλίσης και τιμής παραμέτρου (βλ. Εικόνα 3.8). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος πραγματική κλίση (true angle) αναφέρεται στην κλίση βύθισης της επιφάνειας. Σε περίπτωση που εμφανίζεται διαφοροποίηση μεταξύ των διευθύνσεων κλίσεων της εξεταζόμενης επιφάνειας και του κύριου συστήματος ασυνεχειών, ο συντελεστής B δύναται να λάβει μεγαλύτερες τιμές, λόγω της μικρότερης αρνητικής επίδρασης της ασυνέχειας στην ευστάθεια του μετώπου (βλ. Εικόνα 3.9).

Horizontal Back	Inclined Wall	Vertical Wall	True Angle between Face & Joint	Potvin Factor B
			$\alpha = 90^\circ$	1.0
			$\alpha = 60^\circ$	0.8
			$\alpha = 45^\circ$	0.5
			$\alpha = 30^\circ$	0.2
			$\alpha = 0^\circ$	0.3



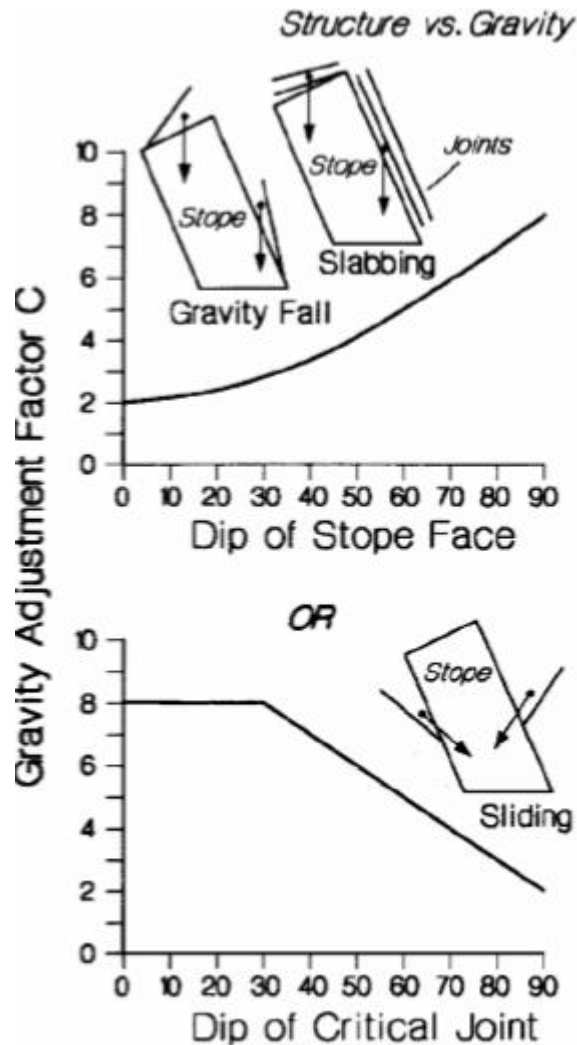
Εικόνα 3.8: Νομόγραμμα και πίνακας τιμών συντελεστή B (Potvin, 1988)



Εικόνα 3.9: Πλήρες νομόγραμμα προσδιορισμού τιμή παραμέτρου B (Potvin, 1988)

Όσον αφορά τον συντελεστή επίδρασης του τύπου αστοχίας (C) ο Potvin (1988) εξήγαγε δύο νομογράμματα υπολογισμού αυτού ανάλογα με τον τύπο αστοχίας που εμφανίζεται στο μέτωπο. Πιο συγκεκριμένα το επάνω διάγραμμα της Εικόνας 3.10 αντιστοιχεί σε αστοχία λόγω πτώσης και απολέπισης ενώ το κάτω διάγραμμα σε αστοχία λόγω ολίσθησης. Αξίζει τέλος να

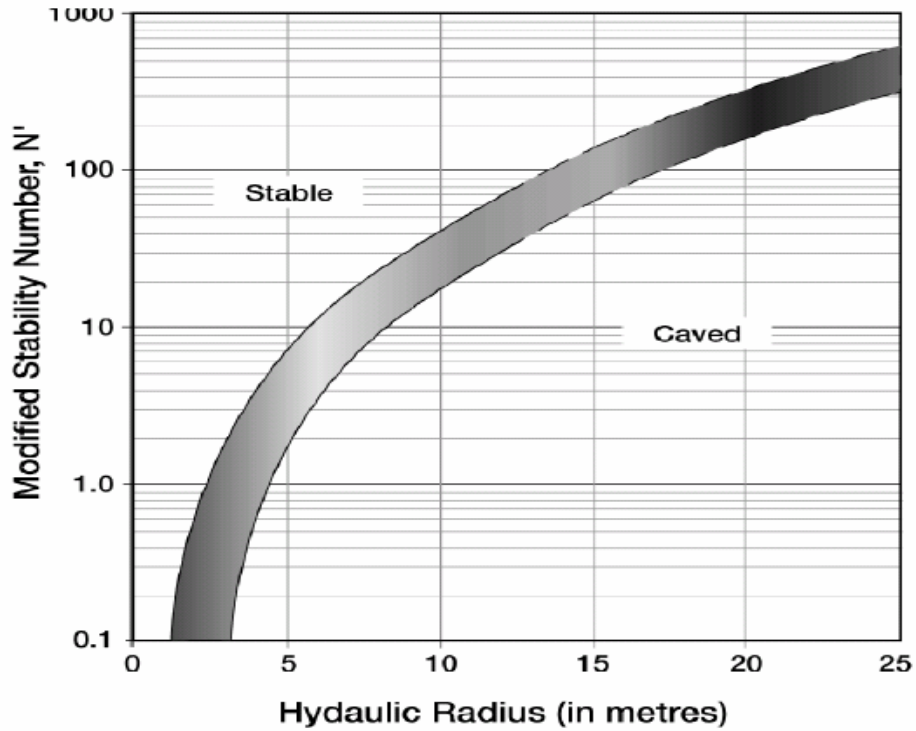
σημειωθεί ότι η εξίσωση υπολογισμού του δείκτη C για την περίπτωση της αστοχίας λόγω πτώσης ή απολέπισης είναι η εξής : $C = 8 - 6\cos(\text{Dip})$



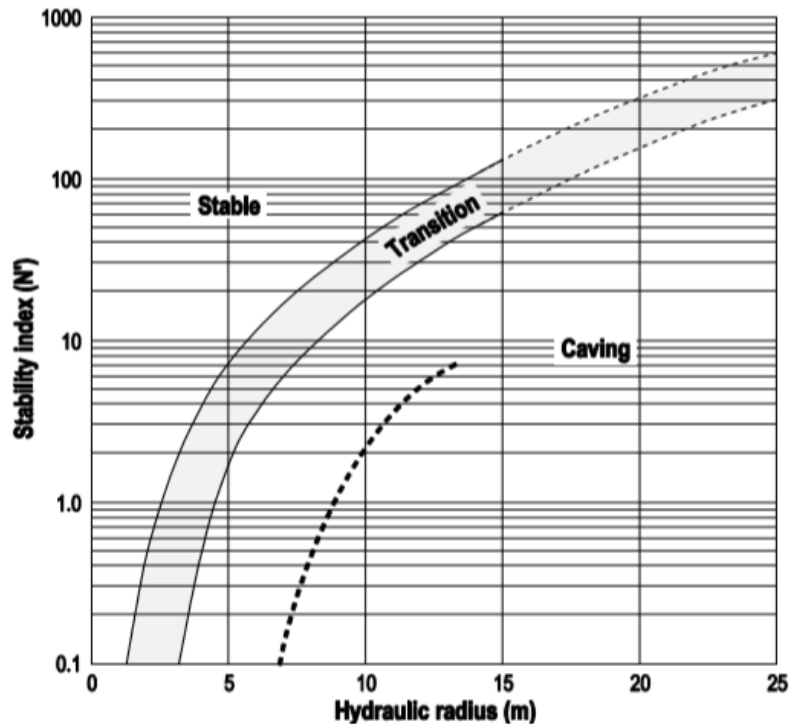
Εικόνα 3.10: Νομογράμματα υπολογισμού συντελεστή C, Αστοχία λόγω κατάπτωσης ή απολέπισης (πάνω) , Αστοχία λόγω ολίσθησης (κάτω) (Potvin, 1988)

Στην τροποποιημένη μορφή του Stability Graph (βλ. Εικόνα 3.11) που αναπτύχθηκε από τον Potvin (1988), ο αριθμός των ζωνών συμπεριφοράς εξεταζόμενης επιφάνειας που απεικονίζονται επάνω στο διάγραμμα είναι δύο, η ζώνη σταθερής κατάστασης και η ζώνη κατακρήμνισης (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001). Μεταξύ αυτών των δύο ζωνών παρεμβάλλεται μία μεταβατική ζώνη, η οποία αντιστοιχεί σε ανυποστήρικτο μέτωπο. Και σε αυτήν την περίπτωση ο όρος ‘κατακρήμνιση’ χρησιμοποιείται καταχρηστικά και αμφισβητήθηκε από αρκετές μεταγενέστερες μελέτες. Όσον αφορά τις διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται στους άξονες του διαγράμματος, παρατηρείται μόνο μία στον κατακόρυφο άξονα, όπου τοποθετείται ο τροποποιημένος δείκτης ευστάθειας N'. Σε μελέτη που ακολούθησε από τον Potvin, βασισμένη σε 66 μελέτες περιπτώσεων υποστηριζόμενων επιφανειών, ο ίδιος

προχώρησε στην προσθήκη στο ήδη κατασκευασμένο τροποποιημένο γράφημά του, μίας διακεκομμένης καμπύλης (βλ. Εικόνα 3.12), η οποία αποτελεί το όριο μίας επιπλέον ζώνης ευσταθούς κατάστασης με την χρήση μέτρων υποστήριξης (Potvin , 2014).



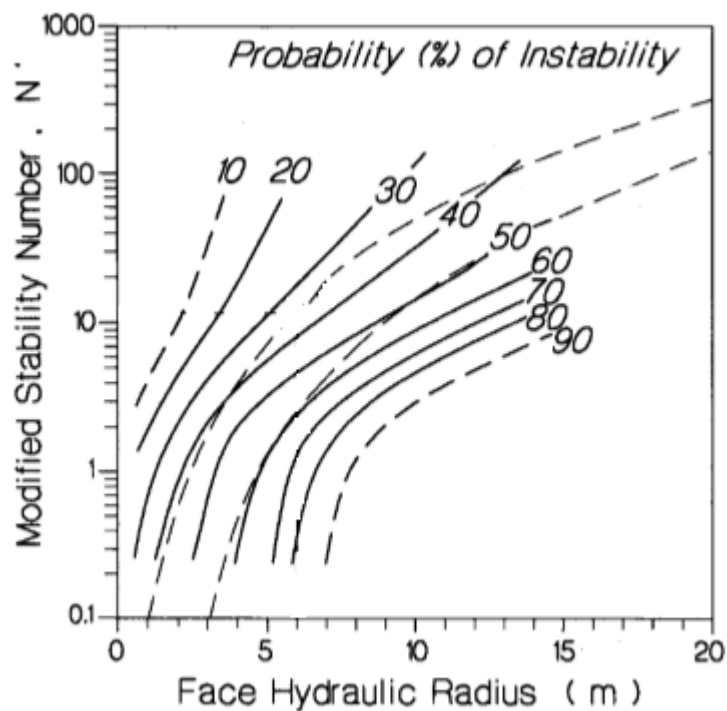
Εικόνα 3.11: Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



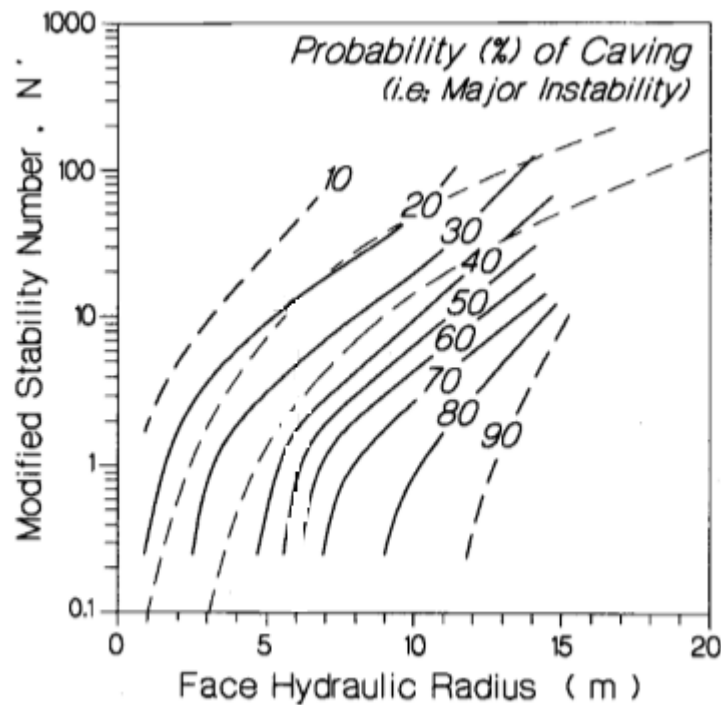
Εικόνα 3.12: Το τροποποιημένο διάγραμμα ευστάθειας με την προσθήκη της "ευσταθής με την εφαρμογή συρματοσχοινων" ζώνης (Potvin , 2014)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Potvin (2014) η χρήση του τροποποιημένου διαγράμματος ευστάθειας για πολύ μεγάλα μέτωπα δύναται να αποβεί προβληματική, καθώς η εφαρμογή της συγκεκριμένης τροποποιημένης μεθόδου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ιδιαίτερη αξιοπιστία για επιφάνειες με υδραυλική ακτίνα περί της τιμής των 12 m.

Μία πολύ ιδιαίτερη τροποποιημένη προσέγγιση της μορφής του Stability Graph, χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο δείκτη N' που πρότεινε ο Potvin (1988), εξήχθη από τους Diedierichs και Kaiser (1996), οι οποίοι στηρίχθηκαν σε δεδομένα 176 μελετών περιπτώσεων από τον Potvin (1988) και επιπλέον 13 από τον Nickson (1992). Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά κατασκεύασαν δύο γραφήματα, εκ των οποίων το πρώτο παρουσιάζει την πιθανότητα παρουσίασης οποιασδήποτε μορφής αστάθειας ανάλογα με την τιμή του τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N' και την υδραυλική ακτίνα που εμφανίζει η κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια (βλ. Εικόνα 3.13). Όσον αφορά το δεύτερο διάγραμμα, αυτό παρουσιάζει την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης σημαντικής αστάθειας ή κατακρημιζόμενης συμπεριφοράς από την εξεταζόμενη επιφάνεια (βλ. Εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.13: Ισοπιθανολογικές καμπύλες για εμφάνιση παντός τύπου αστάθειας (Diedierichs & Kaiser, 1996)

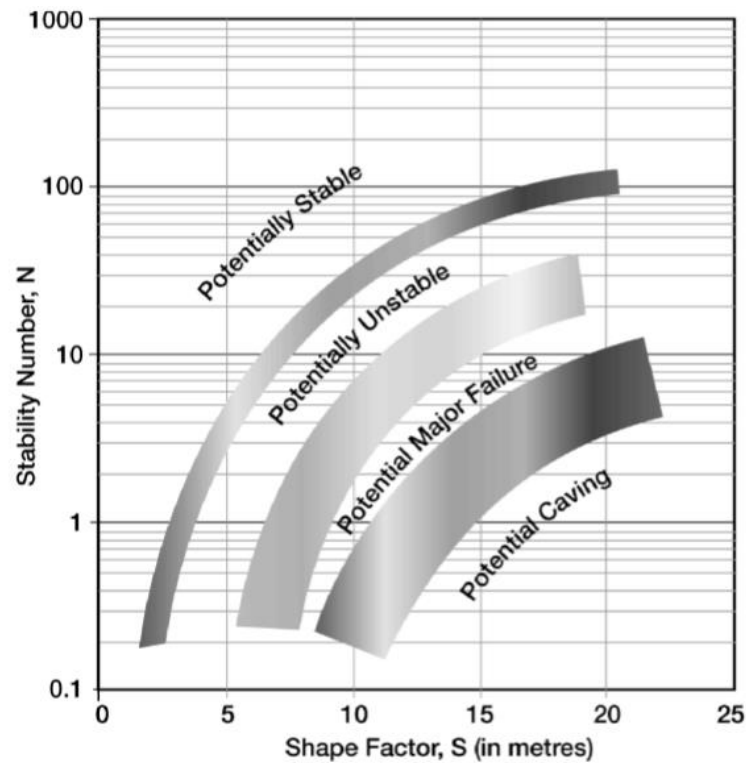


Εικόνα 3.14: Ισοπιθανολογικές καμπύλες για την εμφάνιση σημαντικής αστάθειας ή κατακρημιζόμενης συμπεριφοράς (Diedierichs & Kaiser, 1996)

3.2.5.2 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Stewart and Forsyth (1995)

Οι Stewart και Forsyth (1995) προχώρησαν σε αναπροσαρμογή των ζωνών γεωτεχνικής συμπεριφοράς του διαγράμματος ευστάθειας του Mathews. Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 3.15, οι ζώνες που σχηματίζονται είναι (Vallejos, Delonca, & Pere, 2017):

- Ζώνη δυνητικά ευσταθούς κατάστασης (Potentially Stable Zone), όπου η επιφάνεια δύναται να επιδείξει ευσταθή συμπεριφορά χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης ή με την χρήση τοπικής ενίσχυσης του μετώπου.
- Ζώνη δυνητικά ασταθούς κατάστασης (Potentially Unstable Zone), όπου παρατηρείται σχετικά υψηλή πιθανότητα εμφάνισης μη εκτεταμένης αστοχίας, η οποία είναι πιθανό να αποτραπεί εφόσον ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης του μετώπου.
- Ζώνη δυνητικά σημαντικής αστοχίας (Major Failure Zone), όπου σε μελέτες περιπτώσεων που διενεργήθηκαν υπολογίστηκε ότι η έκταση της αστοχίας ήταν μεγαλύτερη από το μισό της μικρότερης διάστασης του ανοίγματος.
- Ζώνη δυνητικά κατακρημιζόμενης κατάστασης (Potential Caving Zone), όπου υπάρχει σημαντική πιθανότητα η υπό εξέταση μη υποστηριζόμενη επιφάνεια να αστοχήσει και να συνεχίζει να αστοχεί έως ότου τοποθετηθούν σε αυτήν τα απαραίτητα μέσα ενίσχυσης και υποστήριξης.

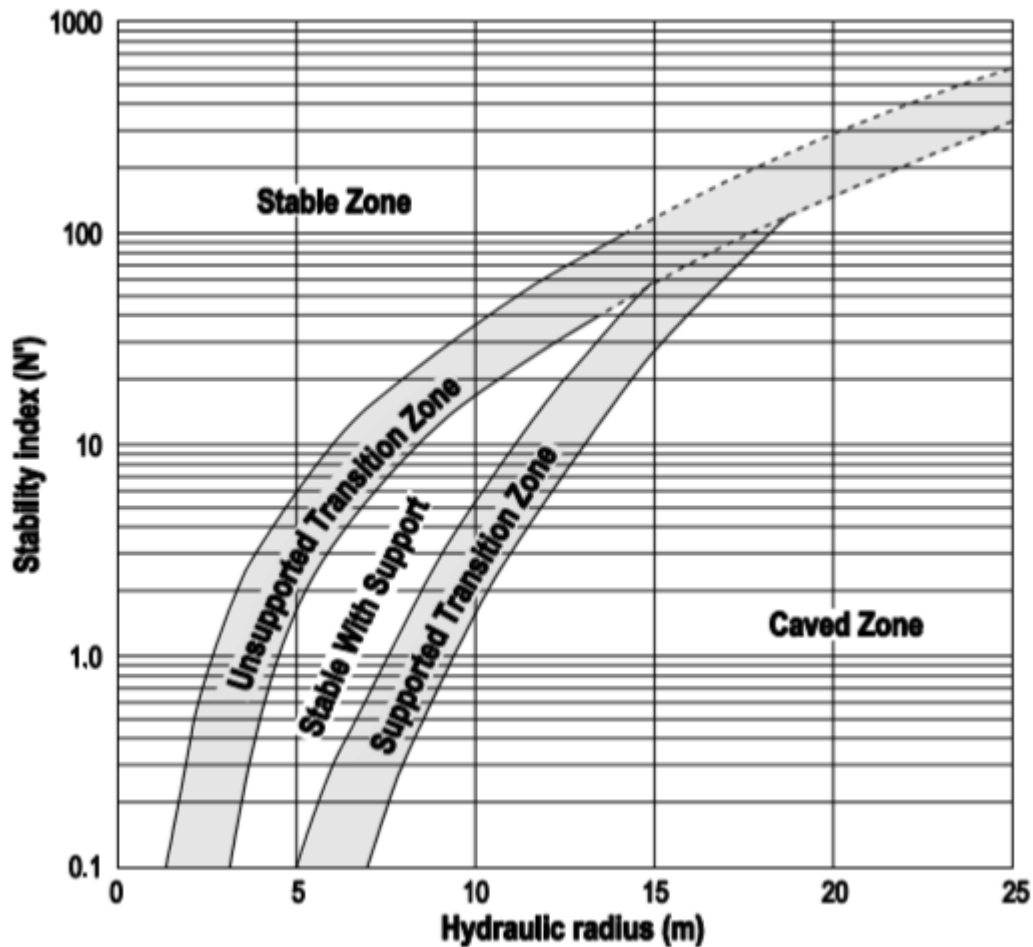


Εικόνα 3.15: Modified Stability Graph κατά Stewart and Forsyth (1995)

3.2.5.3 Τροποποίηση μεθόδου Stability Graph κατά Nickson (1992)

Μία ακόμη αξιοσημείωτη τροποποιημένη μορφή της μεθόδου του Stability Graph ήταν εκείνη που αναπτύχθηκε από τον Nickson (1992), ο οποίος έδωσε ιδιαίτερη έμφαση στον προσδιορισμό ζωνών που εμπίπτουν σε ζητήματα περί υποστηρίξεως, διενεργώντας παράλληλα μία συμπληρωματική μελέτη 46 ακόμη υποστηριζόμενων περιπτώσεων επιφανειών (Potvin, 2014). Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με το νέο γράφημα που εξήχθη (βλ. Εικόνα 3.16), σε αυτό διακρίνονται πέντε διαφορετικές ζώνες ευστάθειας, οι οποίες είναι:

- Ζώνη ευσταθούς κατάστασης (Stable Zone)
- Μεταβατική μη υποστηριζόμενη ζώνη (Unsupported Transition Zone)
- Ζώνη ευσταθούς κατάστασης μέσω της χρήση μέτρων υποστήριξης (Stable With Support (Zone))
- Μεταβατική υποστηριζόμενη ζώνη (Supported Transition Zone)
- Ζώνη κατακρήμνισης (Caved Zone)



Εικόνα 3.16: Stability Graph κατά Nickson (1992)

3.3 Μέθοδος Extended Stability Graph

Όπως αναφέρθηκε και κατά την ενότητα 3.2.5.2, ο Potvin (2014) επισήμανε την απουσία επαρκών δεδομένων από αναλύσεις σε επιφάνειες μετώπων αρκετά σημαντικών διαστάσεων. Αυτήν την αναγκαιότητα διερεύνησης του ζητήματος διαπίστωσαν και προσπάθησαν να ικανοποιήσουν οι Mawdesley, Trueman και Whiten (2001), προχωρώντας στην μελέτη 180 επιπλέον περιπτώσεων και συνδυάζοντας αυτές με παλαιότερα αποτελέσματα μελετών του 1998 από μεταλλεία της Αυστραλίας, ο συνολικός αριθμός περιπτώσεων στη βάση δεδομένων ανερχόταν στις 486. Ως εκ τούτου, ο οριζόντιος άξονας, της υδραυλικής ακτίνας, του διαγράμματος λόγω της εισδοχής στην βάση δεδομένων περιπτώσεων μεγαλύτερων μετώπων εξόρυξης επεκτάθηκε από τα 23 m που ήταν στο αρχικό διάγραμμα των Mathews et al (1981) στα 55 m. Επιπροσθέτως η επέκταση του Stability Graph προσέφερε την δυνατότητα κάλυψης ενός μεγαλύτερου φάσματος συμπεριφοράς βραχώμαζας και in-situ εντατικής κατάστασης, με το εύρος των τιμών που δύναται να λάβει ο δείκτης ευστάθειας να κυμαίνεται μεταξύ 0,005 – 700.

Με σκοπό την επέκταση της αρχικής προσέγγισης του Stability Graph οι Mawdesley et al (2001) χρησιμοποίησαν μία μέθοδο ανάλυσης λογιστικής παλινδρόμησης, έτσι ώστε να σκιαγραφηθούν στατιστικά οι ζώνες ευστάθειας και να καθοριστούν ισοπιθανολογικά τα σενάρια της ευστάθειας, αστοχίας και της σημαντικής αστοχίας όσον αφορά τα γραμμικά όρια που προκύπτουν μεταξύ των ζωνών. Παρακάτω δίδεται ενδεικτικά η εξίσωση του ορίου μεταξύ των ζωνών της ευσταθούς και της ασταθούς κατάστασης, καθώς επίσης και η συνάρτηση πιθανότητας ($P(z)$), η οποία έχει οριστεί στο σημείο τομής μεταξύ της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας εντοπισμού μία περίπτωση στην ζώνη ευσταθούς κατάστασης και της αντίστροφης συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας για εντοπισμού κάποιας περίπτωση στην ζώνη της ασταθούς κατάστασης (Stewart & Trueman, 2001).

$$z = \beta_1 \times \ln(N) + \beta_2 \times \ln(S) + \beta_3$$

$$P(z) = \frac{1}{(1 + e^{-z})}$$

όπου,

N : Δείκτης ευστάθειας

S : Υδραυλική ακτίνα

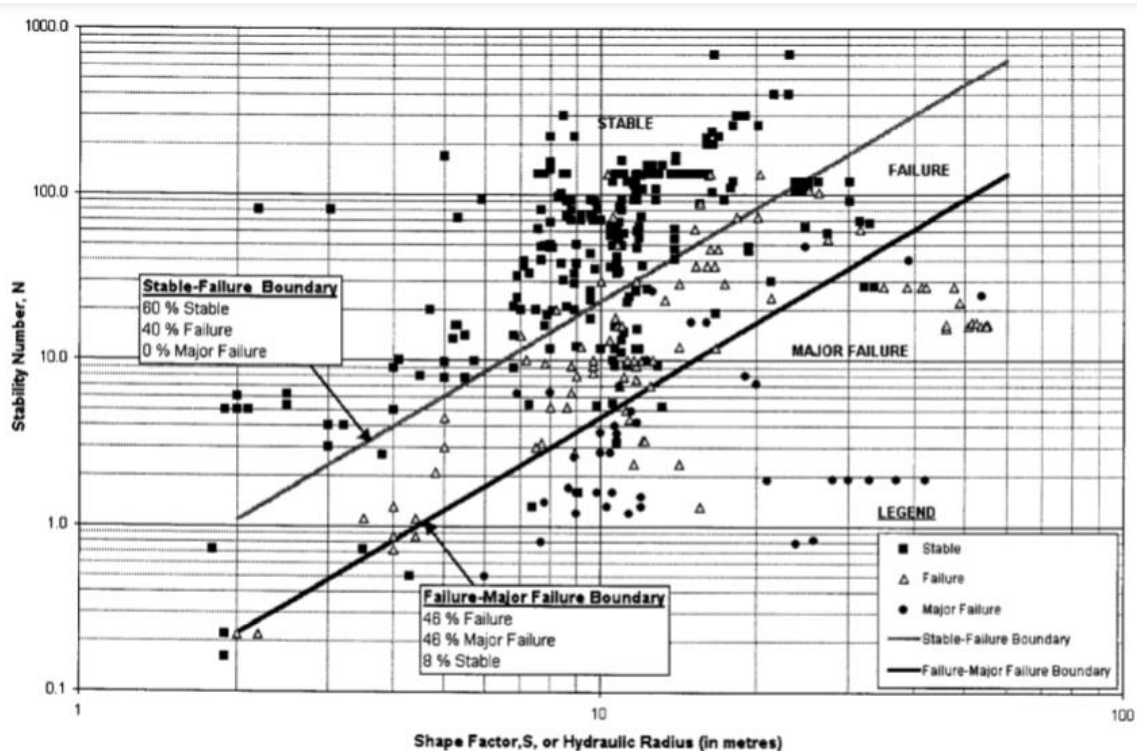
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Σταθερές

$P(z)$: Συνάρτηση πιθανότητας, η οποία λαμβάνει τιμή αναλογικά με την απόκριση στην συγκεκριμένη εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης και σχετίζεται με την πιθανότητα μίας περίπτωσης που εντοπίζεται επάνω στο συγκεκριμένο όριο να εμπίπτει σε κάποια από τις ζώνες ευστάθειας.

Κατ' αυτό το τρόπο όπως γίνεται αντιληπτό (βλ. Εικόνα 3.17) για κάθε ένα από τα δύο όρια μεταξύ ζωνών προκύπτουν ορισμένες πιθανότητες για κάθε μία από τις ζώνες ευστάθειας επιφανειών. Σημειώνεται ότι έχουν κατασκευαστεί και ορισμένα γραφήματα, με βάση τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η πιθανότητα εμφάνισης της κάθε μίας από τις τρεις αναλυόμενες συμπεριφορές ευστάθειας, τα οποία θα παρουσιαστούν κατά το κεφάλαιο της ανάλυσης των αποτελεσμάτων (βλ. Κεφάλαιο 5^ο) των μοντέλων προσομοίωσης.

Ακόμη το Extended Stability Graph όπως παρατηρείται, χρησιμοποιεί λογαριθμικό διάγραμμα εν αντιθέση με το παραδοσιακό ημι-λογαριθμικό της πρωταρχικής μεθόδου Stability Graph, γεγονός που απεδείχθη ότι παρουσιάζει μία πιο καθαρή εικόνα των ζωνών (Mawdesley,

Trueman, & Whiten, 2001). Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι για την κατασκευή της συγκεκριμένης μεθόδου έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια διαγράμματα και νομογραφήματα προσδιορισμού των συντελεστών A,B και C με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική προσέγγιση του διαγράμματος ευστάθειας (κατά Matthews) (Τουλίκας, 2019).

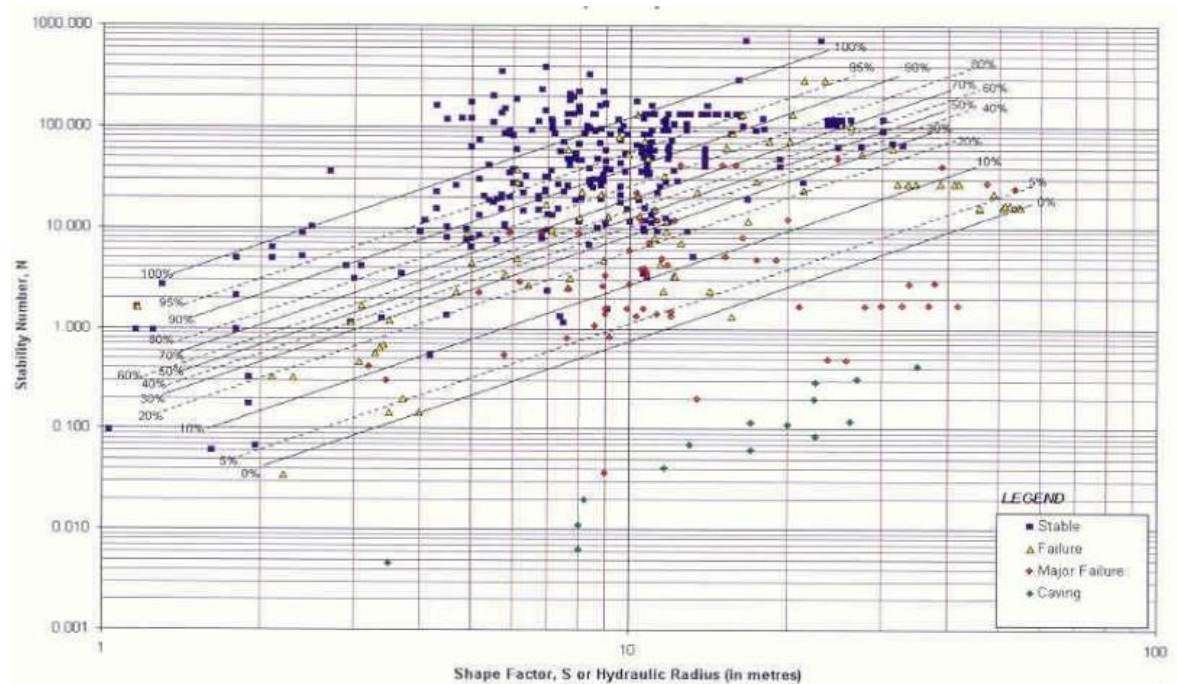


Εικόνα 3.17: Extended Mathews' Stability Graph (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001)

Παρόλο που το συγκεκριμένο διάγραμμα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο πρόβλεψης και σχεδίασης, εμπίπτει κι αυτό στην κατηγορία των εμπειρικών μεθόδων. Συνεπώς, για την εφαρμογή της μεθόδου προϋπόθεση αποτελεί η διενέργεια πρότερης αξιολόγησης των δεδομένων που θα εισαχθούν σε αυτήν αλλά και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εν λόγω ανάλυση.

Τέλος, ακολούθως παρουσιάζεται ένα ακόμη εμπειρικό τροποποιημένο διάγραμμα ευστάθειας (βλ. Εικόνα 3.18), κατά τον Trueman (2000), επάνω στο οποίο μέσω γραμμών διαβάθμισης, η εξεταζόμενη επιφάνεια λαμβάνει ένα ποσοστό εκτίμησης ένταξής της στην ζώνη ευσταθούς συμπεριφοράς. Η περίπτωση αυτή επιλέγεται να μην εισαχθεί σε ξεχωριστή ενότητα, λόγω της σύνδεσης που έχει με την επέκταση του Stability Graph. Όπως γίνεται αντιληπτό και στο συγκεκριμένο διάγραμμα χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα, ενώ για την κατασκευή του έχει χρησιμοποιηθεί μέθοδος λογιστικής παλινδρόμησης. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι αντίστοιχα διαγράμματα με εκείνο της Εικόνας 3.18 έχουν κατασκευαστεί και περιλαμβάνουν

την πιθανότητα μίας επιφάνειας να αστοχήσει αλλά και να εμφανίσει και εντονότερα φαινόμενα αστοχίας.



Εικόνα 3.18: Εμπειρικό τροποποιημένο Stability Graph (Trueman, 2000)

3.4 Περιορισμοί εμπειρικών μεθόδων ευστάθειας - Stability Graph και επιπρόσθετοι παράγοντες επίδρασης στην ευστάθεια μετώπου

3.4.1 Περιορισμοί μεθόδου Stability Graph

Η μέθοδος του Stability Graph, παρόλο που έχει εξαιρετικά σημαντική χρησιμότητα, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς και παραλήψεις, τις οποίες έχουν αναγνωρίσει αρκετοί μελετητές. Οι περιορισμοί αυτοί εντοπίζονται στην συμβατική και στην τροποποιημένη μορφή του διαγράμματος ευστάθειας, με τις μεταγενέστερες προσεγγίσεις του ζητήματος αυτού να επικεντρώνονται στην εξάλειψη ορισμένων εξ αυτών. Παρόλα αυτά ένα σημαντικό μέρος των τροποποιημένων προσεγγίσεων του Stability Graph δεν βασίζεται σε δεδομένα πεδίου, γεγονός που αμφισβητεί την ασφαλή εφαρμογή τους (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001). Οι βασικοί περιορισμοί του συμβατικού και τροποποιημένου Stability Graph είναι οι εξής (Suorineni, 2010):

- Ο συντελεστής “A” του δείκτη ευστάθειας δεν λαμβάνει υπόψιν τυχόν αστοχίες της εξεταζόμενης επιφάνειας λόγω εφελκυστικών τάσεων.
- Περιπτώσεις αστοχίας λόγω ολίσθησης στο δάπεδο του μετώπου εξόρυξης δεν αντιμετωπίζονται με ακρίβεια από τον συντελεστή “C”. Για την επίλυση του συγκεκριμένου ζητήματος οι Hadjigeorgiou et al. (1995) εξήγαγαν ένα διάγραμμα

υπολογισμού του συντελεστή “C” σε περιπτώσεις όπου το δάπεδο παρουσιάζει κλίση μικρότερη των 70° , οι οποίες αποτελούν και τις περιπτώσεις όπου εντοπίζονται τα ζητήματα χαμηλής συμβατότητας.

- Δεν δύνανται να διαχειριστούν μέτωπα με αρκετά πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, γεγονός που οδηγεί στις περισσότερες των περιπτώσεων σε υπεραπλούστευση αυτών των γεωμετριών.
- Σε αρκετές περιπτώσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν τα αποτελέσματα κάποιας τυχόν χαμηλής αποτελεσματικότητας ανατίναξης.
- Σε αρκετές των περιπτώσεων επιλέγεται ο κενός χώρος του εξορυγμένου πετρώματος να πληρωθεί με υλικό λιθογόμωσης. Παρόλα αυτά δεν λαμβάνεται υπόψιν επιπρόσθετη ενίσχυση της σταθερότητας που δύναται να προσδώσει στο μέτωπο η προσθήκη αυτού του υλικού. Σε πολλές των περιπτώσεων ζητήματα ευστάθειας του υλικού λιθογόμωσης σε κενά μέτωπα εξόρυξης αντιμετωπίζονται εκτός του Stability Graph με την χρήση της θεωρίας του Mitchell (Mitchell, Olsen and Smith, 1982).
- Για την κατασκευή των διαγραμμάτων δεν λαμβάνονται υπόψιν ζητήματα χρόνου αναμονής και έκθεσης της εξεταζόμενης επιφάνειας από την ολοκλήρωση των εργασιών μέχρι την στιγμή λήψης των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και παράγοντες που οφείλονται σε ασυνέχειες της βραχώμαζας.
- Ο καθορισμός των ζωνών του διαγράμματος ευστάθειας ενέχει μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας.

Πέραν των ανωτέρω ισχύουν ακόμη και οι παρακάτω περιορισμοί (Jang, 2014):

- Η μέθοδος του Stability Graph δεν λαμβάνει υπόψιν την συσχέτιση του πρωτογενούς εντατικού πεδίου με τον προσανατολισμό του μετώπου εξόρυξης (Martin et al., 1999).
- Το Stability Graph δημιουργήθηκε μέσα από εύρη τιμών από μία συγκεκριμένη βάση δεδομένων. Κατ’ αυτό το τρόπο η εφαρμογή του γραφήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται για περιπτώσεις μετώπων όπου παρουσιάζουν συνθήκες παραπλήσιες με αυτές της αρχικής βάσης δεδομένων.
- Δεν συμπεριλαμβάνονται ζητήματα που αφορούν την συνεισφορά της ενισχυόμενης εντατικής κατάστασης λόγω της αλληλουχίας των μετώπων εξόρυξης.

- Δεν λαμβάνονται υπόψιν συνθήκες εκρηκτικής θραύσης του πετρώματος (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001).

3.4.2 Επιπλέον παράγοντες επίδρασης στην ευστάθεια μετώπου

3.4.2.1 Εισαγωγή

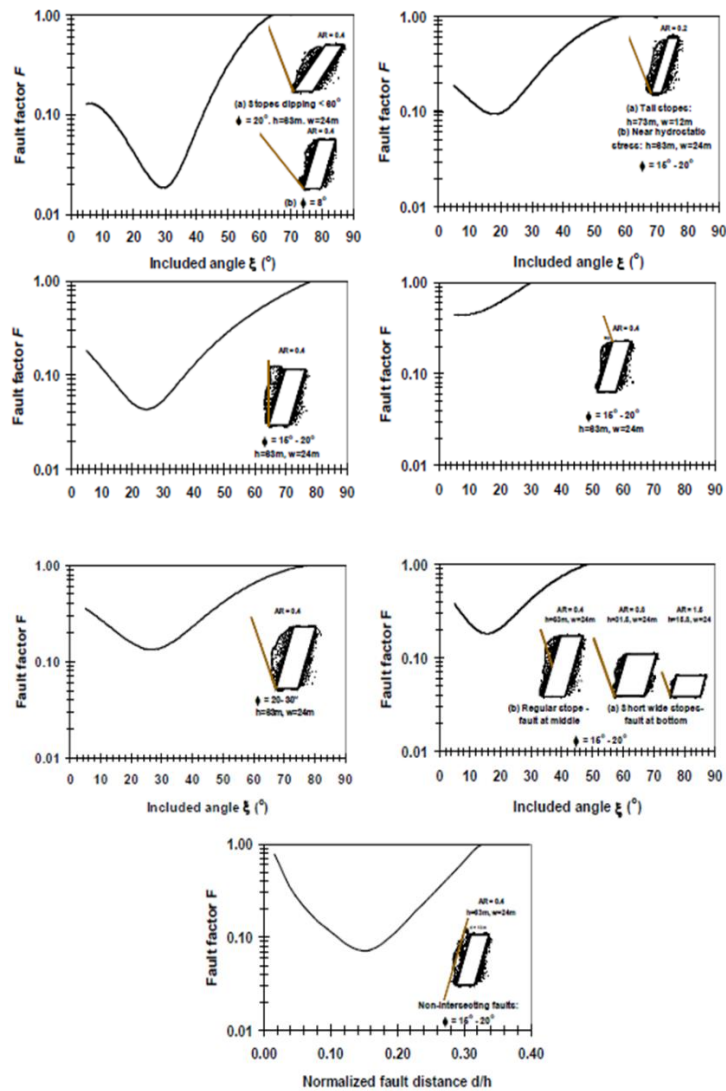
Πέραν των υπολοίπων παραγόντων, οι οποίοι επιδρούν στην ευστάθεια ενός μετώπου εξόρυξης αλλά και στην μέθοδο του Stability Graph υπάρχουν και ορισμένοι ακόμα που αξίζει να επισημανθούν. Πιο συγκεκριμένα ακολούθως θα αναλυθεί η επίδραση του παράγοντα ύπαρξης ρηγμάτων (F) στην ευστάθεια της εξεταζόμενης επιφάνειας του κενού χώρου εξόρυξης, καθώς επίσης και η χρονική επίδραση και οι παράγοντες που αφορούν την διαδικασία της ανατίναξης.

3.4.2.2 Παράγοντας ρηγμάτων (F)

Το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας Q δεν λαμβάνει υπόψιν την παρουσία ρηγμάτων στην περιοχή εξέτασης, όπως και κατ' επέκταση ο τροποποιημένος δείκτης ποιότητας βραχώμαζας Q' (Suorineni, 2010). Παρόλα αυτά είναι απολύτως αντιληπτό ότι η ευστάθεια των ανοικτών μετώπων εξόρυξης μπορεί να επηρεαστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη κάποιου συστήματος ρηγμάτων γειτονικά με τον χώρο διάνοιξης. Με σκοπό την εξάλειψη του συγκεκριμένου ζητήματος οι Suorineni et al (1999) εισήγαγαν έναν παράγοντα ρηγμάτων (F) και κατ' επέκταση μία νέα τροποποιημένη μορφή του δείκτη ευστάθειας (N'_f) με σκοπό να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο ζήτημα και στην μέθοδο του Stability Graph, η οποία είναι η εξής:

$$N'_f = (Q') \times (A) \times (B) \times (C) \times (F)$$

Ακολούθως (βλ. Εικόνα 3.19) δίδονται ορισμένα διαγράμματα υπολογισμού του παράγοντα ρηγμάτων σε ποικίλες επικρατούσες συνθήκες. Όπως γίνεται αντιληπτό τα ρήγματα τείνουν να εμφανίσουν την μέγιστη δυνατή επίδρασή τους στην ευστάθεια των μετώπων όταν η διαφορά κλίσης μεταξύ του εξορυκτικού χώρου και του ρήματος κυμαίνεται μεταξύ 20-30°.



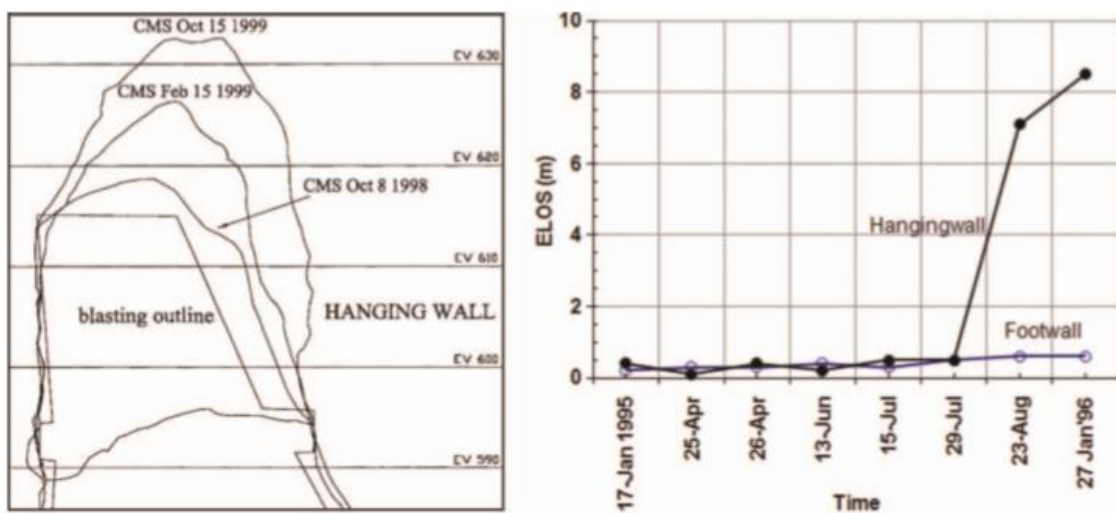
Εικόνα 3.19: Διαγράμματα προσδιορισμού συντελεστή ρηγμάτων (F) (Suorineni, 2010)

3.4.2.3 Χρονικές επιδράσεις

Με σκοπό οι εργασίες αποκομιδής του θραυσμένου μεταλλεύματος εντός του μετώπου εξόρυξης, μετά την ανατίναξη αυτού, να πραγματοποιούνται με τα μέγιστα δυνατά επίπεδα ασφάλειας για το προσωπικό, είναι πολύ σημαντικό να διενεργείται ένας καλός σχεδιασμός της εκμετάλλευσης (Suorineni, 2010). Σε γενικές γραμμές τα κενά μέτωπα εξόρυξης σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην δημιουργούνται εκτεταμένα προβλήματα ασταθούς συμπεριφοράς για χρονική περίοδο από έναν έως έξι μήνες από την πρώτη ανατίναξη έως την ολοκλήρωση της αποκομιδής του εξορυγμένου υλικού. Παρόλα αυτά σε πολλές των περιπτώσεων ο χρόνος ζωής των μετώπων εξόρυξης δύναται να ξεπεράσει τον αρχικά αναμενόμενο, λόγω διαταραχών που μπορεί να προκύψουν στον κύκλο της εξορυκτικής διαδικασίας. Ο Potvin (1988) αναφέρει ότι ο χρόνος μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια της εκσκαφής με διάφορους τρόπους μέσα από μεταβολές τις οποίες μπορεί να υποστεί η

βραχόμαζα οφειλόμενες σε παράγοντες όπως η παρουσία και δράση του νερού, αλλαγές στην εντατική κατάσταση ή σε επίδραση της δόνησης από τις ανατινάξεις και την δυναμική φόρτιση του περιβάλλοντος σχηματισμού, οι οποίες είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε εκρηκτική εκτόνωση των τάσεων και εκτίναξη πετρώματος (rockbursts).

Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα επίδρασης του χρόνου στην αύξηση της αποφλοιώσης των τοιχωμάτων ενός μετώπου στο Ruttan Mine, αλλά και ένα παράδειγμα επίδρασης του χρόνου στην αύξηση του ELOS στα τοιχώματα ενός μετώπου εξόρυξης από το Detour Lake Mine.



Εικόνα 3.20: 3.20^α: Χρονική εξάρτηση της διεύρυνσης της αποφλοιώσης : Ruttan Mine, 3.20^β: Χρονική εξάρτηση της αύξησης του ELOS : Detour Lake Mine (δεδομένα από Dunn και Pakalnis) (Suorineni, 2010)

Το συγκεκριμένο ζήτημα κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν οι Tannant & Diederichs (1997), προσπαθώντας να αποδώσουν μία χρονικά εξαρτώμενη προσέγγιση του δείκτη ευστάθειας βραχόμαζας μέσα από δεδομένα από το Kidd Mine (Suorineni, 2010). Πιο συγκεκριμένα εισήγαγαν έναν συντελεστή χρόνου (T) και ο τροποποιημένος δείκτης ευστάθειας βραχόμαζας που προέκυψε ήταν ο εξής:

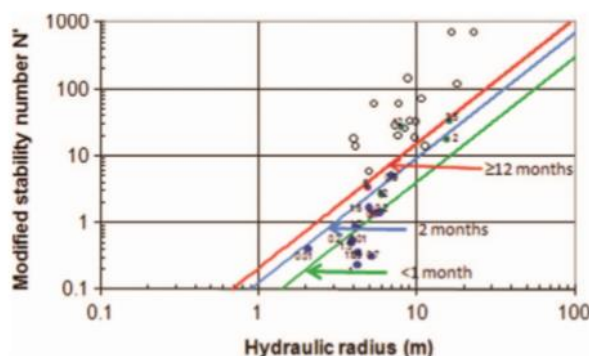
$$N^* = (Q') \times (A) \times (B) \times (C) \times (T)$$

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας αντιστοίχισης των τιμών του συντελεστής χρόνου (T) με τον χρόνο έκθεσης των τοιχωμάτων του μετώπου και την τιμή του τροποποιημένου δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q' (Εικόνα 3.21).

Wall exposure time	Time factor, T	
	$Q' > 10$	$Q' < 10$
<3 months	1	0.8
3-5 months	0.8	0.5
5-12 months	0.5	0.3
>12 months	0.3	0.2

Εικόνα 3.21: Πίνακας προσδιορισμού του χρονικού συντελεστή (T) (Suorineni, 2010)

Οι Heslop και Dight (1993) μέσα από μελέτη τους προχώρησαν στην δημιουργία ενός ειδικού τύπου Stability Graph βασισμένο στην χρονική εξάρτηση της ευστάθειας του μετώπου (βλ. Εικόνα 3.22). Οι άξονες του διαγράμματος που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιοι με εκείνους του τροποποιημένου Stability Graph. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα της προσέγγισης αυτής σε συνδυασμό με τις μεταβατικές ζώνες του τροποποιημένου Stability Graph και της προσέγγισης του Nickson (1992) είχαν ως αποτέλεσμα να προσδώσουν μία πρόβλεψη του χρόνου έκθεσης των εξεταζόμενων επιφανειών όσον αφορά την εμφάνιση ευσταθούς συμπεριφοράς.



Εικόνα 3.22: Χρονικά εξαρτώμενο Stability Graph (Suorineni, 2010)

3.4.2.4 Επιδράσεις ανατινάξεων

Η μέθοδος του Stability Graph δεν λαμβάνει υπόψιν την επίδραση των ανατινάξεων στην διατάραξη της ευσταθούς συμπεριφοράς των τοιχωμάτων του μετώπου εξόρυξης (Suorineni, 2010).

Όσον αφορά τις επιπτώσεις που επιφέρουν οι ανατινάξεις στην ευστάθεια του εξορυκτικού χώρου έχουν παρατηρηθεί τα εξής:

- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την βιβλιογραφία δείχνουν ότι η μέθοδος της διάτρησης και ανατίναξης δύναται να επιφέρει στα τοιχώματα της εκσκαφής αστοχία μέχρι και ενός μέτρου βάθους. Η έκταση της συγκεκριμένης αστοχίας εξαρτάται τόσο

από την ποιότητα της βραχώμαζας, όσο και από την τεχνική ανατίναξης που ακολουθείται.

- Στις ανατινάξεις παραγωγής (μέτωπα εξόρυξης), σύμφωνα με τους Clark και Pakalnis (1997), η φθορά στα τοιχώματα της εκσκαφής προσεγγίζει περίπου το μισό μέτρο.

3.5 Κατηγορίες Stability Graph βασισμένες στην αραίωση του μεταλλεύματος και την υπέρθραυση του εξορυκτικού χώρου

3.5.1 Μέθοδος Stability Graph βασισμένη στο φαινόμενο της αραίωσης

3.5.1.1 Εισαγωγή

Την ιδέα να δημιουργηθεί ένα τροποποιημένο διάγραμμα ευστάθειας, το οποίο θα μπορεί να παρέχει μία ποσοτική ένδειξη - πρόβλεψη του ποσοστού των μη προγραμματισμένων προσμίξεων λόγω αστοχίας της εξεταζόμενης επιφάνειας προσπάθησαν να υλοποιήσουν οι Παραϊοανου και Suorineni (2015). Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις πλατιών κοιτασμάτων και σε στενά φλεβικά κοιτάσματα, εν αντιθέσει με τη συμβατική μέθοδο του Stability Graph (βλ. ενότητα 3.2) και το ELOS Stability Graph (βλ. ενότητα 3.5.2), εκ των οποίων το πρώτο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μεγάλου πλάτους κοιτάσματα, ενώ το δεύτερο μόνο σε στενά φλεβικά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντική πρόοδο επί του συγκεκριμένου θέματος είχαν πραγματοποιήσει και σε παλαιότερα έτη αρχικά ο Pakalnis (1986,1993) και στην συνέχεια οι Pakalnis, Poulin και Hadjigeorgiou (1995), με τα αποτελέσματα των μελετών τους να παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

3.5.1.2 Αρχική προσέγγιση κατά Pakalnis (1986,1993)

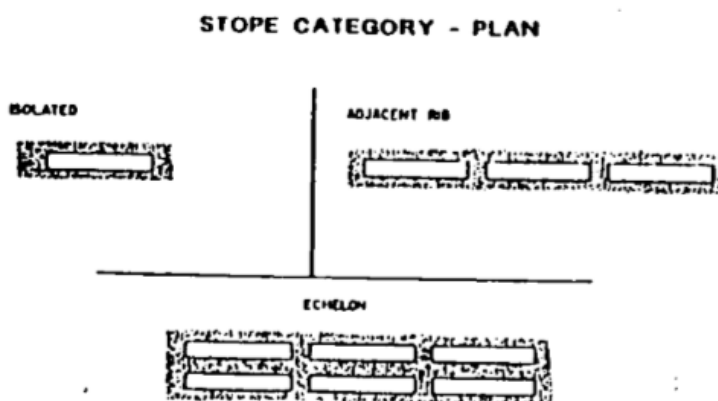
Την αρχική προσέγγιση του stability graph βασισμένο στο φαινόμενο της αραίωσης ανέπτυξε για πρώτη φορά με την έκθεσή του ο Pakalnis (1986) και την ολοκλήρωσε ο ίδιος το 1993 μέσα από μία μελέτη 5 ετών με την σύμπραξη των Ruttan Mine of Hudson Bay Mining & Smelting Inc. , CANMET και του Department of Mines of Manitoba (Clark, 1998). Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι η τελική έκθεση που προέκυψε ήταν συμπερασματικά ένα έργο των Pakalnis & Vongpraisal (1993). Τα διαγράμματα αυτά όπως θα αναλυθεί και παρακάτω χρησιμοποιούν τον δείκτη ποιότητας βραχώμαζας RMR και την υδραυλική ακτίνα της εξεταζόμενης επιφάνειας με σκοπό να προβλέψουν ένα πιθανό ποσοστό πρόσμιξης του τελικού προϊόντος. Σε γενικά πλαίσια ο σκοπός ήταν η δημιουργία οδηγών ευστάθειας για την εξόρυξη μετώπων μεγάλων διαστάσεων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν σε 43 μέτωπα εξόρυξης σε διάφορα στάδια της εξορυκτικής διαδικασίας και συνολικά 133 παρατηρήσεις των παρακάτω ιδιοτήτων (Clark, 1998):

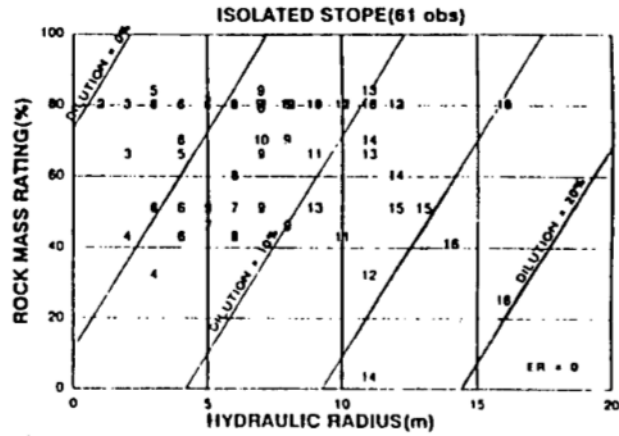
- Δείκτης ποιότητας βραχώμαζας RMR
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μετώπων εξόρυξης
- Παρατηρήσεις δεδομένων περί προσμίξεων, αναλύσεις αποτελεσμάτων εξορυκτικής διαδικασίας, ποσότητα εξορυγμένου υλικού, ποσότητα υλικού που φορτώθηκε – μεταφέρθηκε
- Το κόστος της εξόρυξης
- Τον τρόπο διαμόρφωσης της διάταξης των μετώπων στον χώρο (απομονωμένα, ραβδωτά (σε σειρά), σε στοίχιση)
- Μέθοδος εκμετάλλευσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την κατασκευή των διαγραμμάτων, ως επιφάνεια αναφοράς επιλέγεται εκείνη της οροφής του μετώπου (“επικρεμάμενο” τοίχωμα), κάνοντας την παραδοχή ότι το σύνολο της αραιώσης προέρχεται από αστοχία αυτής.

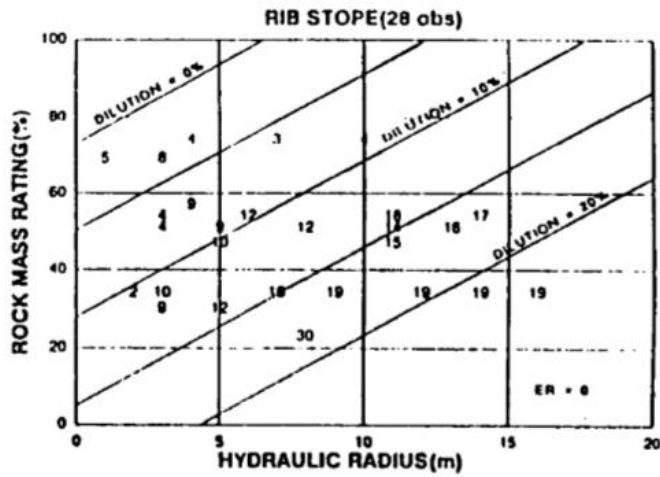
Κατ’ αυτό το τρόπο σύμφωνα με τους Pakalnis & Vongpraisal (1993) προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα (βλ. Εικόνες 3.24, 3.25, 3.26), καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε έναν από τους τρεις τύπους διαμόρφωσης της διάταξης των μετώπων εξόρυξης στον χώρο (βλ. Εικόνα 3.23).



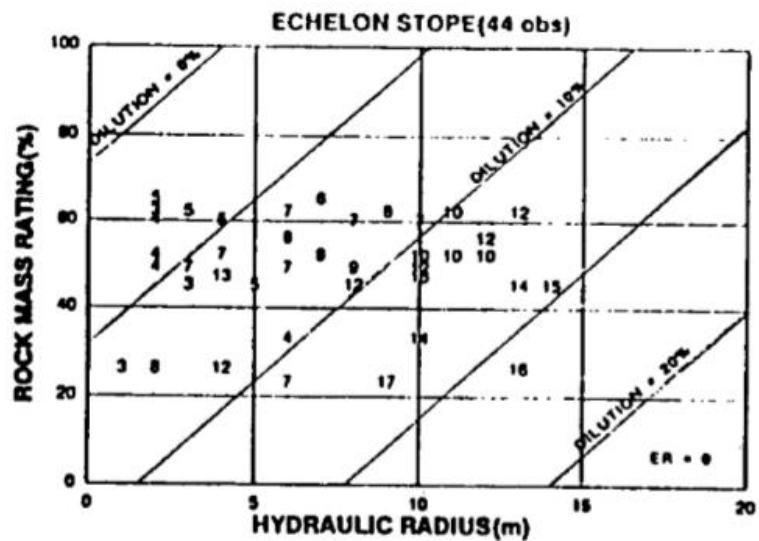
Εικόνα 3.23: Τρόπος διαμόρφωσης διάταξης εξεταζόμενων μετώπων, Απομονωμένο (Αριστερά), Ραβδωτά σε σειρά (Δεξιά), Σε στοίχιση (Κάτω) (Pakalnis & Vongpraisal, 1993)



Εικόνα 3.24: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσοστού προσμίξεων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά μετώπου – βραχώμαζας (απομονωμένα μέτωπα εξόρυξης) (Pakalnis & Vongpraisal, 1993)



Εικόνα 3.25: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσοστού προσμίξεων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά μετώπου – βραχώμαζας (ραβδωτή διάταξη μετώπων εξόρυξης) (Pakalnis & Vongpraisal, 1993)



Εικόνα 3.26: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσοστού προσμίξεων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά μετώπου – βραχώμαζας (στοιχισμένη διάταξη μετώπων εξόρυξης) (Pakalnis & Vongpraisal, 1993)

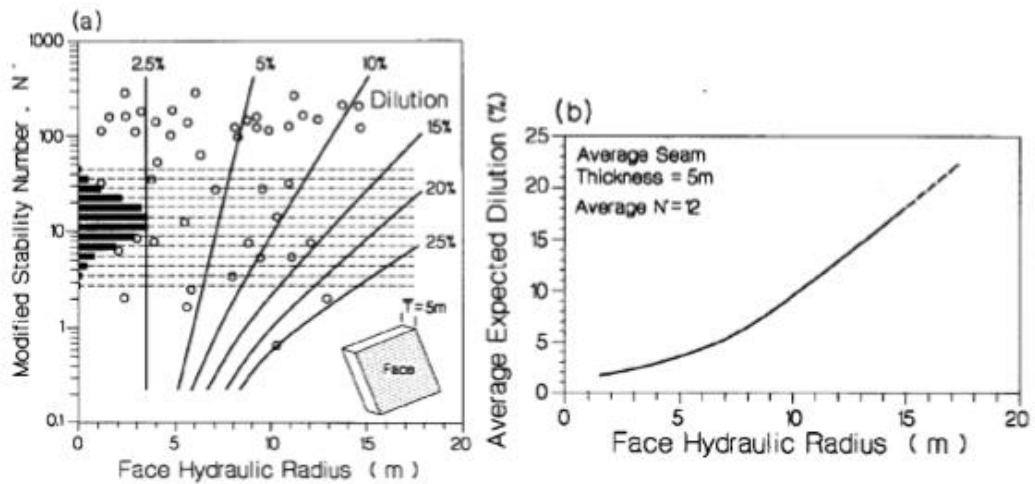
Παρόλο που τα ανωτέρω διαγράμματα αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στον άμεσο προσδιορισμό του αναμενόμενου ποσοστού πρόσμιξης στο τελικό αποληφθέν υλικό, η εφαρμογή τους ενέχει ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς, οι οποίοι είναι οι εξής (Clark, 1998):

- Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις μελέτες περιπτώσεων ενέχουν ένα σημαντικό ποσοστό σφάλματος, λόγω χρησιμοποίησης μεθόδων ποσοτικοποίησης της αραίωσης υψηλού ποσοστού ανακρίβειας.
- Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις μελέτες περιπτώσεων αφορούν συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά μεταλλεύματος και σχεδιαστικούς παράγοντες εξορυκτικής διαδικασίας βασισμένα στις ανάγκες του εκάστοτε μεταλλείου και πάνω σε αυτά βασίστηκε η κατασκευή των διαγραμμάτων.
- Εφόσον τα ποσοστά των προσμίξεων σχετίζονται με το πλάτος του μετώπου, τα διαγράμματα που προέκυψαν δύνανται να εφαρμοστούν μόνο για περιπτώσεις παραπλήσιου πλάτους με αυτά που εξετάστηκαν (8-15 m).
- Δεν διακρίνεται η διαφορά μεταξύ του ποσοστού επιρροής της κάθε επιφάνειας του μετώπου στο φαινόμενο, αφού θεωρείται ότι όλη η αραίωση προέρχεται από την οροφή (επικρεμάμενο τοίχωμα) αυτού.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν ζητήματα υποστήριξης εξορυκτικού χώρου, φαινομένων υποσκαφής και παράγοντες σχετιζόμενοι με την διάτρηση και την ανατίναξη.

3.5.1.3 Προσέγγιση dilution-based Stability Graph κατά Pakalnis, Poulin, & Hadjigeorgiou (1995)

Οι Pakalnis et al. (1995) προσπάθησαν μέσα από την μελέτη τους σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον εξορυκτικής διαδικασίας να συνδέσουν πραγματικές μετρήσεις προσμίξεων με το Stability Graph (Diederichs & Kaiser, 1996). Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής προέκυψαν για εξορυκτικούς χώρους πλάτους 5 m.

Στην Εικόνα 3.27 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξήχθησαν από την συγκεκριμένη μελέτη, με το αριστερό να αποτελεί την βασική προσέγγιση αναφοράς και το δεξί να αποτελεί ένα γράφημα προσδιορισμού του ποσοστού προσμίξεων σε σχέση με την υδραυλική ακτίνα της εξεταζόμενης επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι το δεύτερο διάγραμμα προέκυψε για περιπτώσεις μετώπων με μέση τιμή πλάτους 5 m και μέση τιμή τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N' ίση με 12.



Εικόνα 3.27: 3.27^α Αριστερά: Τροποποιημένο διάγραμμα ευστάθειας συνδυασμένο με ποσοστά πρόσμιξης, 3.27^β Δεξιά: Διάγραμμα προσδιορισμού μέσω ποσοστού αραίωσης (Pakalnis, Roulin, & Hadjigeorgiou, 1995)

Συνετό θα ήταν να παρουσιαστούν ορισμένοι περιορισμοί στην εφαρμογή της συγκεκριμένης προσέγγισης (Mouhabbis, 2013):

- Η χρήση των διαγραμμάτων που προέκυψαν ενέχει σημαντικό ρίσκο, λόγω του ότι αυτά έχουν προκύψει για δεδομένη μέση τιμή πλάτους ανοίγματος εκσκαφής (βλ. Εικόνα 3.27^α) και τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας (βλ. Εικόνα 3.27^β). Κατ' αυτό το τρόπο μία σχετικά ασφαλής εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου θα πρέπει να απευθύνεται σε αντίστοιχες συνθήκες.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν ζητήματα αποτόνωσης, αλλαγή στην εντατική κατάσταση της βραχώμαζας, παράγοντες ανατίναξης, χρονική εξάρτηση αποτελεσμάτων, αστοχίες λόγω υψηλών πιέσεων και παραλλαγές στον σχεδιασμό των μετώπων εξόρυξης.
- Η εφαρμογή των διαγραμμάτων δεν είναι εφικτή για δύσκαμπτο πέτρωμα ή βραχώμαζα που παρουσιάζει φαινόμενα ερπυσμού.
- Ο βασικός περιορισμός της εφαρμογής των διαγραμμάτων ως προς την πρόβλεψη των ποσοστών αραίωσης είναι ότι το μοντέλο δεν δίνει ποσοτικοποιημένη εικόνα της αραίωσης του μεταλλεύματος παρά μόνο εξετάζει φαινόμενα περιστασιακών προσμίξεων.

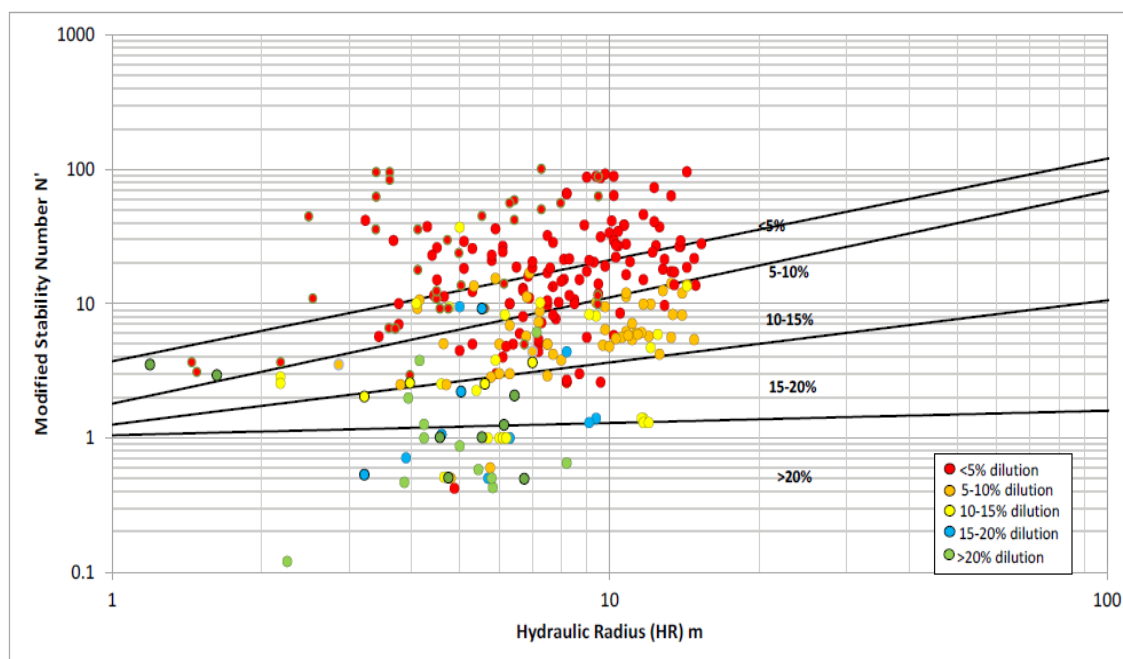
3.5.1.4 Προσέγγιση Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou & Suorineni (2015)

Οι Papaioanou και Suorineni (2015) μέσα από μελέτη την οποία διενήργησαν κατάφεραν να εξάγουν έναν τύπο Stability Graph, ο οποίος επιτυγχάνει την ποσοτική εκτίμηση των ποσοστών πρόσμιξης που αναμένονται να συναντηθούν εντός του μετώπου εξόρυξης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 226 μελέτες περιπτώσεων από έξι διαφορετικές μεταλλοφόρες εκμεταλλεύσεις στην Αυστραλία. Τα δεδομένα που ελήφθησαν αναλύθηκαν στατιστικά με την

μέθοδο λογιστικής παλινδρόμησης και την μέθοδο πιθανοτήτων του Bayes, με σκοπό τον προσδιορισμό των γραμμικών ορίων των ποσοστών πρόσμιξης. Παρόλο που τα γραφήματα που προέκυψαν αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία προς τον καλύτερο σχεδιασμό των μετώπων εξόρυξης, συνετό είναι να τονιστεί ότι λόγω του ότι αυτά βασίζονται σε συγκεκριμένες σχεδιαστικές, γεωλογικές και γεωμηχανικές συνθήκες, η εφαρμογή τους αναμένεται να έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία για περιπτώσεις όπου εντοπίζονται παραπλήσιες συνθήκες.

Ο υπολογισμός της αραίωσης έγινε μέσα από τη σύγκριση του θεωρητικά αναμενόμενου σχήματος του εξορυκτικού χώρου και του τελικού σχήματος αυτού μετά την εμφάνιση φαινομένων υπέρθραυσης των τοιχωμάτων.

Στην Εικόνα 3.28 παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα που κατασκεύασαν οι Paraiouan και Suorineni (2015) και το παρουσίασαν μέσα από την έκθεσή τους.



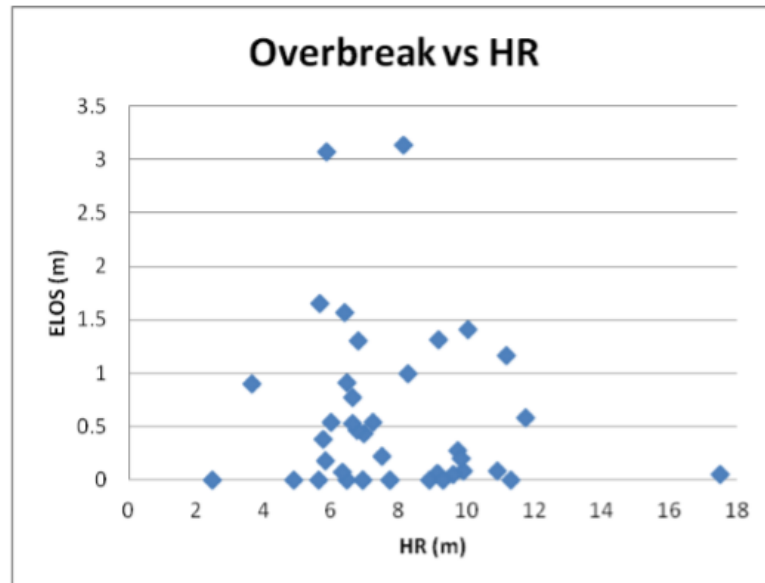
Εικόνα 3.28: Προσέγγιση του Stability Graph με ποσοτικό προσδιορισμό προσμίξεων (Paraiouan & Suorineni, 2015)

3.5.2 Μέθοδος ELOS Stability Graph

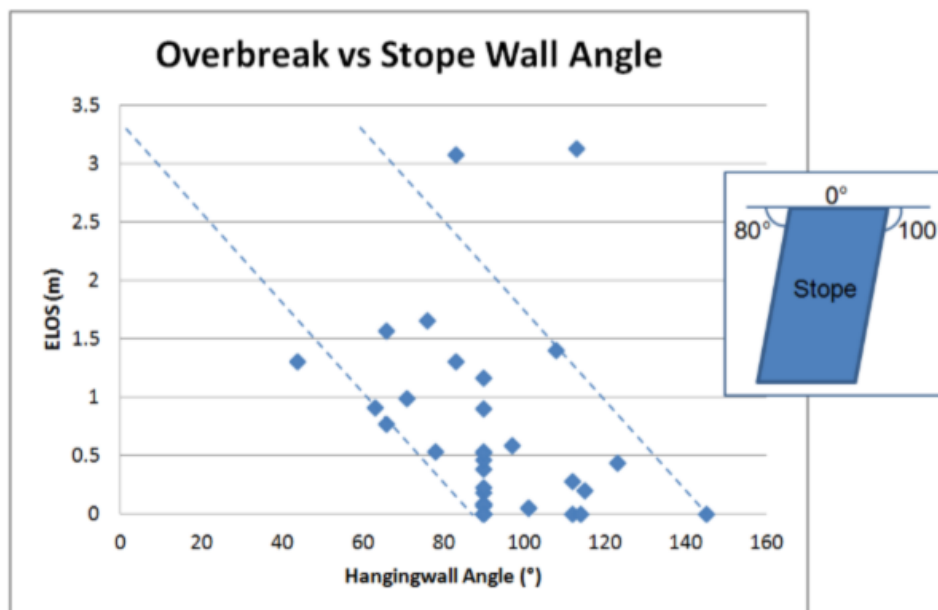
3.5.2.1 Διαγράμματα συσχέτισης ELOS και σχεδιαστικών παραμέτρων

Το ELOS όπως αναφέρθηκε (βλ. ενότητα 2.6) αποτελεί έναν πολύ βοηθητικό εργαλείο παρακολούθησης του βαθμού επιτυχίας του σχεδιασμού της εξορυκτικής διαδικασίας και διαχρονικά έχουν αναπτυχθεί αρκετά εμπειρικά διαγράμματα συσχέτισης του με σχεδιαστικές παραμέτρους του μετώπου εξόρυξης. Ακολούθως παρατίθενται ορισμένα από αυτά τα διαγράμματα όπου οι σχεδιαστικές παράμετροι που αναφέρονται είναι η υδραυλική ακτίνα

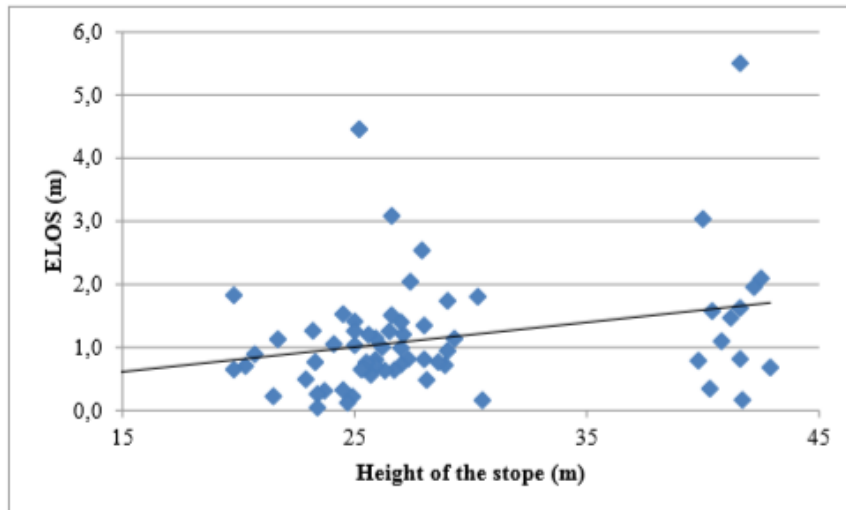
(HR), η γωνία κλίσης της οροφής του μετώπου, το ύψος της εξεταζόμενης επιφάνειας και το πλάτος αυτής (Εικόνες 3.29, 3.30, 3.31, 3.32).



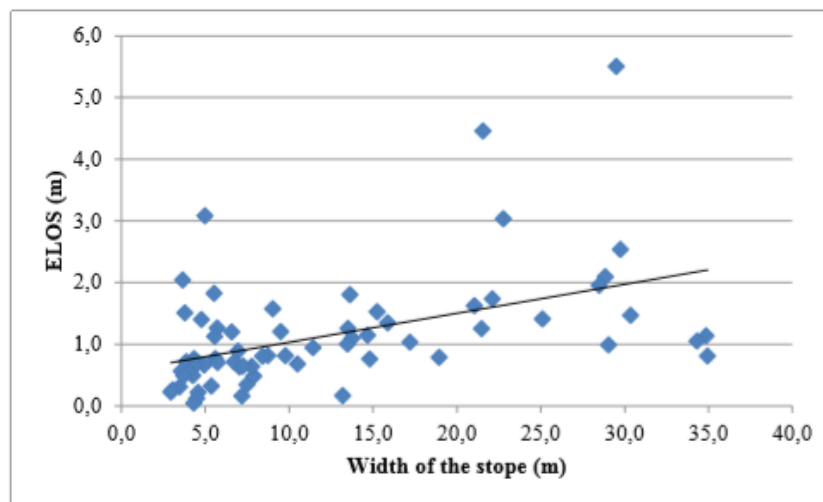
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα συσχέτισης ELOS – HR (Stephenson & Sandy, 2013)



Εικόνα 3.30: Διάγραμμα συσχέτισης ELOS - Γωνία κλίσης της οροφής του εξορυκτικού χώρου (Stephenson & Sandy, 2013)



Εικόνα 3.31: Διάγραμμα συσχέτισης ELOS - Ύψους μετώπου εξόρυξης (Tommila, 2014)



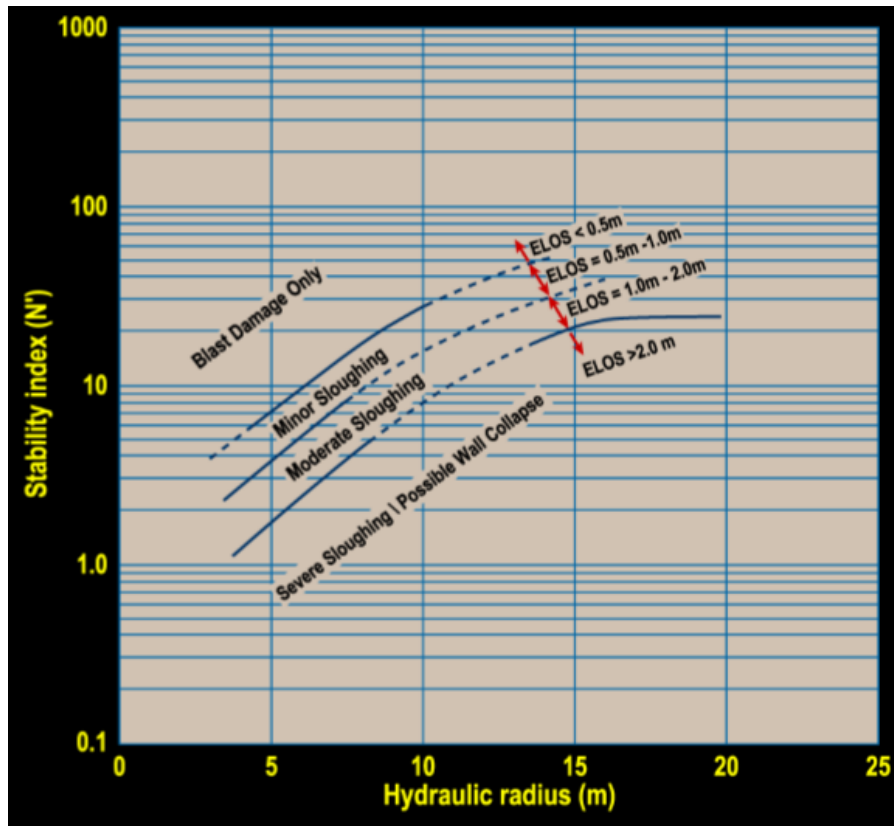
Εικόνα 3.32: Διάγραμμα συσχέτισης ELOS - Πλάτους μετώπου εξόρυξης (Tommila, 2014)

Σε γενικές γραμμές αναφορικά με τα τέσσερα διαγράμματα συσχέτισης που προηγήθηκαν αξίζει να σημειωθεί αρχικά ότι δεν εντοπίζεται κάποια ξεκάθαρη συσχέτιση του ELOS με την υδραυλική ακτίνα. Όσον αφορά την κλίση της οροφής του μετώπου εξόρυξης παρατηρείται ότι η υπέρθραυση περιορίζεται για μεγαλύτερες κλίσεις γεγονός που δείχνει ότι ο βασικός μηχανισμός της υπέρθραυσης είναι πιθανότερο να είναι η αστοχία λόγω κατάπτωσης βραχοσφηνών λόγω βαρύτητας. Επιπροσθέτως παρατηρείται ότι με αύξηση του ύψους ή του πλάτους του μετώπου αυξάνεται παράλληλα και η υπέρθραυση, άρα και το ELOS.

3.5.2.2 Παρουσίαση ELOS Stability Graph

Οι Clark και Pakalnis (1997) μέσα από την μελέτη τους συσχέτισαν το Stability Graph με τον δείκτη ELOS. Κατ' αυτό το τρόπο προέκυψε το ELOS Stability Graph (βλ. Εικόνα 3.33), το

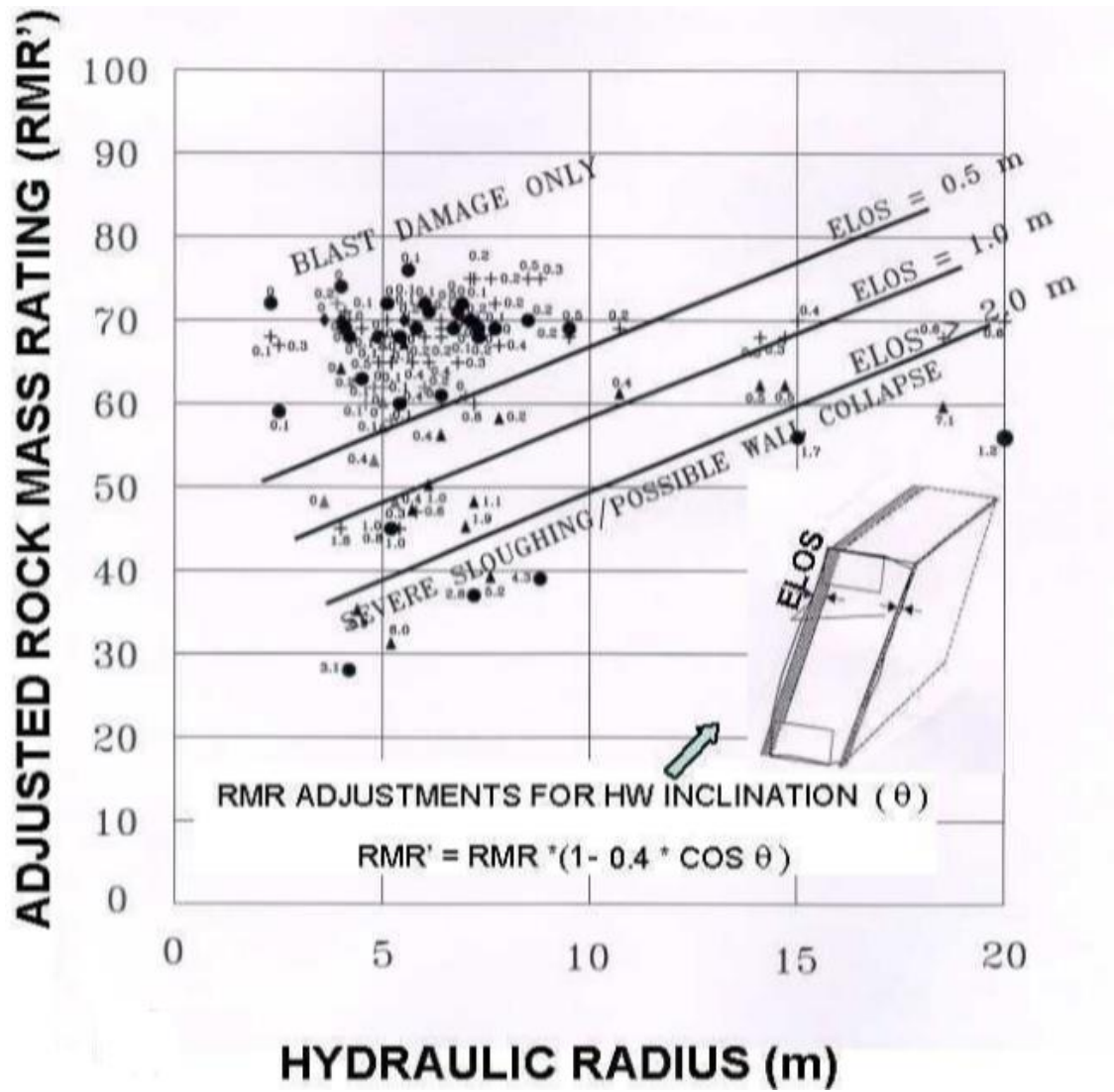
οποίο έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με την αντιστοίχιση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας με τα εύρη των τιμών του ELOS που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 2.16.



Εικόνα 3.33: ELOS Stability Graph (Clark & Pakalnis, 1997)

Το ELOS Stability Graph είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο πρόβλεψης του αναμενόμενου εύρους τιμής ELOS μίας εξεταζόμενης επιφάνειας. Παρόλα αυτά ένα βασικό μειονέκτημα, το οποίο παρουσιάζει είναι ότι δεν προσφέρει την δυνατότητα διενέργειας απόλυτης ποσοτικής εκτίμησης της τιμής αυτής (Suorineni, 2010). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η συμβατική αυτή προσέγγιση πραγματοποιήθηκε με δεδομένα που αφορούσαν μεγάλες συμπαγείς μεταλλοφορίες. Κατ' αυτό το τρόπο η εφαρμογή του διαγράμματος σε περιπτώσεις στενών φλεβικών μεταλλοφόρων κοιτασμάτων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη επιφύλαξη.

Μία ακόμη προσέγγιση του διαγράμματος ευστάθειας δίδεται ακολούθως (Εικόνα 3.34), με τα διαχωριστικά όρια των ζωνών συμπεριφοράς να μετατρέπονται σε γραμμικά από καμπυλόγραμμα, ενώ ακόμη στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται ο τροποποιημένος δείκτης ταξινόμησης βραχώμαζας RMR', έναντι του τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'.



Εικόνα 3.34: Ειδική μορφή ELOS Stability Graph (Clark & Pakalnis, 1997)

Κεφάλαιο 4^ο : Παρουσίαση αριθμητικών αναλύσεων – Ανάλυση παραδοχών και τιμών παραμέτρων

4.1 Εισαγωγή

Με σκοπό την εκτίμηση του αναμενόμενου ποσοστού εξωτερικής πρόσμιξης του μεταλλεύματος που θα προκύψει μέσα από μία καθορισμένων ορίων εκσκαφή, πολύ χρήσιμα εργαλεία αποτελούν λογισμικά αξιολόγησης ευστάθειας υπόγειων εκσκαφών βασισμένα σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RS2 της Rocscience.

Με την χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού διενεργούνται δοκιμές μέσα από τις οποίες αξιολογούνται κατά πρώτον η ευστάθεια των μετώπων εξόρυξης και κατά δεύτερον τα ποσοστά υπέρθραυσης που θα προκύψουν από τα τοιχώματα αυτού του εξορυκτικού χώρου. Η αξιολόγηση της ευστάθειας πραγματοποιείται μέσα από παραμετρικές αναλύσεις, οι οποίες αποσκοπούν μέσω της αλλαγής ορισμένων τιμών σημαντικών παραμέτρων να δημιουργήσουν διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας στα εξεταζόμενα μοντέλα. Τέλος, η αξιολόγηση αυτή έγκειται στην ανάλυση των ζωνών πετρώματος που εντοπίζονται να αστοχούν σε εφελκυσμό και διάτμηση.

Συνολικά εξετάστηκαν έξι κύκλοι μοντέλων προσομοίωσης, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές δοκιμές, μία για κάθε ξεχωριστή γωνία κλίσης διακλάσεων, δηλαδή στο σύνολό τους τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν ήταν 18.

4.2 Παραδοχές

4.2.1 Βασικές παραδοχές

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν οι βασικές παραδοχές, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και αποτελούν την βάση της κατασκευής των μοντέλων προσομοίωσης μέσα από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα και είναι κοινές για το σύνολο των δοκιμών.

Αρχικά, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται αντιμετωπίζονται στο σύνολό τους με σταθερό εντατικό πεδίο (constant field stress). Η απόφαση αυτή έναντι της διενέργειας ανάλυσης με βαρυτικό εντατικό πεδίο (gravity field stress) έγκειται κατά κύριο λόγο στο ότι τα μοντέλα με σταθερό εντατικό πεδίο συνήθως απαιτούν μικρότερο υπολογιστικό χρόνο έναντι των αντίστοιχων μοντέλων με βαρυτικό πεδίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές των περιπτώσεων πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και με τους δύο τύπους πεδίων, κάτι που

συνέβαλε εκ του αποτελέσματος στην απόφαση να παρουσιαστούν για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις τα μοντέλα με το σταθερό εντατικό πεδίο.

Δεύτερη βασική παραδοχή αποτελούν τα στάδια της μοντελοποίησης των προσομοιώσεων, όπου στο σύνολο των δοκιμών εντοπίζονται δύο διακριτά στάδια, τα οποία είναι:

- Στάδιο της αρχικής κατάστασης
- Στάδιο της εκσκαφής

Συνετό είναι κατά την παρουσίαση των δύο φάσεων, να αναλυθεί παράλληλα η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή των μοντέλων. Κατά το πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης, το οποίο καλείται “Στάδιο της αρχικής κατάστασης”, προσδιορίζονται οι αρχικές συνθήκες της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή της περιοχής γύρω από την εκσκαφή, η οποία αποτελεί την ζώνη επιρροής της διάνοιξης, ενώ επίσης καθορίζονται και οι γεωμετρικές διαστάσεις της πρόσοψης της εκσκαφής.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά καθορίζονται τα όρια της εκσκαφής, δηλαδή το ύψος και το πλάτος αυτής και εν συνεχεία η εκσκαφή περικλείεται μέσα σε ένα πιο ευρύ πλαίσιο, τα όρια του οποίου καθορίζονται σύμφωνα με την αναμενόμενη έκταση της ζώνης διαταραχής της διάνοιξης. Στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν στην εξωτερική ζώνη που δημιουργήθηκε αποδόθηκε ορθογωνική γεωμετρία με συντελεστή επέκτασης (expansion factor) ίσο με 4.

Στην συνέχεια προσδιορίζονται οι ιδιότητες των πετρωμάτων και των ασυνεχειών που συναντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος και αυτά εισάγονται με την επιθυμητή διάταξη εντός αυτής. Όσον αφορά τις ιδιότητες που αποδίδονται στους σχηματισμούς, αυτές θεωρείται πως είναι κοινές για το σύνολο των πετρωμάτων.

Με το πέρας αυτής της διαδικασίας, σειρά έχει ο καθορισμός του εντατικού πεδίου που συναντάται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Προς αυτόν τον σκοπό αρχικά καθορίζεται το βάθος της εκσκαφής, το οποίο ορίζεται σύμφωνα με το ύψος στο οποίο εντοπίζεται η στέψη του μετώπου εξόρυξης. Το ανώτερο αυτό σημείο της εκσκαφής ορίζεται στα 600 m από την επιφάνεια του εδάφους. Σημειώνεται ότι εφόσον χρησιμοποιείται σταθερό εντατικό πεδίο, δεν τοποθετείται κάποιο εξωτερικό φορτίο στην άνω πλευρά των εξωτερικών ορίων, όπως θα ήταν αναγκαίο εφόσον είχε χρησιμοποιηθεί βαρυτικό εντατικό πεδίο. Όσον αφορά την εντατική κατάσταση της εξεταζόμενης περιοχής, αυτή θεωρείται πως είναι λιθοστατική. Υπό αυτήν την κατάσταση οι τρεις κύριες τάσεις θεωρούνται ίσες μεταξύ τους και λαμβάνουν τιμή ίση με το

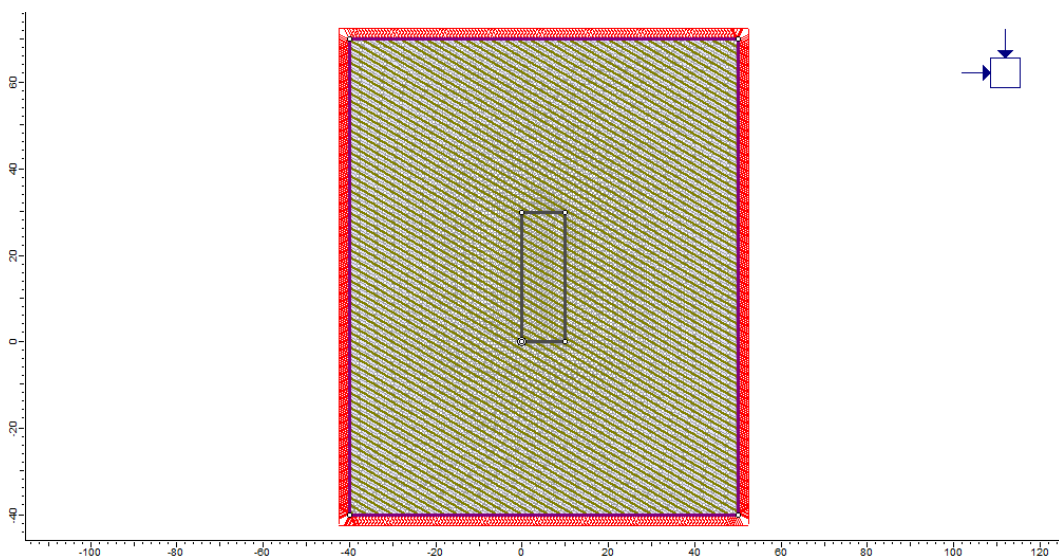
βάρος των υπερκειμένων στο βάθος της εκσκαφής, δηλαδή $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 = \rho m * g * z$ (Νομικός,2015).

Έτσι παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση που στο μοναδιαίο βάρος των σχηματισμών αποδίδεται η τιμή 0,027 MN/m³, τιμή που αντικατοπτρίζεται από τη μέση πυκνότητα των πετρωμάτων, η οποία είναι περίπου $\rho m = 2700 \text{ kg/m}$ (Νομικός,2015), οι κύριες τάσεις λαμβάνουν τιμή ίση με 16.2 MN/m² ($= 600 \text{ m} * 0.027 \text{ MN/m}^3$).

Τέλος, θα πρέπει να δημιουργηθεί ο κάρναβος των σημείων εντός της εξεταζόμενης περιοχής, στα οποία θα λαμβάνονται οι τιμές των μεταβλητών μεγεθών, αλλά και να αποδοθούν οι περιορισμοί κινήσεων στα εξωτερικά όρια του μοντέλου προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό το πλέγμα που επιλέγεται είναι βαθμονομημένο (graded) με τα στοιχεία να είναι οκτάκομβα τετράπλευρα. Επιπροσθέτως, όλα τα εξωτερικά όρια ακινητοποιούνται πλήρως μέσω πακτώσεων.

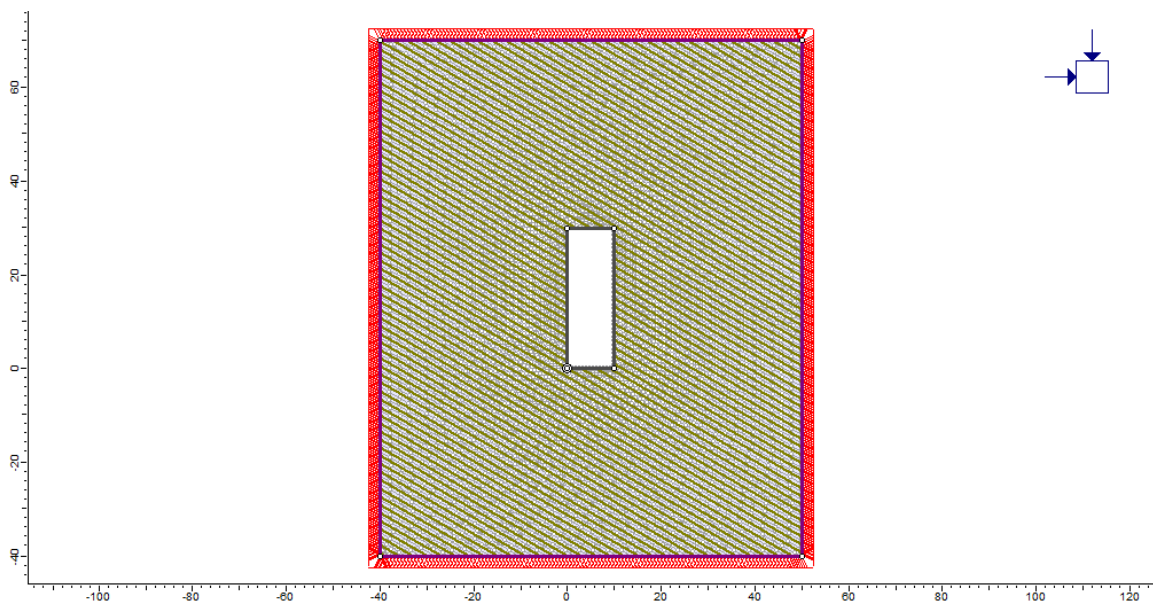
Όπως αναφέρθηκε, το πρωταρχικό πλεονέκτημα που ενέχει η εφαρμογή σταθερού εντατικού πεδίου είναι η ολοκλήρωση των υπολογισμών της ανάλυσης σε διακριτά πολύ μικρότερο χρόνο από ένα μοντέλο με τις ίδιες ιδιότητες και με μόνη διαφοροποίηση στον τύπο του εντατικού πεδίου της περιοχής ενδιαφέροντος. Τέλος, αξιοσημείωτο είναι το ότι σε ένα σημαντικό αριθμό αναλύσεων δεν συναντώνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ των αντίστοιχων μοντέλων με τους δύο τρόπους αντιμετώπισης του ζητήματος του πρωτογενούς πεδίου τάσεων.

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται η τυπική μορφή που λαμβάνει εξεταζόμενη περιοχή, κατά το στάδιο της αρχικής κατάστασης, στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος RS2.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της πρώτης φάσης (Στάδιο της αρχικής κατάστασης)

Κατά το δεύτερο στάδιο της μοντελοποίησης (Στάδιο της εκσκαφής) ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει την περιοχή, η οποία εκσκάπτεται. Για το σκοπό αυτό μέσα από αντίστοιχη διαδικασία αντιστοίχισης των κατάλληλων σχηματισμών εντός της εξεταζόμενης περιοχής, επιλέγεται η αφαίρεση του υλικού εντός των προκαθορισμένων από το πρώτο στάδιο ορίων της εκσκαφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρείται πως δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα κατάπτωσης κατά την αρχική διάνοιξη του μετώπου εξόρυξης, δηλαδή ότι τα τοιχώματα που προέκυψαν από την διαδικασία της εκσκαφής είναι ακριβώς τα ίδια με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Κατ' αυτό το τρόπο το σύνολο των φαινομένων αστοχίας στα τοιχώματα θεωρείται πως λαμβάνουν χώρα μετά την ολοκλήρωση της εξορυκτικής διαδικασίας. Ακολουθώς στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται η τυπική μορφή που λαμβάνει η πλήρως εξορυγμένη περιοχή του μετώπου, στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος RS2.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση της δεύτερης φάσης (Στάδιο της εκσκαφής)

Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέγεται μεταξύ του σταδίου αρχικής κατάστασης και του σταδίου της διάνοιξης να μην παρεμβληθεί στάδιο αποτόνωσης του υλικού εντός της εκσκαφής, καθώς δεν θεωρείται απαραίτητο εφόσον δεν θα χρησιμοποιηθούν μέτρα υποστήριξης του μετώπου εξόρυξης.

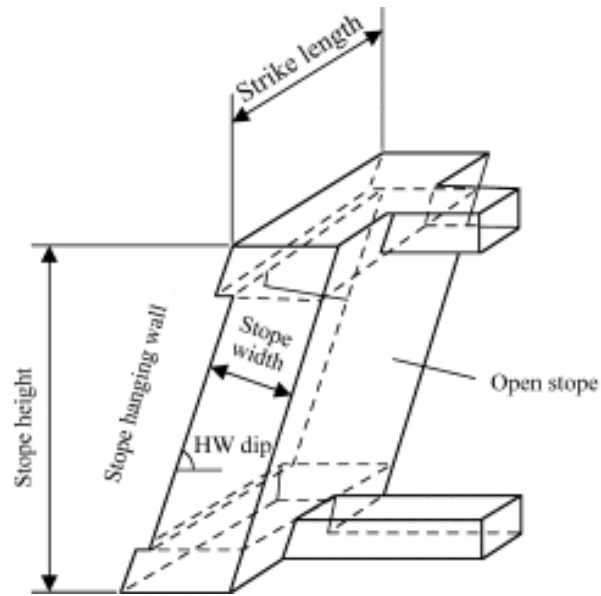
4.2.2 Παραδοχές τιμών παραμέτρων

4.2.2.1 Εξεταζόμενες γεωμετρίες μετώπων εξόρυξης

4.2.2.1.1 Εισαγωγή

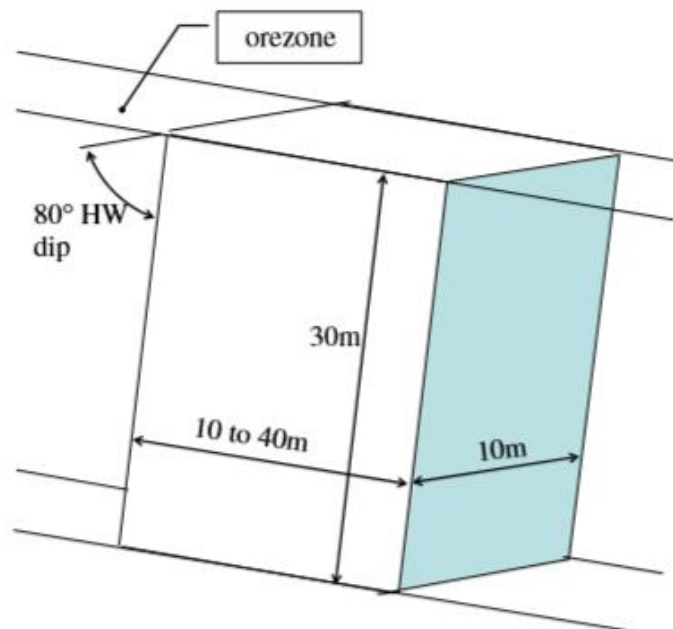
Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν προς διερεύνηση δύο βασικές γεωμετρίες μετώπου εξόρυξης.

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζονται γραφικά οι γεωμετρικές παράμετροι ενός μετώπου εξόρυξης.



Εικόνα 4.3: Γεωμετρικές παράμετροι κενού μετώπου εξόρυξης (Heidarzade, Saeidi, & Rouleau, 2019)

Οι Henning και Mitri (2007) βασισμένοι σε μελέτες περιπτώσεων σε μεταλλεία στον Καναδά, εξήγαγαν τα τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός κενού μετώπου εξόρυξης, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Τυπικές διαστάσεις μετώπου εξόρυξης (Henning & Mitri, 2007)

Αν και, όπως έχει ήδη επισημανθεί, το τελικό ποσοστό αραίωσης του μεταλλεύματος εξαρτάται από ένα σημαντικό πλήθος παραγόντων, οι διαστάσεις που απεικονίζονται στην παραπάνω εικόνα οδηγούν σε γενικές γραμμές σε χαμηλά επίπεδα πρόσμιξης. Παρόλα αυτά

στα πλαίσια της ανάλυσης έχει πολύ μεγάλη αξία να αναλυθούν και περιπτώσεις μειωμένης ευστάθειας ανυποστήρικτων μετώπων εξόρυξης. Όπως αναφέρεται από τους Henning και Mitri (2007), σε περιπτώσεις ύψους μετώπου μεγαλύτερο από 60 m, ο εξορυκτικός χώρος αναμένεται να εμφανίσει πάρα πολύ σημαντικά προβλήματα αστάθειας.

Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που ορίζεται ένα θεωρητικό μήκος προχώρησης (βάθος) του κενού μετώπου εξόρυξης, στην ανάλυση που ακολουθεί με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2, λόγω πραγματοποίησης δισδιάστατης ανάλυσης τύπου “plane strain”, το μήκος της εξορυγμένης περιοχής θεωρείται άπειρο. Παρόλα αυτά στην διάσταση αυτή τίθεται αξιωματικά η τιμή των 1000 m, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της υδραυλικής ακτίνας των εξεταζόμενων επιφανειών. Η τιμή των χιλίων μέτρων μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά άπειρη σε σχέση με τις πραγματικές τιμές που αποδίδονται στην συγκεκριμένη διάσταση. Η παραδοχή αυτή πραγματοποιείται με σκοπό να καταστεί δυνατή η συσχέτιση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το λογισμικό και αυτών που προκύπτουν από τις εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της ευστάθειας.

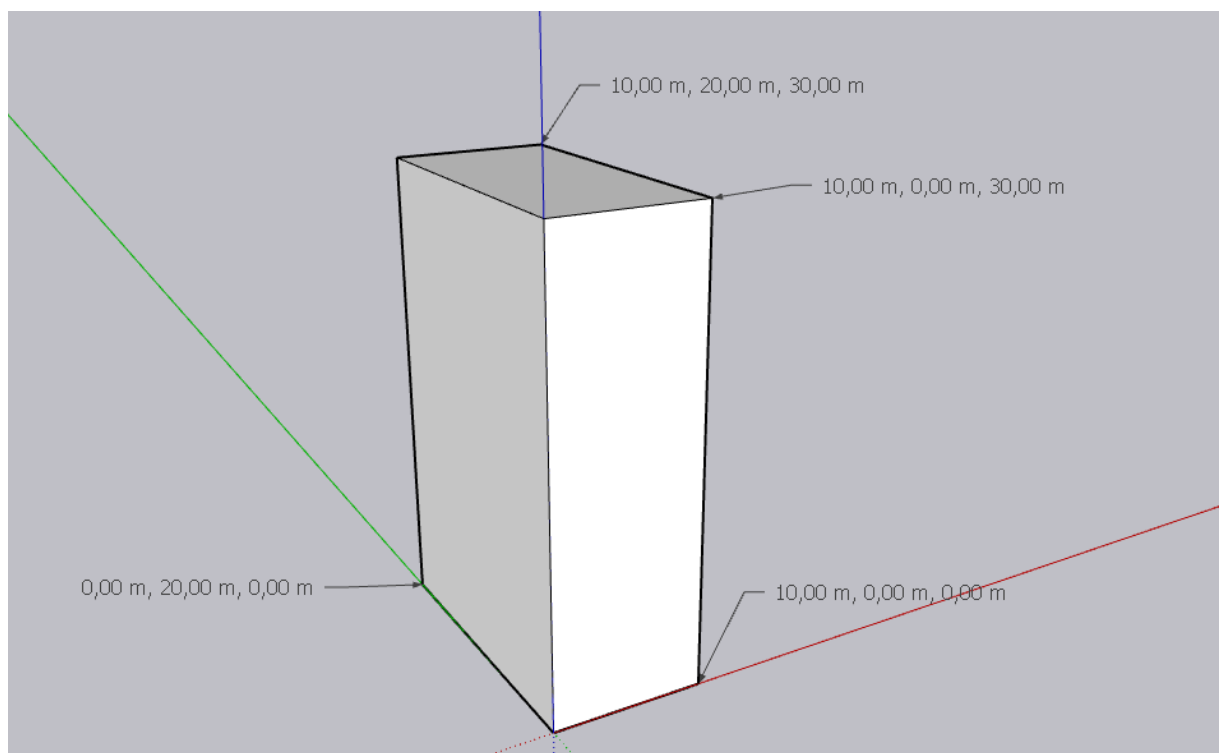
4.2.2.1.2 Πρώτος τύπος μετώπου εξόρυξης

Ο πρώτος τύπος μετώπου εξόρυξης αποτελεί την βασική εξεταζόμενη γεωμετρία εξορυκτικού χώρου. Αρχικά, το ύψος του εξορυκτικού χώρου είναι 30 m, ενώ το πλάτος αυτού τίθεται στα 10 m. Όσον αφορά το μήκος του μετώπου εξόρυξης όπως επισημάνθηκε προηγουμένως σε αυτό αποδίδεται η τιμή των 1000 m. Ωστόσο, εφόσον η διάσταση αυτή δεν μπορεί να ανταποκριθεί στην πραγματικότητα, τυπικά για το μήκος προχώρησης δίδεται και μία θεωρητική τιμή, ή οποία είναι τα 20 m. Τέλος, δεν δίδεται κλίση διαφορετική των 90° από την οριζόντιο στις παρειές του εξορυκτικού χώρου.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πίνακας 4.1) στον οποίο προσδιορίζονται τόσο η θεωρητική υδραυλική ακτίνα των εξεταζόμενων επιφανειών, με την θεώρηση των 20 m μήκος μετώπου αλλά και η υδραυλική ακτίνα (πρακτική) των επιφανειών υπό την θεώρηση μήκους 1000 m, λόγω της δισδιάστατης ανάλυσης του προγράμματος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραδοχή αυτή αν και είναι αναγκαία, έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνει αρκετά τις υδραυλικές ακτίνες. Σημειώνεται δε ότι η τιμή αυτή που αποδίδεται αποτελεί και την δυσμενέστερη περίπτωση που δύναται να συναντηθεί για τη συγκεκριμένη διάσταση. Πιο συγκεκριμένα, οι υδραυλικές ακτίνες, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι αυτές της στήλης “Υδραυλική ακτίνα (Π)”.

Πίνακας 4.1: Πίνακας γεωμετρικών διαστάσεων μετώπου εξόρυξης						
Επιφάνεια	Ύψος (m)	Πλάτος (m)	Μήκος (Θ) (m)	Μήκος (Π) (m)	Υδραυλική ακτίνα (Θ) (m)	Υδραυλική ακτίνα (Π) (m)
Στέγη (Crown)	-	10	20	1000	3.33	4.95
Αριστερή Παρειά (Left Sidewall)	30	-	20	1000	6	14.56
Δεξιά Παρειά (Right Sidewall)	30	-	20	1000	6	14.56

Παρακάτω παρατίθεται ένα σχέδιο του μετώπου εξόρυξης (Εικόνα 4.5), μέσα από το πρόγραμμα SketchUp 2020, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί σημάνσεις ώστε να είναι εμφανείς οι διαστάσεις αυτού.



Εικόνα 4.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση πρώτης χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας μετώπου εξόρυξης (Sketch Up 2020)

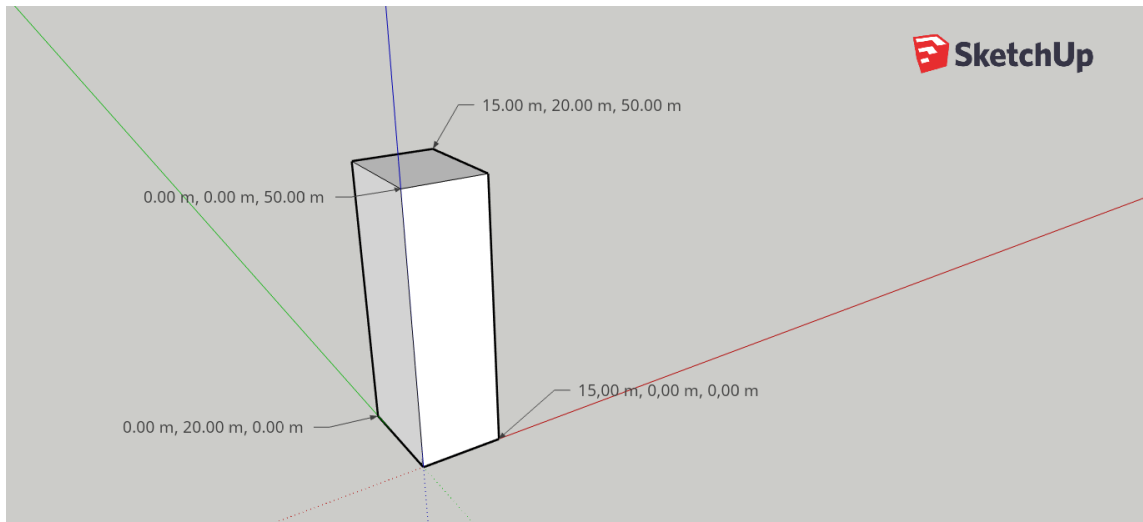
4.2.2.1.3 Δεύτερος τύπος μετώπου εξόρυξης

Στον δεύτερο τύπο μετώπου εξόρυξης δίνονται αυξημένες διαστάσεις κενού μετώπου, με εξαίρεση το μήκος προχώρησης, για το οποίο ισχύουν ακριβώς όσα αναφέρθηκαν και ανωτέρω. Πιο συγκεκριμένα το ύψος του εξορυκτικού χώρου ορίστηκε στα 50 m και το πλάτος αυτού 15 m. Επιπροσθέτως, στο μήκος του εξορυκτικού χώρου η θεωρητική τιμή των 1000 m, με την αναμενόμενη να είναι και σε αυτήν την περίπτωση στα 20 m. Τέλος, δεν δίδεται κλίση διαφορετική των από την οριζόντιο στις παρειές του εξορυκτικού χώρου.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πίνακας 4.2) στον οποίο προσδιορίζονται τόσο η θεωρητική υδραυλική ακτίνα των εξεταζόμενων επιφανειών, με την θεώρηση των 20 m μήκος μετώπου αλλά και η υδραυλική ακτίνα (πρακτική) των επιφανειών υπό την θεώρηση μήκους 1000 m. Αναφέρεται εκ νέου ότι οι υδραυλικές ακτίνες, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι αυτές της στήλης ‘‘Υδραυλική ακτίνα (Π)’’.

Πίνακας 4.2: Πίνακας γεωμετρικών διαστάσεων μετώπου εξόρυξης						
Επιφάνεια	Ύψος (m)	Πλάτος (m)	Μήκος (Θ) (m)	Μήκος (Π) (m)	Υδραυλική ακτίνα (Θ) (m)	Υδραυλική ακτίνα (Π) (m)
Στέψη (Crown)	-	15	20	1000	4.29	7.39
Αριστερή Παρειά (Left Sidewall)	50	-	20	1000	7.14	23.81
Δεξιά Παρειά (Right Sidewall)	50	-	20	1000	7.14	23.81

Παρακάτω (Εικόνα 4.6) παρατίθεται ένα σχέδιο του μετώπου εξόρυξης, μέσα από το πρόγραμμα SketchUp, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί σημάνσεις ώστε να είναι εμφανείς οι διαστάσεις αυτού.



Εικόνα 4.6: Τρισδιάστατη απεικόνιση δεύτερης χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας μετώπου εξόρυξης

4.2.2.2 Εξεταζόμενα υλικά

4.2.2.2.1 Εισαγωγή

Στα μοντέλα προσομοίωσης που κατασκευάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά ως βάση των εντοπιζόμενων σχηματισμών στην εξεταζόμενη περιοχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι εντός και εκτός των ορίων της εκσκαφής αποδίδονται οι ίδιες μηχανικές ιδιότητες πετρώματος. Επιπλέον, μεταξύ γειτονικών ασυνεχειών το υλικό που τοποθετείται είναι άρρηκτο πέτρωμα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, εφόσον στο υλικό αυτό προσδίδονταν ιδιότητες βραχώμαζας και τοποθετούνταν επίσης διακριτές ασυνέχειες, όπως συμβαίνει σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, αυτό θα προκαλούσε μία λανθασμένη εκτίμηση των ιδιοτήτων του σχηματισμού, καθώς οι ασυνέχειες θα είχαν διπλή επίδραση.

Πριν την παρουσίαση των δύο αυτών διαφορετικών τύπων πετρώματος, αλλά και του συνόλου των ιδιοτήτων τους, συνετό κρίνεται να παρουσιαστούν οι εξισώσεις υπολογισμού των βασικών ιδιοτήτων των υλικών.

Αρχικά για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής και της συνοχής του πετρώματος χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις:

- Για την γωνία τριβής χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση μέσα από την μεθοδολογία του Barton :

$$\varphi (FC) = \tan^{-1}\left(\frac{Jr}{Ja} \times Jw\right)$$

Όπου,

- J_r : Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων
- J_a : Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων
- J_w : Συντελεστής παρουσίας νερού εντός των διακλάσεων
- Για τον προσδιορισμό της συνοχής της βραχώμαζας χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση, σύμφωνα με τον Bieniawski (2011):

$$S_m = \frac{C_m \times (1 - \sin(\varphi))}{2 \times \cos(\varphi)}$$

Όπου,

- S_m : Συνοχή βραχώμαζας
- C_m : Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας (UCS)
- φ : Γωνία τριβής βραχώμαζας

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας θεωρείται αξιωματικά ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.

Επιπλέον, ακολούθως δίδονται και ορισμένες εξισώσεις υπολογισμού μερικών αρκετά χρήσιμων ιδιοτήτων του σχηματισμού που επικρατεί στην θεωρητικώς εξεταζόμενη περιοχή, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ακαμψίας των ασυνεχειών.

- Μέτρο διάτμησης (G) (Shear modulus):

Για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης του σχηματισμού χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$G = \frac{\text{Μέτρο Ελαστικότητας (E)}}{2 \times (1 + \text{Λόγος Poisson}(\nu))}$$

- Ογκομετρικός συντελεστής (K) (Bulk modulus):

Για τον προσδιορισμό της συγκεκριμένης ιδιότητας χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$K = \frac{\text{Μέτρο Ελαστικότητας (E)}}{3 \times (1 - (2 \times \text{Λόγος Poisson}(\nu)))}$$

4.2.2.2.2 Υλικό 1 – Γνεύσιος

Ο σχηματισμός που επιλέχθηκε ως το πρώτο πέτρωμα (Υλικό 1) για την περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένα αρκετά υψηλής αντοχής πέτρωμα, το οποίο προσεγγίζει τις ιδιότητες του γάββρου και ενός γρανιτογενέσιου.

Παρακάτω δίδονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες αυτού του σχηματισμού, ορισμένες εκ των οποίων έχουν προκύψει από τις εξισώσεις της εισαγωγικής ενότητας. Οι βασικές ιδιότητες του υλικού 1 είναι οι εξής:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη αρρήκτου πετρώματος : $\sigma_{ci} = 175 \text{ MPa}$
- Μοναδιαίο βάρος (UW) = 0.027 MN/m^3 . Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής έχει αντίκτυπο και στην εντατική κατάσταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, οι κύριες τάσεις του πρωτογενούς εντατικού πεδίου είναι ίσες με : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 600 \text{ m} * 0.027 \text{ MN/m}^3 = 16.2 \text{ MPa}$.
- Initial Element Loading : Field Stress and Body Force
- MR = 400
- Μέτρο ελαστικότητας = 70000 MPa
- Λόγος Poisson = 0.3
- RQD = 100% (βλ. 4.2.2.4.1)
- Material Type : Plastic
- Αντοχή σε εφελκυσμό (Peak Tensile Strength) = 10 MPa
- $G = 70,000 \text{ MPa} / (2*(1+0.3)) = 26,923 \text{ MPa}$
- $K = 70,000 \text{ MPa} / (3*(1-2*0.3)) = 58,333 \text{ MPa}$
- Κριτήριο αστοχίας : Mohr Coulomb : Παράμετροι κριτηρίου:
 - Γωνία τριβής = 45°
 - Συνοχή = 36.24 MPa

Παραμένουσες ιδιότητες σχηματισμών:

- Παραμένουσα αντοχή σε εφελκυσμό = 0
- Παραμένουσα γωνία τριβής = 40°
- Παραμένουσα συνοχή = 3.624 MPa (=10%*c)
- Γωνία διαστολής (Dilation angle) = 15°

Όπως συνάδεται από τις ανωτέρω ιδιότητες στον σχηματισμό προσδίδεται μία άκρως ψαθυρή συμπεριφορά. Επιπλέον, όσον αφορά την τιμή της γωνίας διαστολής για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιείται μία προσέγγιση που δίδεται στην θεωρία του προγράμματος (RS2 FAQs: Theory, n.d.). Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι μία πρώτη εκτίμηση της γωνίας διαστολής θα μπορούσε να ήταν μία τιμή που αντιστοιχεί στο 33 με 66 % της γωνίας τριβής.

4.2.2.2.3 Υλικό 2 – Μάρμαρο

4.2.2.2.3.1 Υλικό 2 – Μάρμαρο (χωρίς υλικό πλήρωσης ασυνεχειών)

Ο δεύτερος σχηματισμός (Υλικό 2) που επιλέχθηκε για την περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένα πέτρωμα στο οποίο προσδίδονται τυπικές ιδιότητες μαρμάρου. Ως πηγή για ορισμένες από τις βασικές ιδιότητες του σχηματισμού χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων του προγράμματος RocProp και πιο συγκεκριμένα γίνεται χρήση της καταγραφής υπ' αριθμόν 1 σύμφωνα με τους Mitani και Kawai (1974).

Κατ' αυτό το τρόπο, οι βασικές ιδιότητες για τον συγκεκριμένο σχηματισμό είναι οι εξής:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου υλικού : $\sigma_{ci} = 63.8 \text{ MPa}$
- Μοναδιαίο βάρος (UW) = 0.026291 MN/m^3 . Σύμφωνα με την συγκεκριμένη τιμή, οι κύριες τάσεις του πρωτογενούς εντατικού πεδίου είναι ίσες με : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 600 \text{ m} * 0.026291 \text{ MN/m}^3 = 15.78 \text{ MPa}$.
- Initial Element Loading : Field Stress and Body Force
- MR = 850
- Μέτρο ελαστικότητας = 54,230 MPa
- Λόγος Poisson = 0.3
- RQD = 100%
- Material Type : Plastic
- Αντοχή σε εφελκυσμό (Peak Tensile Strength) = 4.4 MPa
- Κριτήριο αστοχίας : Mohr Coulomb : Παράμετροι κριτηρίου:
 - Γωνία τριβής = 45°
 - Συνοχή = 13.21 MPa

Και σε αυτή τη περίπτωση η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχόμαζας θεωρείται αξιωματικά ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.

Οι παραμένουσες ιδιότητες του σχηματισμού ενδιαφέροντος είναι οι παρακάτω :

- Παραμένουσα αντοχή σε εφελκυσμό = 0
- Παραμένουσα γωνία τριβής = 40°
- Παραμένουσα συνοχή = 6.61 MPa (=50% *c)
- Γωνία διαστολής (Dilation angle) = 15°

Ο ασβεστίτης, κύριο ορυκτό του ασβεστολίθου και του μαρμάρου, επιδεικνύει σε ένα βαθμό σημαντικά όλκιμη συμπεριφορά ως ορυκτό σε σχέση με την πλειονότητα των ορυκτών και των

πετρωμάτων στην φύση που επί τω πλείστων εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αντικατοπτρίζεται, όπως παρατηρείται και ανωτέρω, στην δοθείσα τιμή της παραμένουσας συνοχής του πετρώματος, όπου προσδίδεται μία τιμή της τάξης του 50% της αρχικής συνοχής του άρρηκτου υλικού. Επιπλέον, οι δύο ιδιότητες (G,K) που θα συμβάλλουν ακολούθως στον υπολογισμό της ακαμψίας των ασυνεχειών λαμβάνουν τις εξής τιμές:

- $G = 54,230 \text{ MPa} / (2 \cdot (1 + 0.3)) = 20,857.69 \text{ MPa}$
- $K = 54,230 \text{ MPa} / (3 \cdot (1 - 2 \cdot 0.3)) = 45,191.67 \text{ MPa}$

4.2.2.2.3.2 Υλικό 2 – Μάρμαρο (με ασβεστίτικο υλικό πλήρωσης ασυνεχειών)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ασβεστίτικο υλικό πλήρωσης εντός των διακλάσεων, ορισμένες ιδιότητες του εξεταζόμενου σχηματισμού μεταβάλλονται σε σχέση με εκείνες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2.2.2.3.1 . Πιο συγκεκριμένα οι αλλαγές εντοπίζονται στις ιδιότητες της γωνίας τριβής και της συνοχής του αρρήκτου πετρώματος, γεγονός που έχει αντίκτυπο και στις παραμένουσες μηχανικές ιδιότητες αυτού. Έτσι, οι τιμές των ιδιοτήτων που διαφέρουν σε σχέση με την προσέγγιση του σχηματισμού χωρίς την χρήση υλικού πλήρωσης εντός των διακλάσεων είναι οι εξής:

- Κριτήριο αστοχίας : Mohr Coulomb : Παράμετροι κριτηρίου:
 - Γωνία τριβής = 14.04°
 - Συνοχή = 24.91 MPa

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας θεωρείται αξιωματικά ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος. Οι παραμένουσες ιδιότητες του σχηματισμού ενδιαφέροντος είναι οι παρακάτω :

- Παραμένουσα αντοχή σε εφελκυσμό = 0
- Παραμένουσα γωνία τριβής = 8°
- Παραμένουσα συνοχή = 12.46 MPa
- Γωνία διαστολής (Dilation angle) = 5°

4.2.2.2.3.3 Υλικό 2 – Μάρμαρο (με αργιλικό υλικό πλήρωσης ασυνεχειών)

Και σε αυτήν την περίπτωση εντοπίζονται για τους ίδιους λόγους διαφοροποίηση σε συγκεκριμένες τιμές ιδιοτήτων του αρρήκτου πετρώματος. Κατ' αυτό το τρόπο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αργιλικό υλικό πλήρωσης εντός των διακλάσεων, οι τιμές των

ιδιοτήτων που διαφέρουν σε σχέση με την προσέγγιση του σχηματισμού χωρίς την χρήση υλικού πλήρωσης είναι οι εξής:

- Κριτήριο αστοχίας : Mohr Coulomb : Παράμετροι κριτηρίου:
 - Γωνία τριβής = 7.13°
 - Συνοχή = 28.16 MPa

Οι παραμένουσες ιδιότητες του σχηματισμού ενδιαφέροντος είναι οι παρακάτω :

- Παραμένουσα αντοχή σε εφελκυσμό = 0
- Παραμένουσα γωνία τριβής = 4°
- Παραμένουσα συνοχή = 14.08 MPa
- Γωνία διαστολής (Dilation angle) = 2.4°

4.2.2.3 Υλικά πλήρωσης

4.2.2.3.1 Εισαγωγή

Σε ορισμένα μοντέλα προσομοίωσης επιλέγεται να τοποθετηθεί υλικό πλήρωσης εντός των ασυνεχειών. Για τον προσδιορισμό των υλικών αυτών χρησιμοποιείται το λογισμικό RocProp, ενώ επειδή η θεώρηση ύπαρξης υλικού πλήρωσης θεωρείται πως επηρεάζει μόνο τα χαρακτηριστικά της ακαμψίας των ασυνεχειών, στις ακόλουθες ενότητες παρατίθενται μόνο οι απαραίτητες ιδιότητες αυτών των σχηματισμών. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, οι οποίες δεν λαμβάνονται από τη χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων, γίνεται χρήση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2.2.2.1.

4.2.2.3.2 Υλικό 1 – Ασβεστιτικό

Το πρώτο υλικό πλήρωσης που εξετάζεται είναι ένα υλικό που αποτελείται κατά κύριο λόγο από λεπτόκκοκο ασβεστιτικό υλικό, χαμηλής ποιότητας. Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου υλικού πλήρωσης, το υλικό αυτό συσχετίστηκε με έναν γεωλογικό σχηματισμό με το όνομα “Marl Stone” και ορισμένες από τις ιδιότητες του υλικού αυτού ελήφθησαν μέσα από την υπ’ αριθμόν 2 καταγραφή των Tincelin και Sinou (1964) στην βάση δεδομένων του προγράμματος RocProp. Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού αυτού είναι οι εξής:

- $\sigma_{ci} = 37 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 6,500 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.2$
- Μέτρο διάτμησης : $G = 2,708 \text{ MPa}$

4.2.2.3.3 Υλικό 2 - Αργιλικό

Το δεύτερο υλικό πλήρωσης που εξετάζεται αποτελείται κατά κύριο λόγο από αργιλικό υλικό. Με σκοπό να αποδοθούν ιδιότητες στο υλικό πλήρωσης, λόγω του θεωρητικώς πολύ μεγάλου ποσοστού αργιλικού υλικού που το αποτελεί, σε αυτό δίδονται ιδιότητες αργιλικού υλικού. Ορισμένες από τις ιδιότητες του υλικού αυτού προσδιορίστηκαν μέσα από συσχέτισή του με καταγραφή από τη βάση δεδομένων του προγράμματος RocProp. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή υπ' αριθμόν 2 για υλικό με ονομασία εισαγωγής "Clay (Conglomerate)" των Lama και Vutukuri (1978). Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού αυτού είναι οι εξής:

- $\sigma_{ci} = 30.34 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 1,260 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.12$
- Μέτρο διάτμησης : $G = 562.5 \text{ MPa}$

4.2.2.4 Ασυνέχειες

4.2.2.4.1 Απόσταση ασυνεχειών

Σε όλα τα μοντέλα του κύκλου αυτού αποδίδεται απόσταση μεταξύ γειτονικών ασυνεχειών ίση με 1,5 m. Συνετό είναι να αιτιολογηθεί η συγκεκριμένη επιλογή για την απόσταση ασυνεχειών.

Κατ' αρχάς πριν από την τελική επιλογή, για το σύνολο των κύκλων αναλύσεων διενεργήθηκε μελέτη για απόσταση ασυνεχειών ίση με 10, 5, 2.5, 1.5 και 0.5 m. Στη πρώτη φάση αποκλείστηκαν οι αποστάσεις των δέκα και πέντε μέτρων, καθώς σύμφωνα με τον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή J_r του συστήματος κατάταξης βραχόμαζας Q , η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή θα πρέπει να προσανυξηθεί κατά μία μονάδα όταν η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από τα 3 m. Αυτή η ενέργεια, στα πλαίσια της εξέτασης του ζητήματος των προσμίξεων του μεταλλεύματος, μπορεί να θεωρηθεί σχετικά δυσμενής, καθώς οι περιπτώσεις αυτές αναμένονται να εμφανίσουν μικρότερα ζητήματα αστάθειας και αυτός είναι και ο βασικός λόγος του αποκλεισμού των προαναφερθέντων περιπτώσεων.

Σε ό,τι αφορά την επιλογή μεταξύ των εναπομεινάντων τριών περιπτώσεων, η βέλτιστη περίπτωση δεν ήταν σε όλες τις περιπτώσεις ξεκάθαρη. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά παρατηρήθηκε ότι την δυσμενέστερη συναρμογή με βάση τα αναμενόμενα αποτελέσματα αλλά και την μικρότερη συσχέτιση με το φαινόμενο της υπέρθραυσης ήταν η περίπτωση των 2,5 m.

Τέλος, όσον αφορά τις δύο τελευταίες περιπτώσεις αν και διαπιστώθηκε ότι σε αρκετές των περιπτώσεων τα αποτελέσματα ήταν αρκετά πανομοιότυπα, σε μερικούς κύκλους αναλύσεων οι αραιώσεις που προκύπτουν για απόσταση ασυνεχειών 0,5 m ήταν υπερβολικά υψηλές και δυσανάλογες, γεγονός που οδήγησε στην απόφαση να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα για 1,5 m απόσταση ασυνεχειών, οι οποίες σε μεγάλο ποσοστό τους παρουσίασαν καλή συναρμογή.

Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής απόστασης μεταξύ γειτονικών ασυνεχειών, έχει αντίκτυπο και στην τιμή του συντελεστή RQD της βραχώμαζας. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει μία κοινή τιμή για όλα τα μοντέλα προσομοίωσης, ακόμα και για εκείνα που τοποθετούνται κάποιες επιπλέον τυχαίες διακλάσεις εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Ο συντελεστής RQD για τις δοκιμές που διενεργούνται λαμβάνει την τιμή 100 %. Η συγκεκριμένη θεώρηση μπορεί εύκολα να επαληθευτεί μέσα από την σχέση υπολογισμού του RQD του Palmström (1982), ως εξής:

$$RQD = 115 - 3.3 \times Jv$$

Όπου στην προκειμένη περίπτωση:

$$Jv = \frac{1}{\text{Μέση απόσταση ασυνεχειών}} = \frac{1}{1.5} = 0.67$$

Συνεπώς : $RQD = 115 - 3.3 * 0.67 = 112.59 \rightarrow 100$

4.2.2.4.2 Εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών

Για κάθε διαφορετικό κύκλο μοντέλων προσομοίωσης επιλέχθηκε να εξεταστούν τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης ασυνεχειών. Οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν οι 30°, 45° και 60°.

Η γωνία κλίσης των ασυνεχειών μετριέται σύμφωνα με την οριζόντιο και κατ' επέκταση την στέψη του μετώπου εξόρυξης, ενώ ακόμη ορίζεται σύμφωνα με την αριστερή παρειά του εξορυκτικού χώρου, η οποία μπορεί και να χαρακτηριστεί και ως η οροφή της εκσκαφής (Hanging-Wall). Για τον ορισμό στο πρόγραμμα η γωνία κλίσης των ασυνεχειών ορίζεται με αρνητικό πρόσημο ώστε να λάβει την επιθυμητή φορά (πχ. - 30°).

4.2.2.4.3 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών ανά περίπτωση

4.2.2.4.3.1 Ιδιότητες ασυνεχειών για περιπτώσεις χωρίς υλικό πλήρωσης

4.2.2.4.3.1.1 Εισαγωγή

Οι ιδιότητες των ασυνεχειών καθορίζονται από πληθώρα παραγόντων, όπως το υλικό που εντοπίζεται στην περιοχή ενδιαφέροντος, το τυχόν πλάτος του ανοίγματος αυτών, την κατάσταση των τοιχωμάτων κλπ. Σημειώνεται ότι για τις περιπτώσεις όπου δεν επιλέγεται να τοποθετηθεί υλικό πλήρωσης εντός των διακλάσεων, θεωρείται ότι οι ασυνέχειες δεν εμφανίζουν κάποιο πλάτος ανοίγματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται η βασική εξίσωση υπολογισμού της ορθής ακαμψίας (normal stiffness):

$$k_n = factor \times \max\left[\frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta z_{min}}\right]$$

Όπου,

k_n : Normal Stiffness

factor: Αποτελεί έναν πολλαπλασιαστικό συντελεστή, ο οποίος λαμβάνει συνήθως τιμή ίση με 10

K: Ογκομετρικός συντελεστής

G: Μέτρο διάτμησης

Δz_{min} : Αποτελεί την ελάχιστη απόσταση μεταξύ μίας ασυνέχειας και μίας επιφάνειας της εκσκαφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εξεταζόμενες περιπτώσεις της παρούσης διπλωματικής εργασίας η τιμή που δίδεται στον συγκεκριμένο συντελεστή είναι το 1 m.

Η χρήση του συμβολισμού ‘‘max’’ αναφέρεται στην μέγιστη τιμή σε όλες τις ζώνες γειτονικά της διεπιφάνειας μεταξύ εκσκαφής και περιβαλλόντος πετρώματος.

Για τον υπολογισμό της τιμής της διατμητικής ακαμψίας (Shear Stiffness) των ασυνεχειών, οι Singh και Goel (2011) αναφέρουν ότι συνήθως η ορθή ακαμψία είναι 10 με 30 φορές μεγαλύτερη από την διατμητική. Επιπροσθέτως, το πρόγραμμα RS2 μέσα από τις θεωρητικές πληροφορίες τις οποίες παραθέτει, πρεσβεύει ότι η διατμητική ακαμψία μπορεί να ληφθεί ως το 1/10 της ορθής, ως μία ικανοποιητική προσέγγιση. Συμπερασματικά, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η εξής σχέση μεταξύ των δύο ιδιοτήτων των ασυνεχειών:

$$\text{Normal Stiffness} = 10 \times \text{Shear Stiffness}$$

4.2.2.4.3.1.2 Περίπτωση 1 (γνεύσιος)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως εξεταζόμενος σχηματισμός το Υλικό 1 (γνεύσιος), οι ασυνέχειες εμφανίζουν τις εξής ιδιότητες:

- Normal Stiffness = 942,307.7 MPa/m
- Shear Stiffness = [(1/10) * 942307.7] MPa/m = 94,230.77 MPa/m
- Ανοικτά άκρα ασυνεχειών μόνο στα όρια της εκσκαφής
- Ανάθεση τυχαίας θέσης αρχικής ασυνέχειας στον χώρο
- Κριτήριο αστοχίας : Barton - Bandis : Παράμετροι κριτηρίου :
 - JCS = 120 MPa
 - JRC = 5
 - Residual Friction Angle = 30°

4.2.2.4.3.1.3 Περίπτωση 2 (μάρμαρο)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως εξεταζόμενος σχηματισμός το Υλικό 2 (μάρμαρο), οι ασυνέχειες εμφανίζουν τις εξής ιδιότητες:

- Normal Stiffness = 730,019 MPa/m
- Shear Stiffness = [(1/10) * 730,019] MPa/m = 73,001.9 MPa/m
- Ανοικτά άκρα ασυνεχειών μόνο στα όρια της εκσκαφής
- Ανάθεση τυχαίας θέσης αρχικής ασυνέχειας στον χώρο
- Κριτήριο αστοχίας : Barton - Bandis : Παράμετροι κριτηρίου :
 - JCS = 55 MPa
 - JRC = 5
 - Residual Friction Angle = 30°

4.2.2.4.3.2 Ιδιότητες ακαμψίας ασυνεχειών για περιπτώσεις με υλικό πλήρωσης

4.2.2.4.3.2.1 Εισαγωγή

Στις περιπτώσεις όπου εντοπίζεται υλικό πλήρωσης εντός των ασυνεχειών, ως βασικός σχηματισμός στην εξεταζόμενη περιοχή επιλέγεται το μάρμαρο. Κατ' αυτό το τρόπο ορισμένες ιδιότητες των ασυνεχειών για τις περιπτώσεις αυτές εμφανίζουν κοινές ιδιότητες με τις αντίστοιχες δοκιμές με μάρμαρο χωρίς υλικό πλήρωσης.

Στις περιπτώσεις που εντός των διακλάσεων τοποθετείται υλικό πλήρωσης, εφαρμόζονται διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού των δύο τιμών ακαμψίας. Οι εξισώσεις υπολογισμού που

εφαρμόζονται σύμφωνα με την προσέγγιση που δίδεται στο παράρτημα θεωρίας που φέρει το πρόγραμμα στην ιστοσελίδα του (Estimating Joint Stiffness, χ.χ.), είναι οι εξής :

$$\text{Κανονική Ακαμψία (Normal Stiffness)}(kn) = \frac{E(\text{υλικού πλήρωσης})}{\text{Άνοιγμα ασυνέχειας}}$$

$$\text{Διατμητική Ακαμψία (Shear Stiffness)}(ks) = \frac{G(\text{υλικού πλήρωσης})}{\text{Άνοιγμα ασυνέχειας}}$$

4.2.2.4.3.2 Περίπτωση 1 (ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρώτο υλικό πλήρωσης (ασβεστιτικό) εντός των ασυνεχειών, αυτές λαμβάνουν τις εξής ιδιότητες:

- Ως άνοιγμα ασυνεχειών ορίζεται πλάτος ίσο με 5 cm
- Normal Stiffness = 130,000 MPa/m
- Shear Stiffness = 54,167 MPa/m
- Ανοικτά άκρα ασυνεχειών μόνο στα όρια της εκσκαφής
- Ανάθεση τυχαίας θέσης αρχικής ασυνέχειας στον χώρο
- Κριτήριο αστοχίας : Barton - Bandis : Παράμετροι κριτηρίου :
 - JCS = 55 MPa
 - JRC = 5
 - Residual Friction Angle = 20°

4.2.2.4.3.2.3 Περίπτωση 2 (αργιλικό υλικό πλήρωσης)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το δεύτερο υλικό πλήρωσης (αργιλικό) εντός των ασυνεχειών, αυτές λαμβάνουν τις εξής ιδιότητες:

- Ως άνοιγμα ασυνεχειών ορίζεται πλάτος ίσο με 5 cm
- Normal Stiffness = 25,200 MPa/m
- Shear Stiffness = 11,250 MPa/m
- Ανοικτά άκρα ασυνεχειών μόνο στα όρια της εκσκαφής
- Ανάθεση τυχαίας θέσης αρχικής ασυνέχειας στον χώρο
- Κριτήριο αστοχίας : Barton - Bandis : Παράμετροι κριτηρίου :
 - JCS = 55 MPa
 - JRC = 5
 - Residual Friction Angle = 12°

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη περίπτωση θα ήταν πιθανότερο να συναντηθεί σε μικρότερο βάθος από την επιφάνεια, καθώς όπως ήδη έχει αναφερθεί σε υψηλά βάθη οι ασυνέχειες συνήθως είναι αρκετά “κλειστές”.

4.2.2.4.4 Αριθμός οικογενειών ασυνεχειών

Σε πέντε από τους έξι συνολικά κύκλους αναλύσεων χρησιμοποιείται μία οικογένεια ασυνεχειών. Στον έκτο κύκλο όπως θα παρουσιαστεί ακολούθως, επιλέγεται να τοποθετηθούν εκτός της βασικής οικογένειας ασυνεχειών και αρκετές τυχαίες διακλάσεις. Η προσέγγιση των τυχαίων διακλάσεων πραγματοποιείται με την χρήση αρκετά αραιού πλέγματος Voronoi, με πυκνότητα 0.07 (Number of Voronoi cells/area) και ιδιότητες ίδιες με εκείνες της κύριας οικογένειας ασυνεχειών. Το πλέγμα Voronoi κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε και στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις να έχει την ίδια μορφή, με σκοπό τα αποτελέσματα να είναι ασφαλώς συγκρίσιμα και να μην επηρεάζονται από διαφορετικές μορφές των σχηματιζόμενων επιφανειών. Το συνολικό πλέγμα των διακλάσεων δεν είναι αρκετά πυκνό ώστε να προκαλέσει μεταβολή στον συντελεστή RQD, όπως παρουσιάζεται παρακάτω :

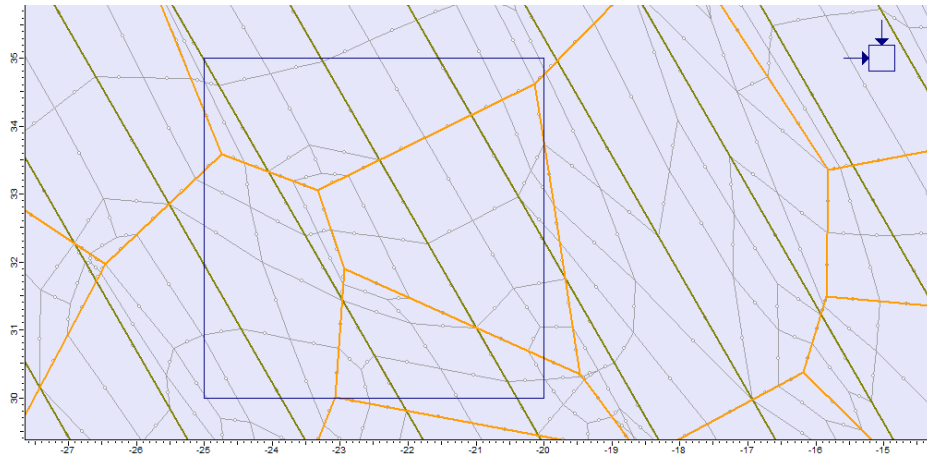
$$RQD = 115 - 3.3 \times Jv$$

Όπου στην προκειμένη περίπτωση:

$$Jv = \frac{1}{\text{Μέση απόσταση ασυνεχειών}} + \frac{\text{Αριθμός τυχαίων ασυνεχειών}}{5 \times \sqrt{A}} = \frac{1}{1.5} + \frac{\frac{9 + 12}{2}}{5 \times \sqrt{25}} = 1.09$$

- A : Εξεταζόμενη επιφάνεια σε m²
- Ο αριθμός των τυχαίων διακλάσεων προκύπτει μέσα από τον καθορισμό τυχαίων επιφανειών, όπου στην συνέχεια μετράται ο αριθμός των εντοπιζόμενων ασυνεχειών. Οι επιφάνειες που προκύπτουν είναι κοινές για τις τρεις μελέτες περιπτώσεων και κατ'αυτόν τον τρόπο δεν διαφοροποιείται το αποτέλεσμα αν εξεταστούν τρεις φορές. Ο αριθμός των ασυνεχειών προκύπτει ως ο μέσος όρος μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων, όπως γίνεται αντιληπτό ακολούθως (Εικόνες 4.7, 4.8):

Πρώτη περίπτωση



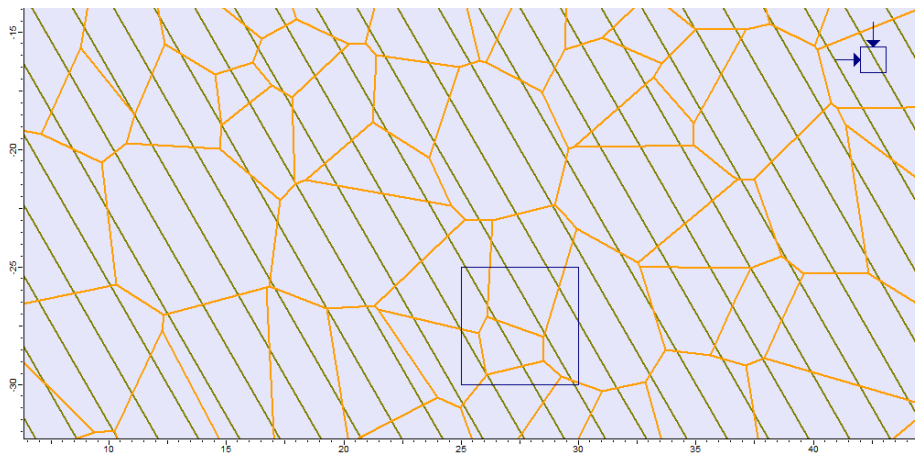
Εικόνα 4.7: Πρώτη περίπτωση : Πρώτη εξεταζόμενη επιφάνεια

Αριθμός τυχαίων ασυνεχείων = 9

Επιφάνεια = 25 m²

$$J_v = 1/1.5 + 9/25 = 1.03$$

Δεύτερη περίπτωση



Εικόνα 4.8: Δεύτερη περίπτωση: Δεύτερη εξεταζόμενη επιφάνεια

Αριθμός τυχαίων ασυνεχείων = 12

Επιφάνεια = 25 m²

$$J_v = 1/1.5 + 12/25 = 1.15$$

Συνεπώς : RQD = 115 - 3.3 * 1.09 = 111.4 → 100

4.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας παραδοχών παραμέτρων

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.3) συγκεντρώνονται οι κυριότερες παραδοχές που αναλύθηκαν ανωτέρω, οι οποίες αποτελούν και την βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι κατηγορίες των μοντέλων προσομοίωσης που αναλύονται στην ενότητα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας παραδοχών παραμέτρων				
Αριθμός περίπτωσης	Πέτρωμα	Γεωμετρία	Υλικό πλήρωσης	Αριθμός οικογενειών ασυνεχειών
#1	Υλικό 1 (Γνεύσιος)	Γεωμετρία 1	Υλικό 1 (Ασβεστιτικό)	Περίπτωση 1: 1 οικογένεια
#2	Υλικό 2 (Μάρμαρο)	Γεωμετρία 2	Υλικό 2 (Αργιλικό)	Περίπτωση 2: 1 οικογένεια + τυχαίες
#3	-	-	Χωρίς υλικό πλήρωσης	-

4.3 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης

4.3.1 Εισαγωγή

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται ανά εξεταζόμενη ομάδα αναλύσεων. Σημειώνεται ότι σε όλες τις κατηγορίες δοκιμών η απόσταση ασυνεχειών είναι κοινή και ίση με 1,5 m, ενώ επίσης εξετάζονται και οι τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης ασυνεχειών. Στην ενότητα 4.3.8 παρατίθεται πίνακας, στον οποίο συγκεντρώνονται όλες οι παράμετροι που αντιστοιχούν σε καθ' έναν από τους κύκλους αναλύσεων.

4.3.2 Πρώτος (1^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στον πρώτο κύκλο αναλύσεων χρησιμοποιείται ως εξεταζόμενο πέτρωμα, το Υλικό 1, δηλαδή ο σχηματισμός στον οποίο προσδίδονται ιδιότητες γνευσίου. Ως μέτωπο εξόρυξης επιλέγεται εκείνο με τις μικρότερες γεωμετρικές διαστάσεις, δηλαδή η Γεωμετρία 1. Τέλος, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μία οικογένεια ασυνεχειών, στην οποία δεν τοποθετείται υλικό πλήρωσης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας Q' είναι ο εξής:

Τιμές συντελεστών δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q’:

- Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n) : 1 οικογένεια ασυνεχειών: $J_n = 2$
- Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r): Λείες, επίπεδες ασυνέχεις: $J_r = 1$
- Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (J_a): Επιφανειακά «λεκιασμένα» μόνο τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάθρωση: $J_a = 1$
- $RQD = 100\%$
- Συνεπώς : $Q' = 100 * 1 / 2 * 1 = 50$

4.3.3 Δεύτερος (2^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στον συγκεκριμένο κύκλο αναλύσεων χρησιμοποιείται ως εξεταζόμενο πέτρωμα, το Υλικό 2, δηλαδή ο σχηματισμός στον οποίο προσδίδονται ιδιότητες μαρμάρου. Επιπλέον, και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η πρώτη γεωμετρία (Γεωμετρία 1) για τον εξορυκτικό κενό χώρο, ενώ επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μία οικογένεια ασυνεχειών, στην οποία δεν τοποθετείται υλικό πλήρωσης.

Στον δεύτερο κύκλο αναλύσεων παρατηρείται ο εξής δείκτης ποιότητας βραχόμαζας Q’:

Τιμές συντελεστών δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q’:

- Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n) : 1 οικογένεια ασυνεχειών: $J_n = 2$
- Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r): Λείες, επίπεδες ασυνέχεις: $J_r = 1$
- Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (J_a): Επιφανειακά «λεκιασμένα» μόνο τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάθρωση: $J_a = 1$
- $RQD = 100\%$
- Συνεπώς : $Q' = 100 * 1 / 2 * 1 = 50$

4.3.4 Τρίτος (3^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στον συγκεκριμένο κύκλο αναλύσεων χρησιμοποιείται ως εξεταζόμενο πέτρωμα, το Υλικό 2, δηλαδή ο σχηματισμός στον οποίο προσδίδονται ιδιότητες μαρμάρου. Επιπλέον, και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η πρώτη γεωμετρία (Γεωμετρία 1) για τον μέτωπο της εξόρυξης, ενώ επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μία οικογένεια ασυνεχειών, εντός της οποίας τοποθετείται ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης. Η επιλογή αυτή, όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα, επηρεάζει σε ένα βαθμό και ορισμένες μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στην κατηγορία αυτών των δοκιμών ο δείκτης ποιότητας βραχόμαζας Q’ υπολογίζεται ακολούθως:

Τιμές συντελεστών δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q':

- Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n) : 1 οικογένεια ασυνεχειών: $J_n = 2$
- Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r): Λείες, επίπεδες ασυνέχεις: $J_r = 1$
- Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (J_a): Αμμώδεις κόκκοι, χωρίς άργιλο, κονιορτοποιημένο πέτρωμα: $J_a = 4$
- $RQD = 100\%$
- Συνεπώς : $Q' = 100 * 1 / 2 * 4 = 12.5$

4.3.5 Τέταρτος (4^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στις δοκιμές που εμπίπτουν στην συγκεκριμένη κατηγορία αναλύσεων γίνεται χρήση των χαρακτηριστικών που επιλέχθηκαν και για τον προηγούμενο κύκλο. Μόνη διαφοροποίηση εντοπίζεται στον τύπο μετώπου εξόρυξης που χρησιμοποιείται, η οποία σε αυτό τον κύκλο είναι η δεύτερη (Γεωμετρία 2). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή του δείκτη ποιότητας βραχόμαζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q δεν διαφοροποιείται σε σχέση με την τιμή που λαμβάνει για τις περιπτώσεις του τρίτου κύκλου αναλύσεων.

4.3.6 Πέμπτος (5^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στον πέμπτο κύκλο μοντέλων προσομοίωσης γίνεται χρήση του ίδιου τύπου υλικού (Υλικό 2) και της ίδιας γεωμετρίας μετώπου εξόρυξης (Γεωμετρία 2), σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία αναλύσεων, ενώ και σε αυτήν την περίπτωση εντοπίζεται μία οικογένεια ασυνεχειών. Η ειδοποιός διαφορά των μοντέλων που εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία εντοπίζεται στο υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις που εξετάζονται γίνεται χρήση του αργιλικού υλικού πλήρωσης. Και σε αυτήν την περίπτωση, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, επηρεάζει ορισμένες μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στον πέμπτο κύκλο μοντέλων προσομοίωσης παρατηρείται η εξής τιμή του δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q':

Τιμές συντελεστών δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q' :

- Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n) : 1 οικογένεια ασυνεχειών: $J_n = 2$
- Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r): Λείες, επίπεδες ασυνέχεις: $J_r = 1$
- Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (J_a): Μέσα ή χαμηλά υπερστερεοποιημένα μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχείς, πάχους <5mm): $J_a = 8$

- $RQD = 100\%$
- Συνεπώς : $Q' = 100 * 1 / 2 * 8 = 6.25$

4.3.7 Έκτος (6^{ος}) κύκλος μοντέλων προσομοίωσης

Στον έκτο και τελευταίο κύκλο αναλύσεων, ως πέτρωμα χρησιμοποιείται το μάρμαρο (Υλικό 2), ενώ γίνεται χρήση του πρώτου τύπου γεωμετρικών διαστάσεων μετώπου εξόρυξης (Γεωμετρία 1). Στην κατηγορία αυτή γίνεται χρήση του ασβεστιτικό υλικού πλήρωσης διακλάσεων, ενώ εκτός της βασικής οικογένειας ασυνεχειών, τοποθετούνται και ορισμένες τυχαίες με την χρήση αραιού πλέγματος Voronoi. Σημειώνεται ότι τόσο στο βασικό σύστημα ασυνεχειών, όσο και στις τυχαίες διακλάσεις αποδίδονται οι ίδιες μηχανικές ιδιότητες.

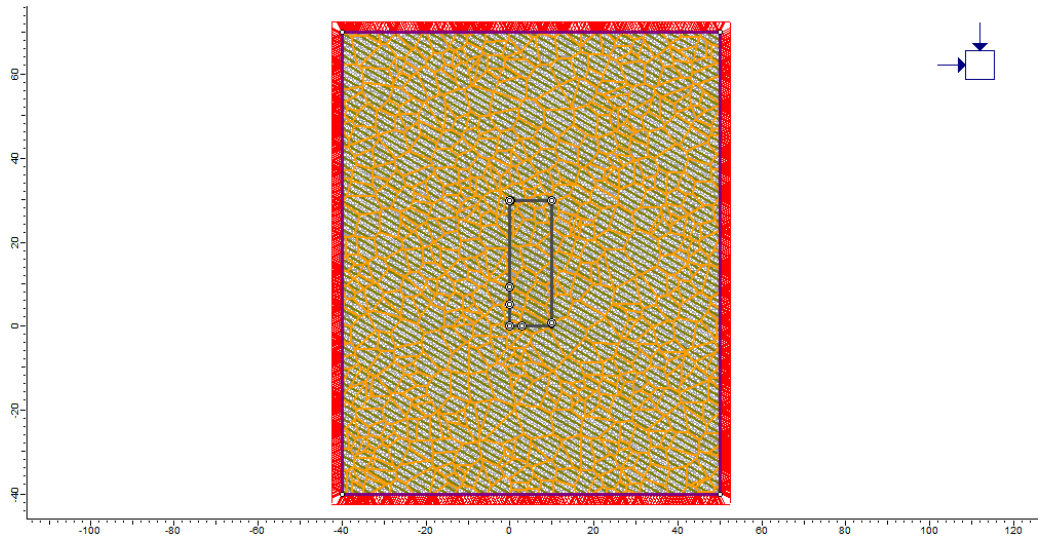
Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις του συγκεκριμένου κύκλου μοντέλων, ο δείκτης ποιότητας βραχόμαζας Q' , διαφοροποιείται σε σχέση με εκείνον που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.2.4.3.2.2, λόγω της τοποθέτησης των τυχαίων διακλάσεων στην εξεταζόμενη περιοχή. Συνεπώς:

Υπολογισμός δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q' :

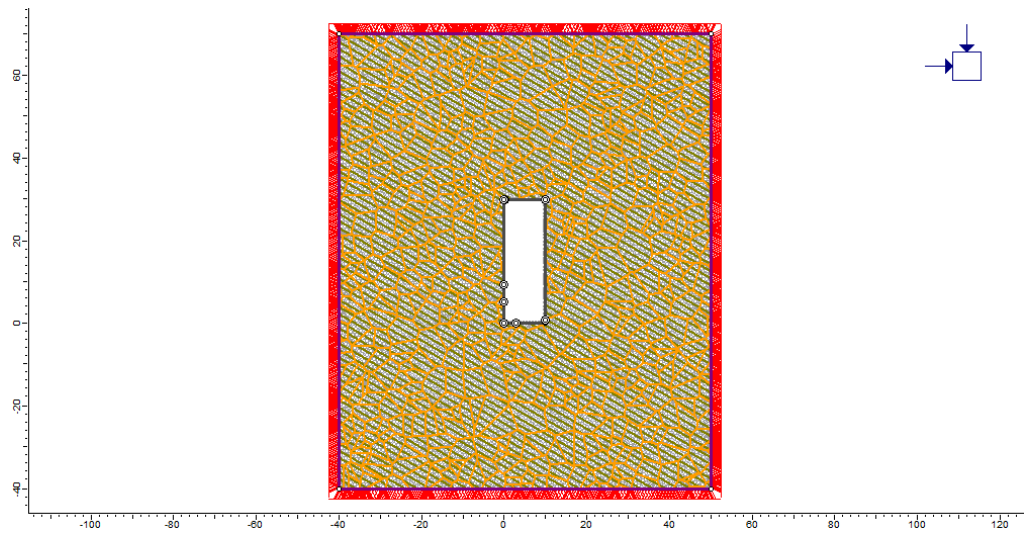
Τιμές συντελεστών δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q' :

- Συντελεστής αριθμού συστημάτων των διακλάσεων (J_n) : 1 οικογένεια ασυνεχειών συν ορισμένες τυχαίες διακλάσεις: $J_n = 3$
- Συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων (J_r): Λείες, επίπεδες ασυνέχεις: $J_r = 1$
- Συντελεστής αποσάθρωσης τοιχωμάτων των διακλάσεων (J_a): Αμμώδεις κόκκοι, χωρίς άργιλο, κονιορτοποιημένο πέτρωμα: $J_a = 4$
- $RQD = 100\%$
- Συνεπώς : $Q' = 100 * 1 / 3 * 4 = 8.33$

Λόγω της ιδιαίτερης μορφής που εντοπίζει η περιοχή ενδιαφέροντος σε σχέση με εκείνες των μετώπων στους προηγούμενους κύκλους στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνες 4.8, 4.9) παρουσιάζονται τα δύο διακριτά στάδια της μοντελοποίησης, για την περίπτωση που στο βασικό σύστημα ασυνεχειών προσδίδεται γωνία κλίσης 30° .



Εικόνα 4.8: Περίπτωση 30°: Πρώτη φάση: Στάδιο της αρχικής κατάστασης



Εικόνα 4.9: Περίπτωση 30°: Δεύτερη φάση: Στάδιο της εκσκαφής

4.3.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αντιστοίχισης παραμέτρων στους κύκλους αναλύσεων

Στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4) συγκεντρώνονται όλες οι αντιστοιχίσεις παραμέτρων που πραγματοποιούνται ανά κύκλο μοντέλων προσομοίωσης.

Πίνακας 4.4 Συγκεντρωτικός πίνακας αντιστοίχισης παραμέτρων				
Κύκλος αναλύσεων	Πέτρωμα	Γεωμετρία	Υλικό πλήρωσης	Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών
1 ^{ος}	Υλικό 1	Γεωμετρία 1	Χωρίς ΥΠ	1 οικογένεια
2 ^{ος}	Υλικό 2	Γεωμετρία 1	Χωρίς ΥΠ	1 οικογένεια
3 ^{ος}	Υλικό 2	Γεωμετρία 1	Υλικό 1 (ΑΣΒ)	1 οικογένεια
4 ^{ος}	Υλικό 2	Γεωμετρία 2	Υλικό 1 (ΑΣΒ)	1 οικογένεια
5 ^{ος}	Υλικό 2	Γεωμετρία 2	Υλικό 2 (ΑΡΓ)	1 οικογένεια
6 ^{ος}	Υλικό 2	Γεωμετρία 1	Υλικό 1 (ΑΣΒ)	1 οικογένεια + τυχαίες

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5) παρουσιάζεται η αρίθμηση των δοκιμών όπως προκύπτει από την αντιστοίχιση αυτών σύμφωνα με την εφαρμοζόμενη γωνία κλίσης ασυνεχειών

Πίνακας 4.5 Αρίθμηση μοντέλων ανάλυσης		
Κύκλος αναλύσεων	Γωνία κλίσης ασυνεχειών	Αρίθμηση δοκιμής
1 ^{ος}	30°	#1
1 ^{ος}	45°	#2
1 ^{ος}	60°	#3
2 ^{ος}	30°	#4
2 ^{ος}	45°	#5
2 ^{ος}	60°	#6
3 ^{ος}	30°	#7
3 ^{ος}	45°	#8
3 ^{ος}	60°	#9
4 ^{ος}	30°	#10
4 ^{ος}	45°	#11
4 ^{ος}	60°	#12
5 ^{ος}	30°	#13
5 ^{ος}	45°	#14
5 ^{ος}	60°	#15
6 ^{ος}	30°	#16
6 ^{ος}	45°	#17
6 ^{ος}	60°	#18

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή

5.1.1 Γενικά

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων κατηγοριοποιείται σε δύο επιμέρους τύπους. Ο πρώτος τύπος αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2, ενώ ο δεύτερος αφορά αναλύσεις μέσα από εμπειρικά διαγράμματα ευστάθειας (Stability Graphs). Και οι δύο περιπτώσεις έχουν ως απώτερους στόχους τόσο την εξέταση της ευστάθειας του μετώπου της εξόρυξης όσο και στον προσδιορισμό – πρόβλεψη των αναμενόμενων ποσοστών υπέρθραυσης του περιβάλλοντος σχηματισμού και κατ' επέκταση των ποσοστών πρόσμιξης του μεταλλεύματος, αλλά και της εύρεσης πιθανής συσχέτισης μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών αναλύσεων. Η συσχέτιση αυτή θα μπορούσε να αποδειχθεί ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, μέσα από το οποίο θα ήταν δυνατός τόσο ο έλεγχος της ακρίβειας των εμπειρικών μοντέλων που διαχρονικά έχουν κατασκευαστεί, όσο και ο προσδιορισμός ενός κοινού σημείου επαφής και δράσης των μεθόδων ανάλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα εμπειρικά διαγράμματα ευστάθειας που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις που ακολουθούν είναι τα εξής:

- (1.) Modified Stability Graph (Potvin, 1988)
- (2.) Extended Mathews' Stability Graph (Mawdesley, Trueman, & Whiten, 2001)
- (3.) Dilution – based Stability Graph (Papaioanou & Suorineni, 2015)

Από τα ανωτέρω το 1^ο και το 3^ο εμπειρικό μοντέλο χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό των συντελεστών του δείκτη ευστάθειας τα τροποποιημένα κατά Potvin νομογράμματα προσδιορισμού τους, ενώ το 2ο χρησιμοποιεί τα διαγράμματα υπολογισμού που πρώτος είχε προτείνει ο Mathews. Συνεπώς, με σκοπό να υπάρχει μία ακρίβεια στις αναλύσεις που προκύπτουν από τα χρησιμοποιούμενα Stability Graphs αναγκαίος είναι ο υπολογισμός τόσο του δείκτη ευστάθειας N (κατά Mathews), όσο και του τροποποιημένου δείκτη N' (κατά Potvin). Σημειώνεται ότι τα πρώτα δύο διαγράμματα αποτελούν ποιοτικές προβλέψεις της ευστάθειας των εξεταζόμενων περιπτώσεων, ενώ το τρίτο δίδει μία πρώτη εικόνα για τα αναμενόμενα ποσοστά πρόσμιξεων. Συνετό είναι να αναφερθεί ότι οι ποιοτικοί χαρακτηρισμοί που προκύπτουν είναι δύσκολο να μεταφραστούν με ασφάλεια σε συγκεκριμένα εύρη ποσοστών πρόσμιξης. Αντιθέτως, τα αποδεκτά όρια αραίωσης του εκάστοτε μεταλλευτικού έργου συμβάλλουν σε πολύ σημαντικό βαθμό στην αντιστοίχισή τους με τους ποιοτικούς

χαρακτηρισμούς των Stability Graphs, δηλαδή Stable-Transitional-Caved και Stable-Failure-Major Failure.

Επιπροσθέτως σαν συμπλήρωμα του “Extended Mathews’ Stability Graph” μαζί με αυτό παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις ισοπιθανολογικές γραμμικές καμπύλες για τις καταστάσεις ευστάθειας που έχουν προκύψει από την ίδια μελέτη. Σε όλα τα διαγράμματα τα εξεταζόμενα σημεία αντιστοιχίζονται με πράσινο χρώμα εκτός του διαγράμματος βασισμένο στα ποσοστά πρόσμιξης, όπου τα σημεία αντιστοιχίζονται με μαύρο χρώμα.

Επιπλέον, επειδή στις ενότητες που ακολουθούν χρησιμοποιούνται εξίσου και οι τρεις όροι αξίζει να αναφερθεί ότι :

Ποσοστό υπέρθραυσης \equiv Ποσοστό πρόσμιξης \equiv Ποσοστό αραίωσης

Εξορισμού, η υπέρθραυση του πετρώματος προσδιορίζεται ως η επιφάνεια έξω από τα προκαθορισμένα όρια της εκάστοτε εξεταζόμενης επιφάνειας που θραύεται προς την επιφάνεια του εξορυχθέντος χώρου. Ουσιαστικά τα ποσοστά υπέρθραυσης που προσδιορίζονται υπολογίζονται χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η τρίτη διάσταση (μήκος προχώρησης) του μετώπου εξόρυξης, αφού η ανάλυση που πραγματοποιείται είναι δισδιάστατη και δεν υπάρχουν δεδομένα ώστε να επηρεάσει και η αυτή το αποτέλεσμα των υπερθραύσεων. Παρόλα αυτά πραγματοποιείται η παραδοχή ότι οι κατανομές των μεγεθών που λαμβάνονται από την ανάλυση του προγράμματος, δεν μεταβάλλονται κατά μήκος του εξορυκτικού χώρου, ενώ μετάλλευμα και άγονο θεωρείται πως είναι το ίδιο υλικό (ίδια πυκνότητα). Αυτή η παραδοχή θα συμβάλλει στην αντιστοίχιση των εμβαδομετρούμενων περιοχών σε όγκους και εν συνεχεία στον υπολογισμό των ποσοστών αραίωσης σύμφωνα με την βασική εξίσωση υπολογισμού της:

$$(\%) \text{ Ποσοστό αραίωσης} = 100 \times \frac{\text{Όγκος ζώνης υπέρθραυσης}}{\text{Όγκος περιοχής εκσκαφής}}$$

Συνεπώς, ο λόγος των εμβαδών αντιστοιχεί με τον λόγο των όγκων των δύο εξεταζόμενων περιοχών.

Για λόγους οικονομίας στον όγκο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται και με σκοπό να μην πραγματοποιούνται περιττές επαναλήψεις αξίζει να λεχθούν τα παρακάτω :

- Όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας της κάθε επιφάνειας δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση μεταξύ των κύκλων αναλύσεων ανά γωνία εξέτασης. Κατ’ αυτό το

τρόπο ο τύπος αστοχίας των επιφανειών παρουσιάζεται μόνο στον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων.

- Όσον αφορά τα διαγράμματα που δίδονται στα κεφάλαια περί αποτελεσμάτων των εμπειρικών μοντέλων ευστάθειας, για λόγους μείωσης του συνολικού όγκου των τελικών αποτελεσμάτων, στην εκάστοτε περίπτωση ανάλυσης τα διαγράμματα που δίδονται τελικώς επιλέγονται με μεγάλη σκοπιμότητα.
- Εφόσον μέσα από την ανάλυση του πρώτου κύκλου που ακολουθεί γίνεται αντιληπτός ο τρόπος προσδιορισμού της μεγίστης επαγόμενης κύριας τάσης που ασκείται στις πλευρές του εξορυκτικού χώρου, κρίνεται περιττό και σε αυτή τη περίπτωση να δοθούν για όλες τις μελέτες περιπτώσεων που διενεργούνται τα διαγράμματα κατανομής της μέγιστης κύριας τάσης. Αντ' αυτού δίδεται κατευθείαν η προσδιοριζόμενη τιμή της τάσης αυτής.

5.1.2 Μεθοδολογία υπολογισμού υπέρθραυσης – Μεθοδολογία υπολογισμού συντελεστή

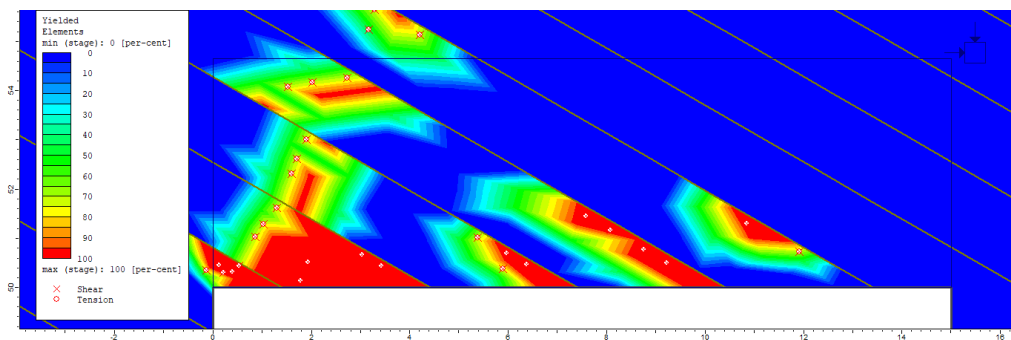
A

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων η υπέρθραυση ελέγχεται μέσα από την συσχέτιση των ζωνών των σημείων που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση ή/και εφελκυσμό γύρω από την εκσκαφή (yielded elements) με τις ζώνες πετρώματος που παρουσιάζουν τιμές ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης μικρότερες του μηδενός ($\sigma_3 \leq 0$), οι οποίες αποτελούν και τις επονομαζόμενες ζώνες χαλάρωσης του πετρώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεταξύ της ενεργού και της ολικής ελάχιστης κύριας τάσης δεν εντοπίζονται διαφοροποιήσεις. Κατ' αυτό το τρόπο η χρήση της ολικής τάσης έναντι της ενεργού δεν θα δημιουργούσε κάποιο πρόβλημα. Αυτές οι δύο κατανομές που αναφέρθηκαν προκύπτουν μέσα από τους υπολογισμούς που διενεργεί το πρόγραμμα, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι για την εκτίμηση της υπέρθραυσης που προκαλείται γύρω από την εκσκαφή πραγματοποιείται η παραδοχή ότι τα προβλήματα που προκύπτουν δεν οφείλονται σε λανθασμένες τεχνικές εξόρυξης. Όπως είναι λογικό, η ζώνη χαλάρωσης του πετρώματος γύρω από την εκσκαφή είναι μεγαλύτερη από την κατανομή των σημείων που έχουν αστοχήσει.

Επίσης, για τον προσδιορισμό των περιοχών υπέρθραυσης χρησιμοποιούνται τόσο τα χαρακτηριστικά του κύριου συστήματος ασυνεχειών όσο και ο βασικός τρόπος αστοχίας της κάθε εξεταζόμενης επιφάνειας. Σημαντική βοηθητική κατανομή προς την ανάδειξη του αναμενόμενου τρόπου αστοχίας μίας επιφάνειας είναι αυτή των τασικών δυναμικών γραμμών. Το συγκεκριμένο γράφημα θεωρείται πως περιττεύει προς την παράθεσή του και κατ' αυτό το

τρόπο, στις ενότητες που ακολουθούν αναφέρεται τελικώς μόνο ο τύπος αστοχίας της κάθε εξεταζόμενης επιφάνειας για την εκάστοτε μελέτη περίπτωσης.

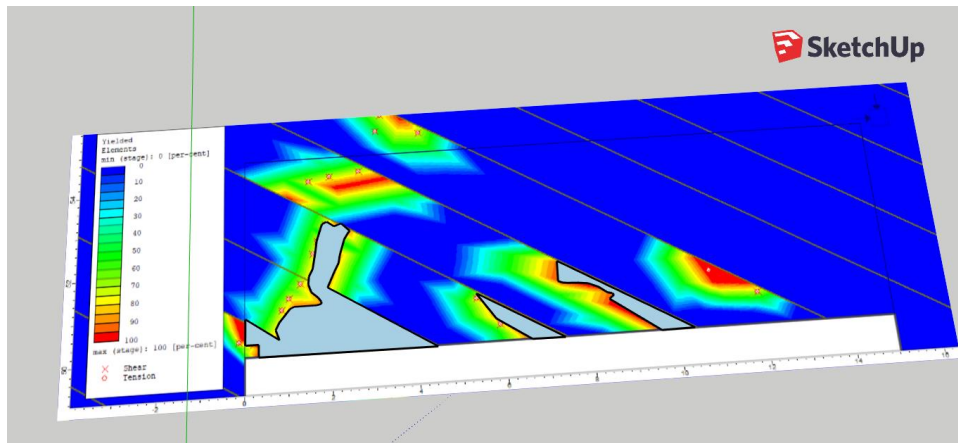
Συνεπώς, χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο την κατανομή των σημείων που έχουν αστοχήσει (“Yielded Elements”) και λαμβάνοντας υπόψιν την κατανομή των σημείων με « $\sigma_3 \leq 0$ » γύρω από την εκσκαφή, οριοθετούνται αρχικά οι γενικές ζώνες πετρώματος, εντός των οποίων εντοπίζονται περιοχές που αναμένονται ότι θα αστοχήσουν και θα βρεθούν εντός του μετώπου εξόρυξης. Η οριοθέτηση αυτή πραγματοποιείται μέσω του εργαλείου “Polygon” (βλ. Εικόνα 5.1) και τα σχήματα του γενικού πλαισίου εξέτασης είναι συνήθως ορθογώνια, με τις συντεταγμένες να καταγράφονται, όπως και η επιφάνεια αυτών των πλαισίων.



Εικόνα 5.1: Τοπικό παράδειγμα οριοθέτησης για περίπτωση στέψης

Εν συνεχεία με την βοήθεια του προγράμματος «Sketch Up», και λαμβάνοντας υπόψιν τον αναμενόμενο τρόπο αστοχίας της εξεταζόμενης επιφάνειας, οριοθετούνται οι ζώνες πετρώματος που αναμένεται να αστοχήσουν και να “μολύνουν” το μετάλλευμα (βλ. Εικόνα 5.2). Οι περιοχές αυτές εμβαδομετρούνται και μετά από τις απαραίτητες μετατροπές κλίμακας αντιστοιχίζονται στην επιφάνεια της περιοχής του προγράμματος. Τελικώς, το ποσοστό της πρόσμιξης υπολογίζεται μέσα από τον λόγο των εμβαδών της εξωτερικά θραυσμένης περιοχής προς την επιφάνεια της πρόσοψης του μετώπου εξόρυξης, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\text{Ποσοστό υπέρθραυσης} = \frac{100 \times \text{Εμβαδόν θραυσμένης ζώνης}}{\text{Εμβαδόν πρόσοψης μετώπου εξόρυξης}}$$



Εικόνα 5.2: Προσδιορισμός των περιοχών που αναμένονται να αστοχήσουν (SketchUp)

Κατά την ανάλυση μέσω των εμπειρικών μοντέλων, αναγκαίος είναι ο υπολογισμός του συντελεστή A του δείκτη ευστάθειας N (ή του N'). Για το σκοπό αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός της επαγόμενης κύριας τάσης που ασκείται στο κέντρο της εξεταζόμενης επιφάνειας. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου μεγέθους γίνεται μέσα από το πρόγραμμα RS2 και την συγκεκριμένη δυνατότητα που αυτό προσφέρει. Για την μεθοδολογία προσδιορισμού της τιμής της κύριας τάσης που ασκείται στην εξεταζόμενη επιφάνεια δεν υπάρχουν σημαντικές αναφορές. Παρόλα αυτά επιλέγεται ο προσδιορισμός αυτός να γίνει με τον υπολογισμό της επαγόμενης μέγιστης κύριας τάσης στο μέσο της εξεταζόμενης επιφάνειας. Αν και με αυτό το τρόπο δεν καλύπτεται όλο το φάσμα των τιμών που ασκούνται επάνω στην επιφάνεια, η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αυτή που προσεγγίζει σε μεγαλύτερο βαθμό την αρχική θεώρηση.

5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 1^{ου} κύκλου αναλύσεων

5.2.1 Εισαγωγή

Στον πρώτο κύκλο αναλύσεων το υλικό στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένας πολύ συμπαγής, σκληρός βραχώδης σχηματισμός. Λαμβάνοντας υπόψιν και τα ευνοϊκά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών γίνεται αντιληπτό ότι αναμένονται απόλυτα ευσταθή μέτωπα εξόρυξης και παράλληλα ελάχιστα έως μηδενικά ποσοστά υπέρθραυσης του περιβάλλοντα σχηματισμού.

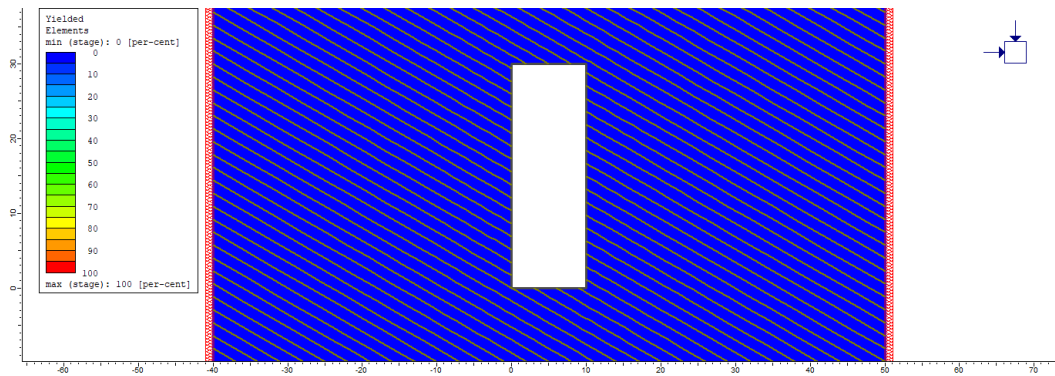
Λόγω των μικρών δυνατοτήτων που προσφέρει η συγκεκριμένη περίπτωση για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αραιώση του μεταλλεύματος, η συγκεκριμένη περίπτωση έχει κύριο πεδίο ενδιαφέροντος στον έλεγχο της συμβατότητας των αναμενόμενων αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τις εμπειρικές μεθόδους ελέγχου της ευστάθειας και το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2.

5.2.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.2.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

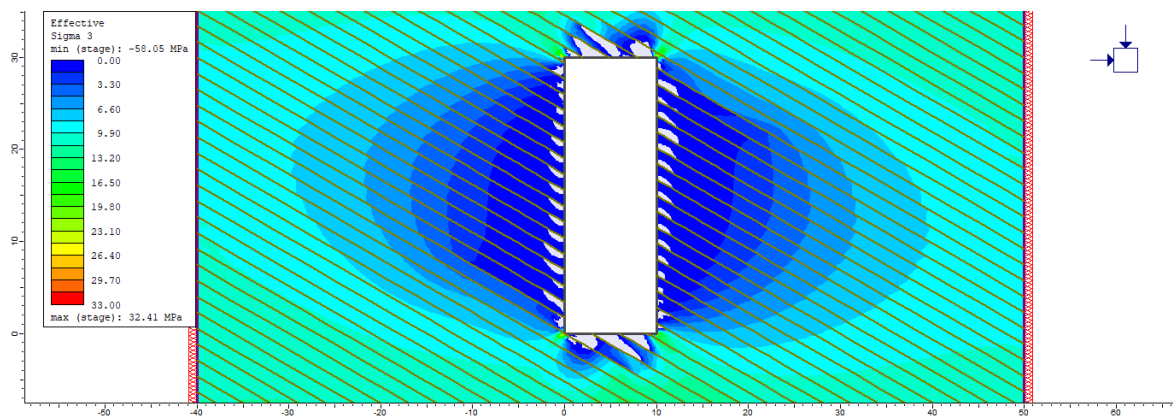
5.2.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών

Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 5.3) παρουσιάζεται η κατανομή των σημείων που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση ή/και εφελκυσμό σύμφωνα με τους υπολογισμούς του προγράμματος. Όπως γίνεται εμφανές στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν συναντώνται περιοχές θραύσης του περιβαλλόντος σχηματισμού.



Εικόνα 5.3: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση

Παρακάτω (βλ. Εικόνα 5.4) δίδεται η κατανομή της ενεργού ελάχιστης κύριας τάσης γύρω από την εκσκαφή. Σημειώνεται ότι σε αυτή αποφασίστηκε να δοθεί ένα κατώτατο όριο, αυτό των 0 MPa. Η συγκεκριμένη κίνηση αποσκοπεί στο να γίνουν εμφανείς οι ζώνες χαλάρωσης του πετρώματος γύρω από την εκσκαφή, καθώς όπως αρκετοί μελετητές έχουν αναφέρει η χαλάρωση του σχηματισμού μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σημείο έναρξης για τιμή ελάχιστης κύριας τάσης μικρότερη του μηδενός ($\sigma_3 \leq 0$), και κατ' επέκταση το ίδιο μπορεί να θεωρηθεί πως ισχύει και για την ενεργό μορφή της ελάχιστης κύριας τάσης, εφόσον οι κατανομές και των δύο παρατηρούνται πως είναι ίδιες. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στα γραφήματα με γκρι αποχρώσεις.



Εικόνα 5.4: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.2.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρείται στην κατανομή της Εικόνας 5.3 για την συγκεκριμένη δοκιμή, δεν παρατηρούνται περιοχές πετρώματος που να έχουν διαρρεύσει. Κατ' αυτό το τρόπο δεν αναμένεται να προκύψει κατά την εκσκαφή κάποια υπέρθραυση του περιβάλλοντος σχηματισμού.

Πίνακας 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
30 degrees	HW - LSW	30	1000	20	0	300	0,00	#1
	FW - RSW	30	1000	20	0		0,00	#1
	CR	10	1000	20	0		0,00	#1

Υποσημείωση :

- CR: Crown → Η στέψη του μετώπου εξόρυξης
- L – SW: Left Sidewall → Η αριστερή παρειά του μετώπου εξόρυξης (κατά παραδοχή χαρακτηρίζεται και ως «επικρεμάμενη επιφάνεια» - οροφή της εκσκαφής (HW: Hanging Wall))
- R – SW: Right Sidewall → Η δεξιά παρειά του μετώπου εξόρυξης (κατά παραδοχή χαρακτηρίζεται και ως δάπεδο της εκσκαφής (Footwall))
- Διάσταση 2 (SG) : Αναφέρεται στην παραδοχή των 1000 m μήκους προχώρησης, το οποίο χρησιμοποιείται για την ασφαλή μετάβαση από τις συνθήκες του προγράμματος στα δεδομένα των Stability Graphs (SG)

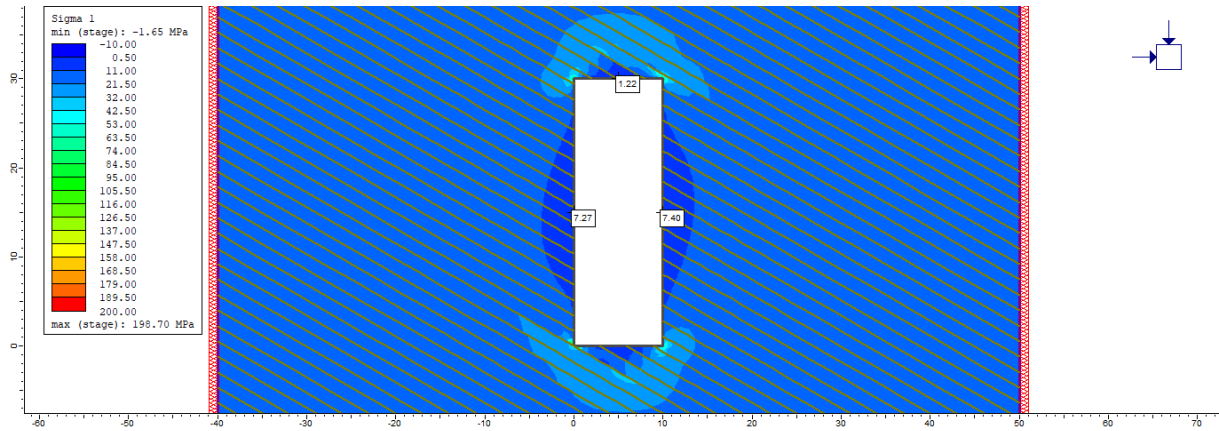
Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που στις παρειές των εξορυκτικών χώρων που προσομοιώνονται δεν δίνεται κάποια γωνία κλίσης διαφορετική από τις 90° από την οριζόντιο (δηλαδή είναι κατακόρυφες), γίνεται η αντιστοίχιση κατά παραδοχή της αριστερής πλευράς με την οροφή της εκσκαφής και της δεξιάς παρειάς με το δάπεδο αυτής.

5.2.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.2.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Πριν την παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού των δεικτών ευστάθειας των εξεταζόμενων επιφανειών, παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης επαγόμενης κύριας τάσης

(Εικόνα 5.5), όπου γίνονται αντιληπτές οι τιμές του συγκεκριμένου μεγέθους που αντιστοιχούν στις εξεταζόμενες επιφάνειες.



Εικόνα 5.5: Κατανομή μέγιστης κύριας τάσης

Επιπροσθέτως ο τρόπος αστοχίας ανά επιφάνεια είναι ο εξής:

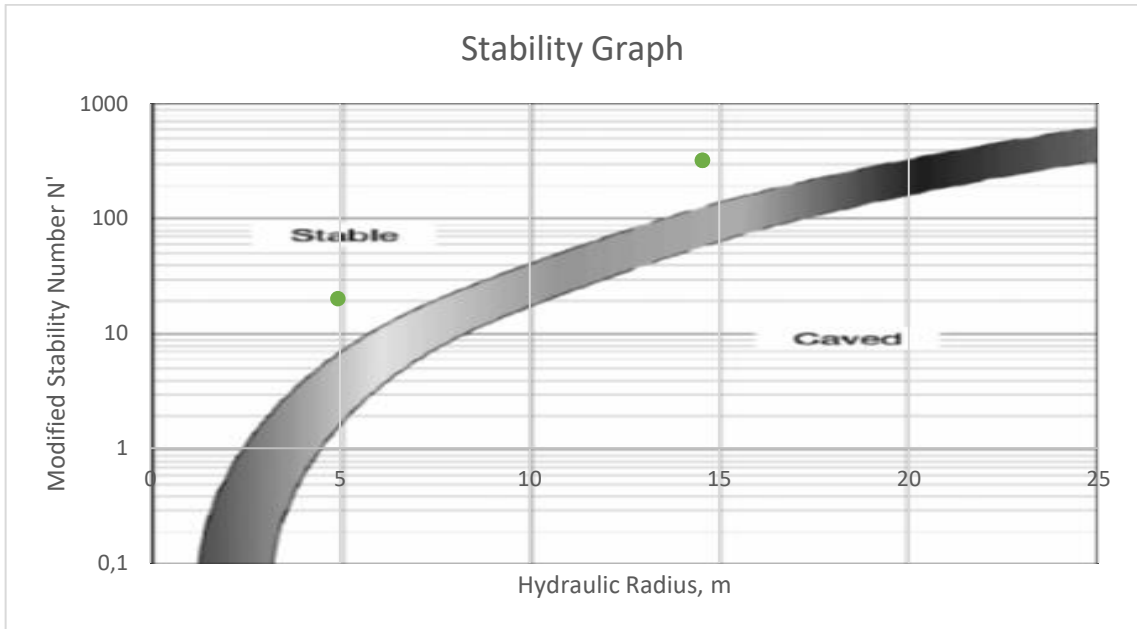
Πίνακας 5.2: Τύπος αστοχίας επιφανειών	
Κατηγορία Επιφανείας	Τύπος αστοχίας
Στέψη (CR)	Κατάπτωση (Falling)
Οροφή (L-SW)	Αποφλοίωση (Slabbing)
Δάπεδο (R-SW)	Αποφλοίωση (Slabbing)

Πίνακας 5.3: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

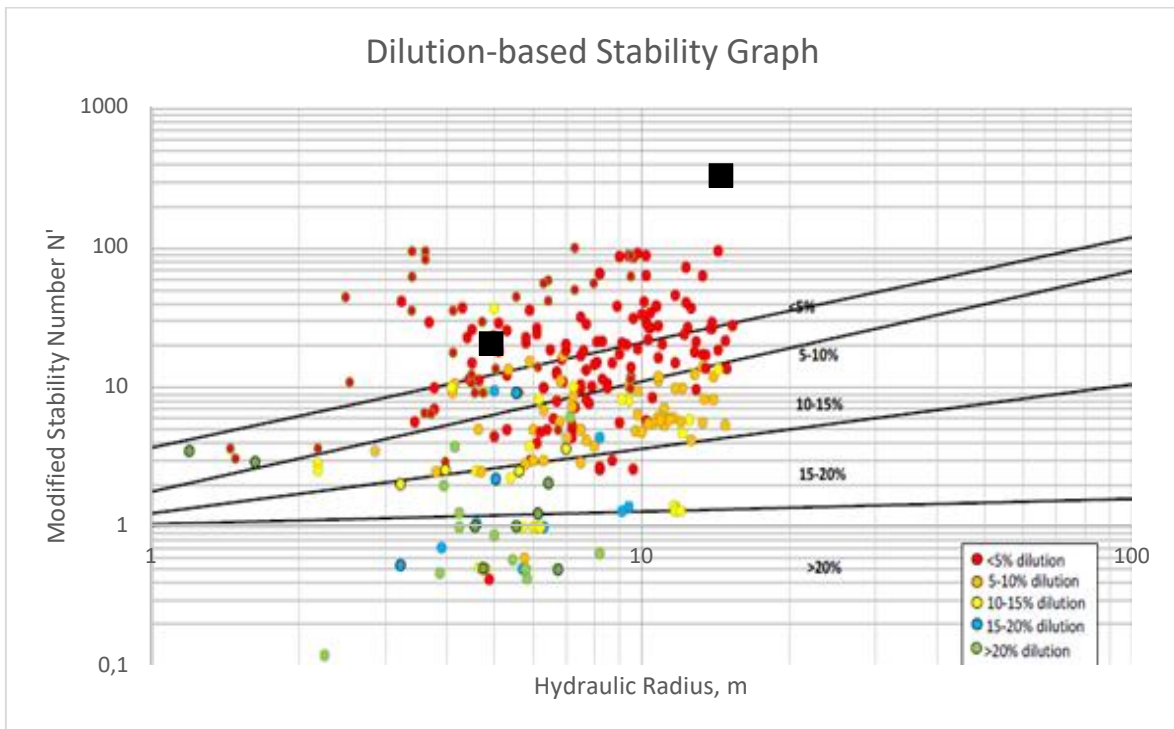
Τοίχωμα	Κλίση Επιφανείας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	30	50	30	1,22	1	0,2	2	20,00	4,95
L-SW	90	30	50	60	7,27	1	0,8	8	320,00	14,56
R-SW	90	30	50	60	7,4	1	0,8	8	320,00	14,56

Πίνακας 5.4: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews					
Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	1	0,34	1,00	17
L-SW	50	1	0,8	8,00	320
R-SW	50	1	0,8	8,00	320

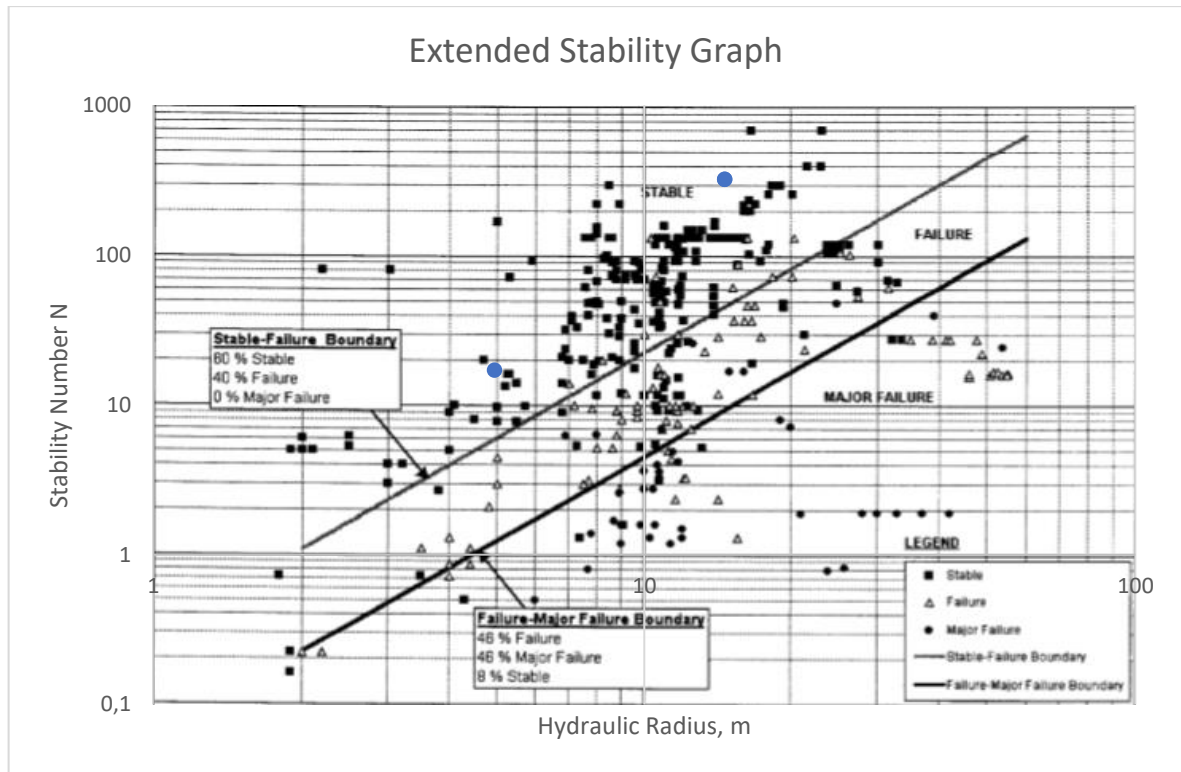
5.2.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



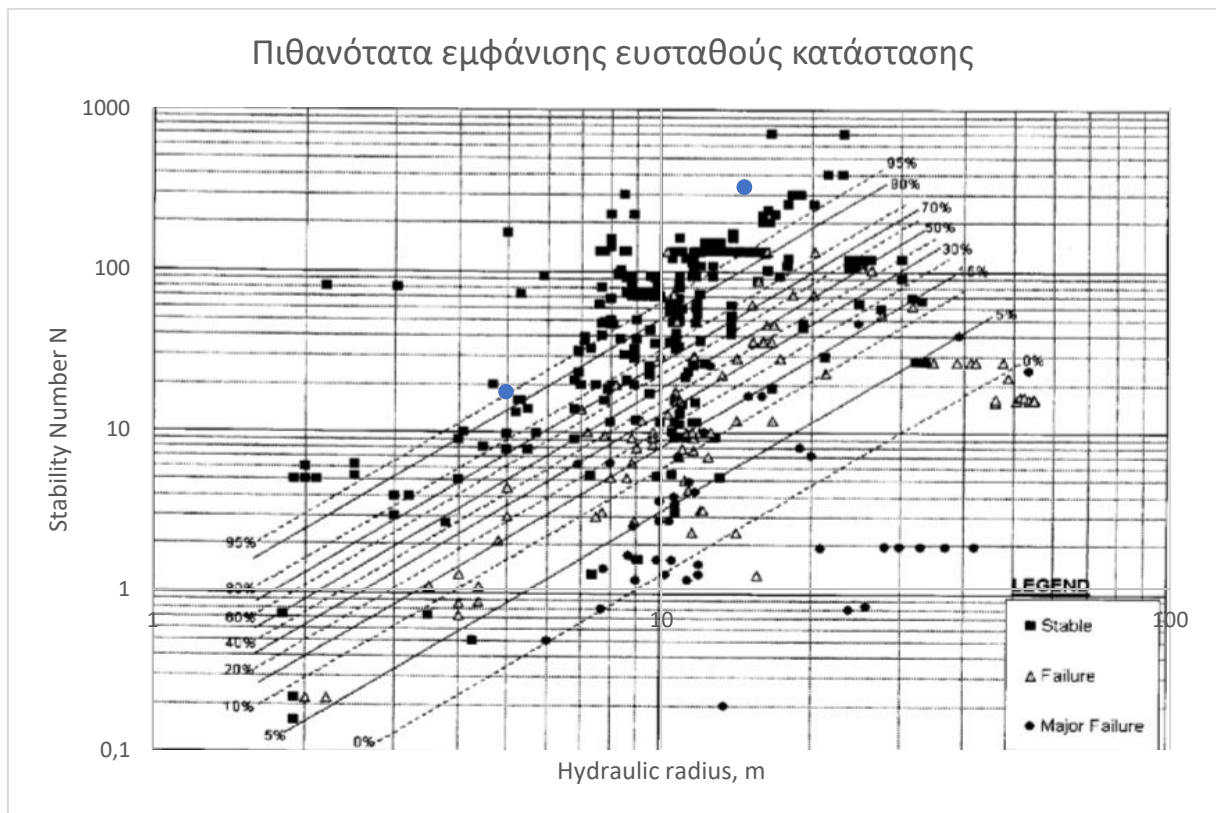
Εικόνα 5.6: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.7: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Παπαϊωάννου και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.8: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

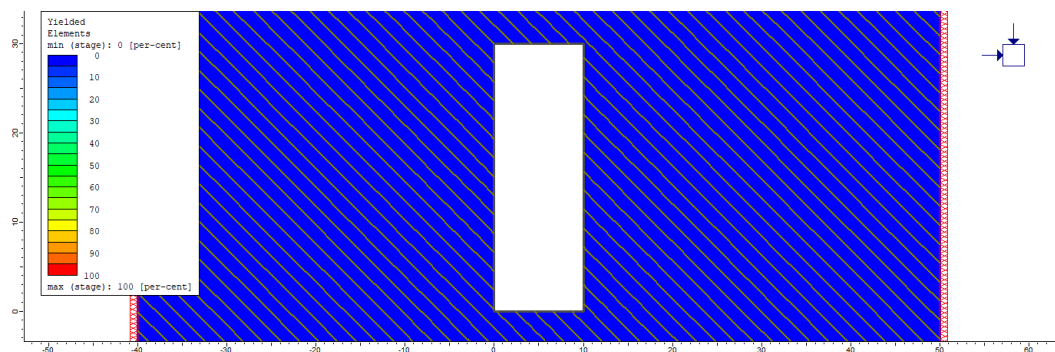
5.2.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων						
Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	17	20	4,95	< 5	95	Stable
HW	320	320	14,56	< 5	100	Stable
R-SW	320	320	14,56	< 5	100	Stable

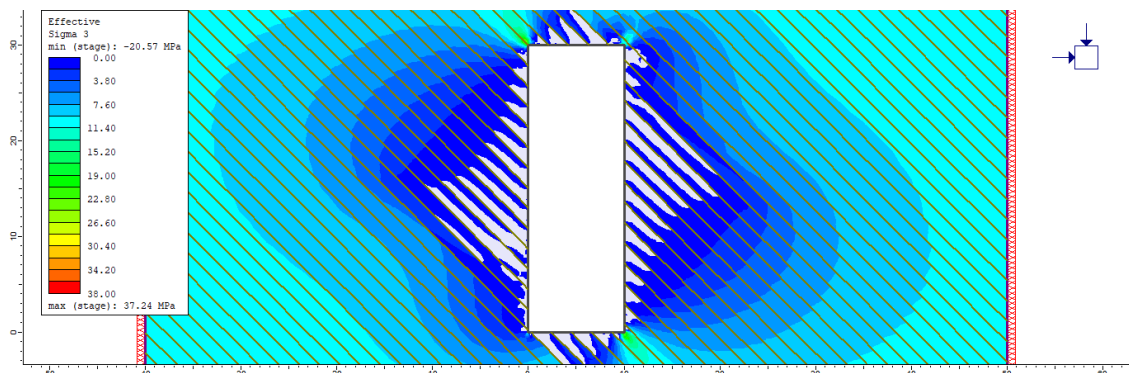
5.2.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.2.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.2.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.10: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.11: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.2.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τις κατανομές που έχουν προκύψει (βλ. Εικόνες 5.10, 5.11), και σε αυτή τη περίπτωση δεν παρατηρούνται περιοχές πετρώματος που να έχουν

διαρρέυσει. Κατ' αυτό το τρόπο δεν προβλέπεται να προκύψει κατά την εκσκαφή κάποια υπέρθραυση του περιβάλλοντος σχηματισμού (βλ. Πίνακα 5.6).

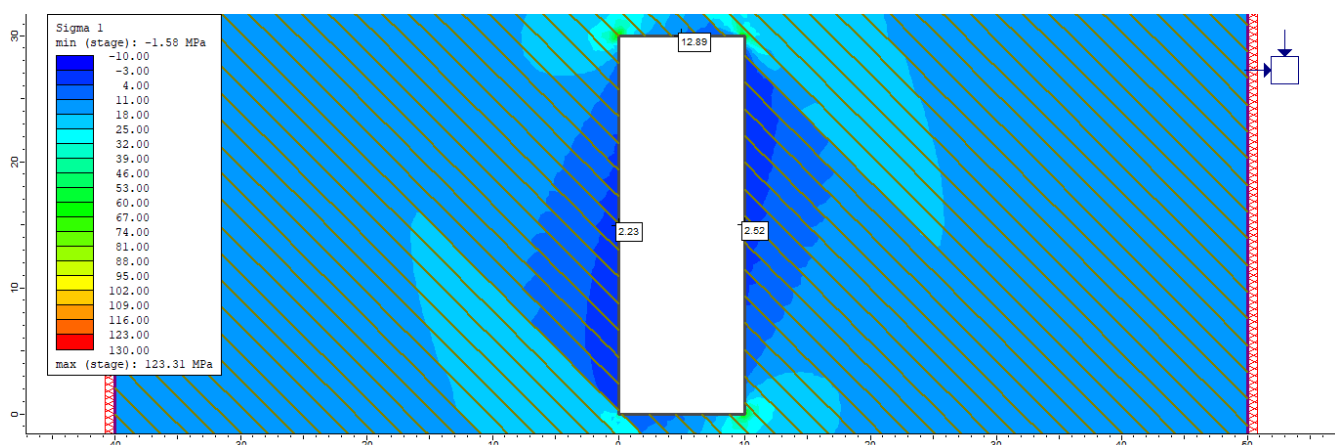
Πίνακας 5.6: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
45 degrees	HW - LSW	30	1000	20	0	300	0,00	#2
	FW - RSW	30	1000	20	0		0,00	#2
	CR	10	1000	20	0		0,00	#2

5.2.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.2.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Ακολουθως παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης επαγόμενης κύριας τάσης.



Εικόνα 5.12: Κατανομή μέγιστης κύριας τάσης

Επιπροσθέτως ο τρόπος αστοχίας ανά επιφάνεια δίνεται στον Πίνακα 5.7:

Πίνακας 5.7: Τύπος αστοχίας επιφανειών

Κατηγορία Επιφανείας	Τύπος αστοχίας
Στέψη (CR)	Κατάπτωση (Falling)
Οροφή (L-SW)	Ολίσθηση (Sliding)
Δάπεδο (R-SW)	Αποφλοίωση (Slabbing)

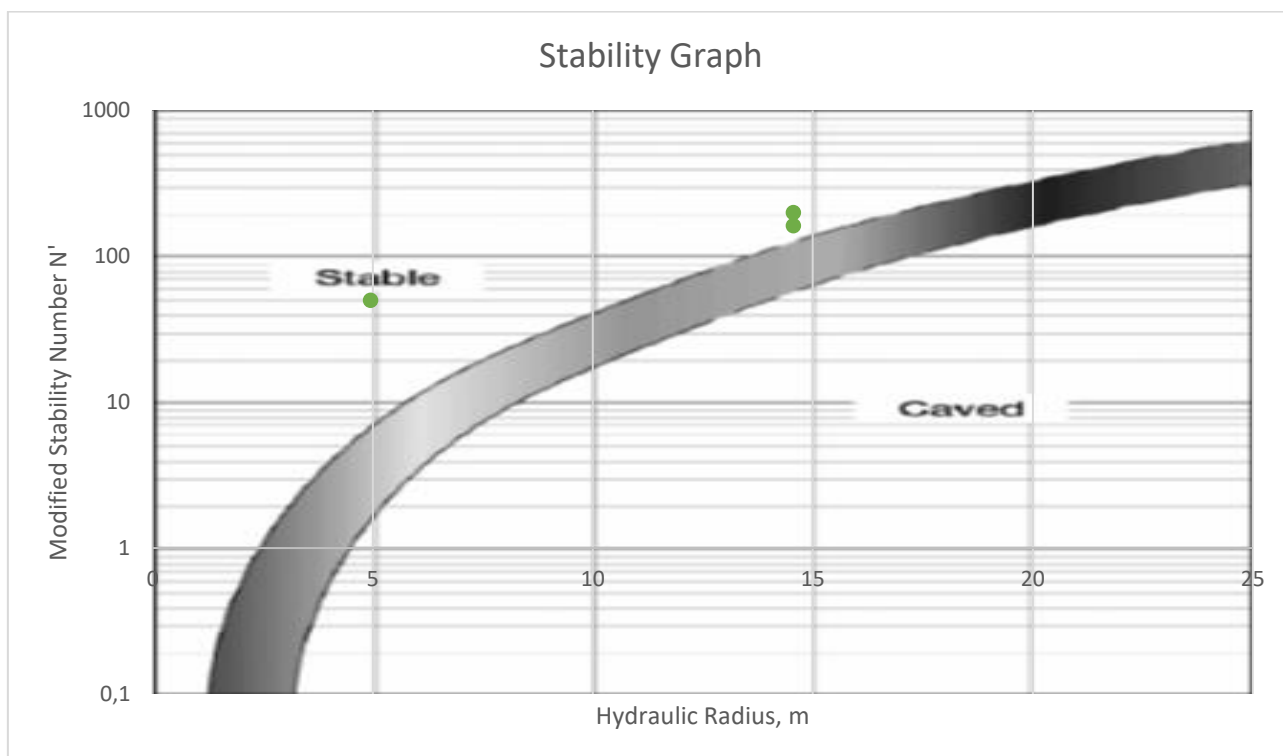
Πίνακας 5.8: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	45	50	45	12,89	1	0,5	2	50,00	4,95
L-SW	90	45	50	45	2,23	1	0,5	6,5	162,50	14,56
R-SW	90	45	50	45	2,52	1	0,5	8	200,00	14,56

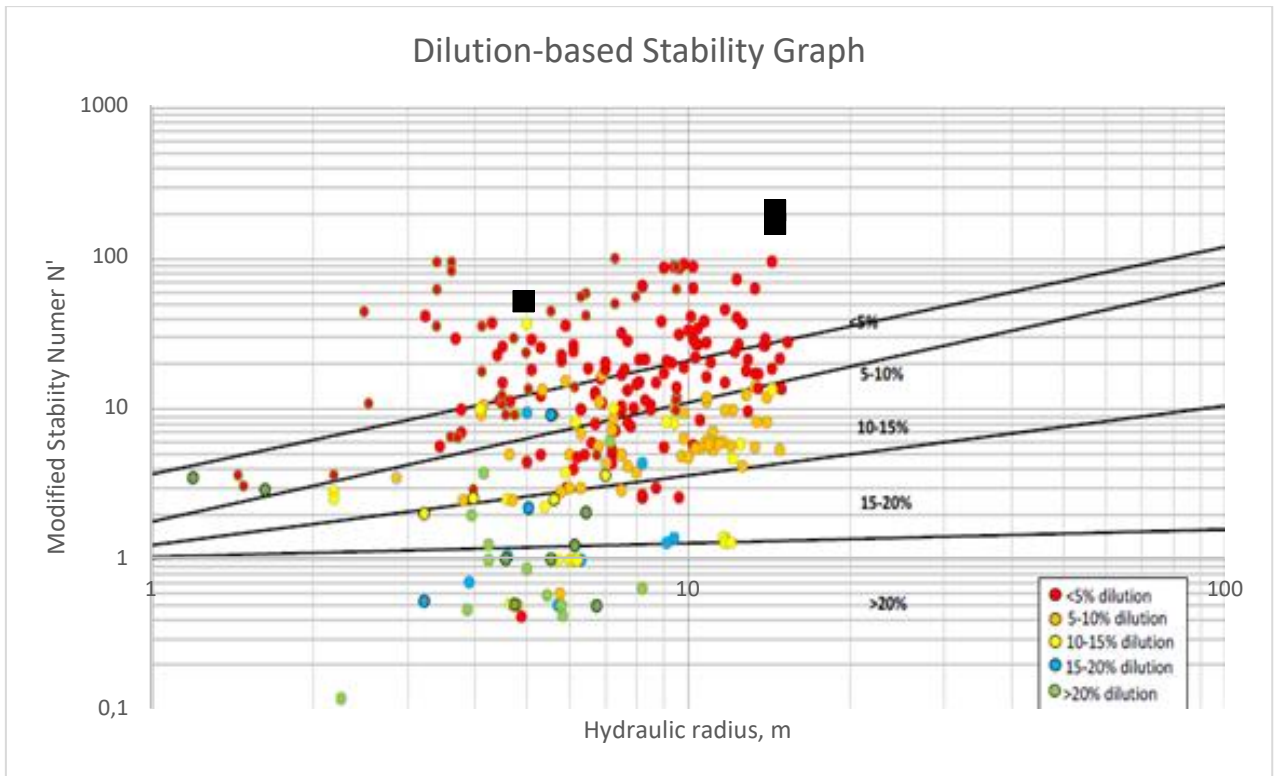
Πίνακας 5.9: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	1	0,4	1	20
L-SW	50	1	0,4	8	160
R-SW	50	1	0,4	8	160

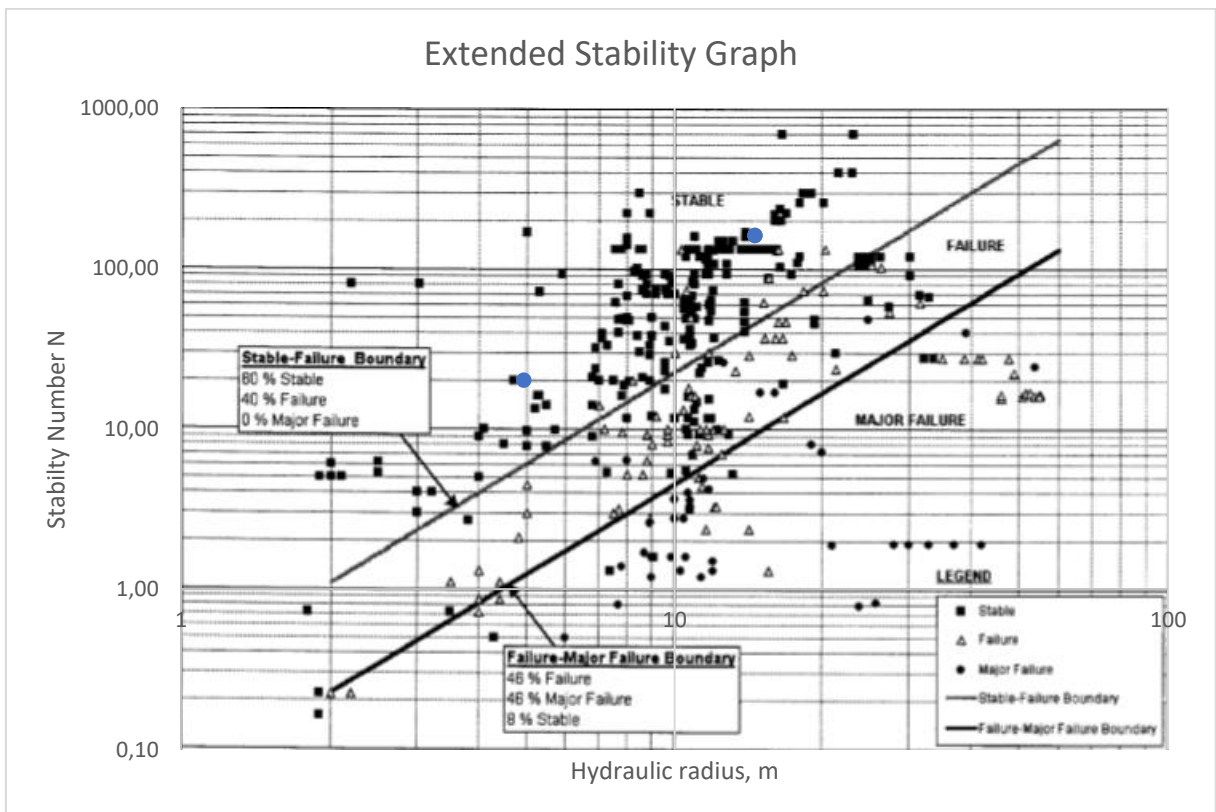
5.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



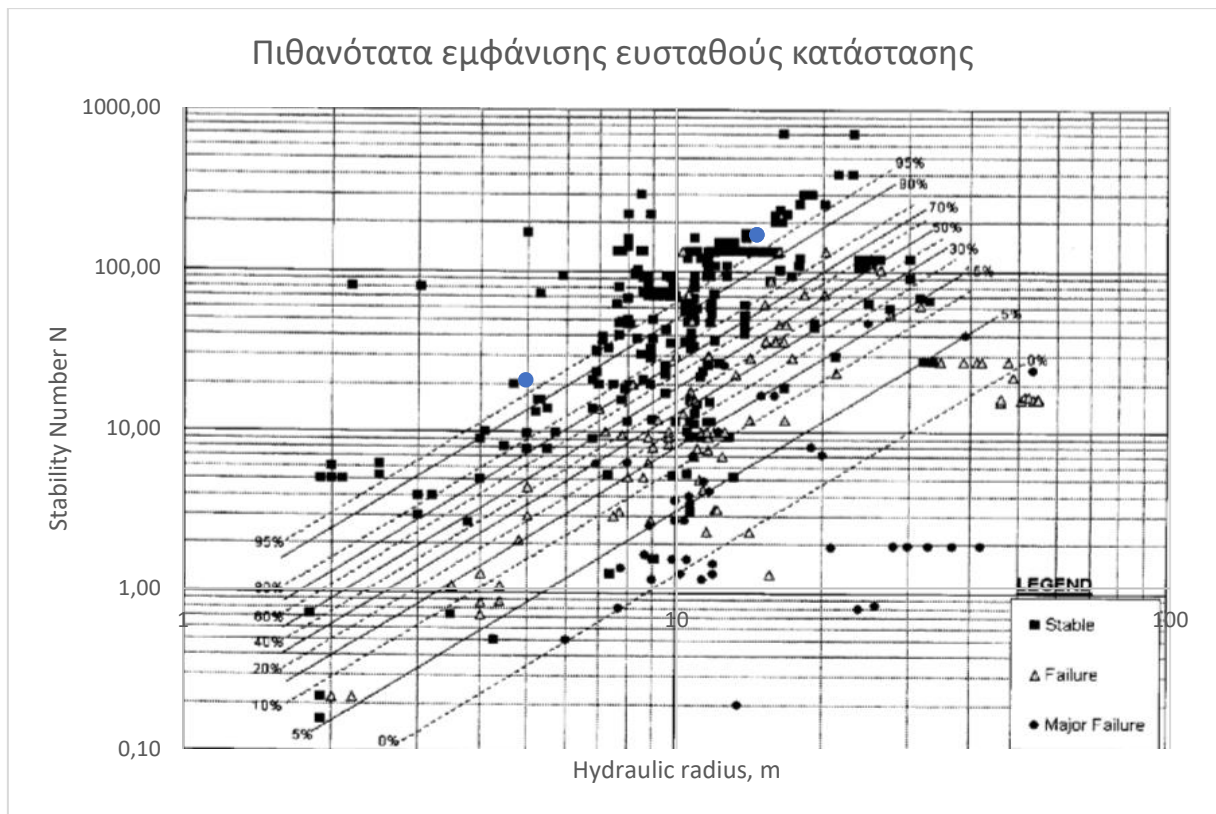
Εικόνα 5.13: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.14: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.15: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.16: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

5.2.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

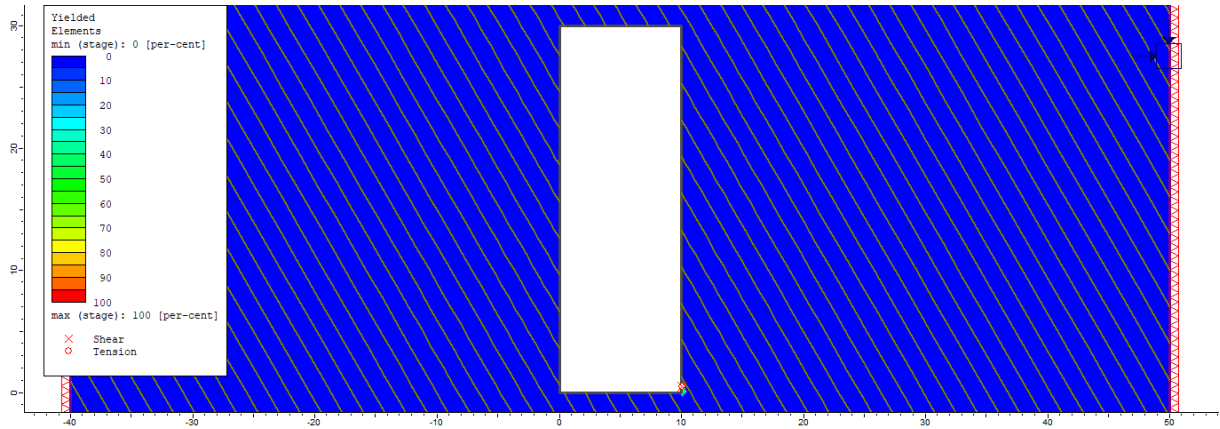
Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	20,00	50	4,95	< 5	100	Stable
HW	160,00	162,5	14,56	< 5	100	Stable
R-SW	160,00	200	14,56	< 5	100	Stable

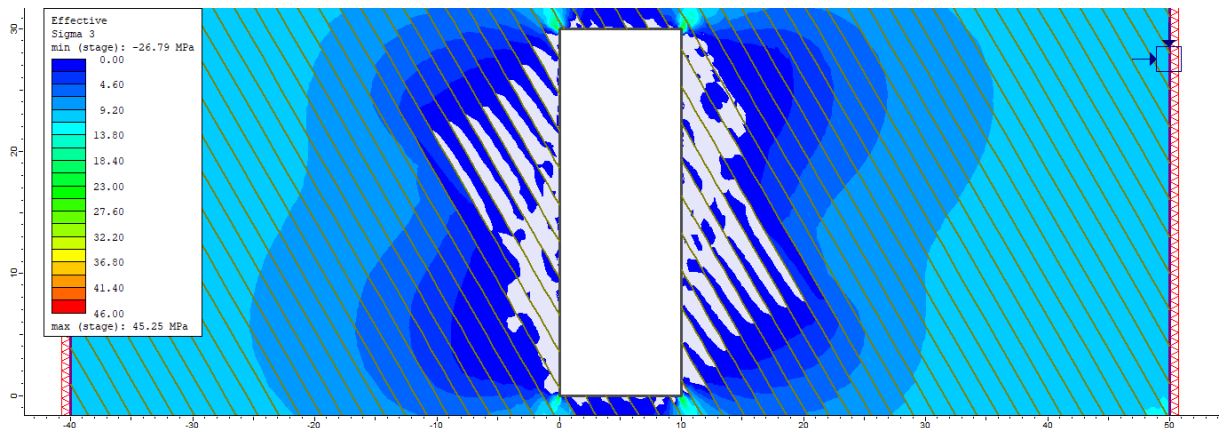
5.2.4 Κατηγορία 3^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.2.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.2.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.17: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.18: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.2.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές (Εικόνες 5.17, 5.18), στην συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζεται μία ελάχιστη περιοχή διαρροής στην δεξιά παρειά. Παρόλο που η περιοχή είναι μετρήσιμη, η έκταση που καταλαμβάνει αναμένεται να είναι πολύ μικρή (βλ. Πίνακα 5.11).

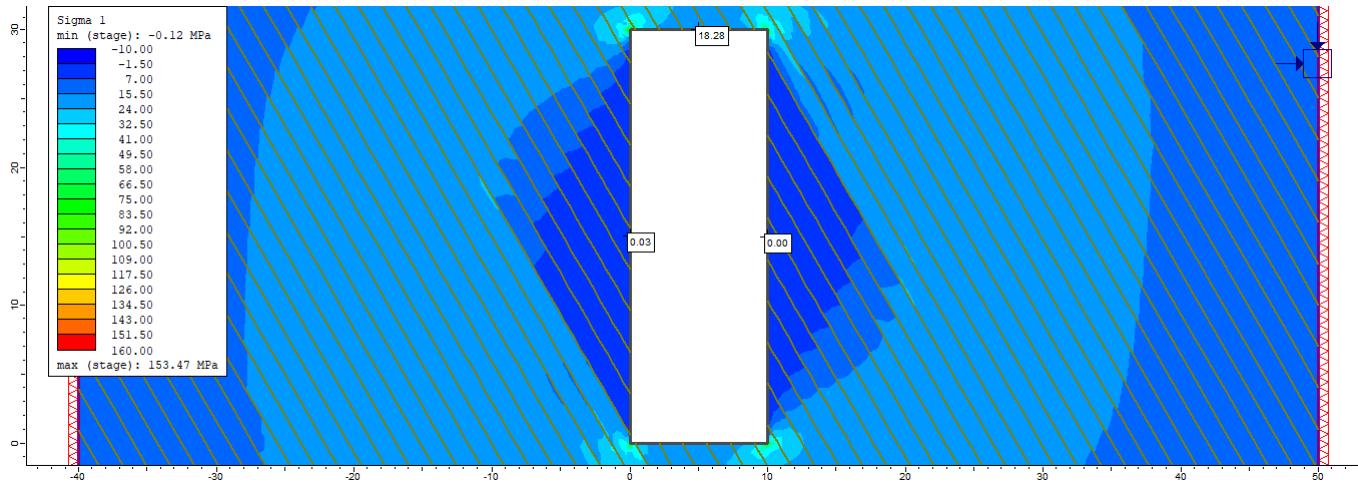
Πίνακας 5.11: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
60 degrees	HW - LSW	30	1000	20	0	300	0,00	#3
	FW - RSW	30	1000	20	0,03		0,00	#3
	CR	10	1000	20	0		0,00	#3

5.2.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.2.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Παρακάτω (Εικόνα 5.19) δίδεται η κατανομή της μέγιστης επαγόμενης κύριας τάσης, όπου γίνονται αντιληπτές και οι τιμές του συγκεκριμένου μεγέθους για τις επιφάνειες ενδιαφέροντος.



Εικόνα 5.19: Κατανομή μέγιστης κύριας τάσης

Επιπροσθέτως ο τρόπος αστοχίας ανά επιφάνεια είναι ο εξής:

Πίνακας 5.12: Τύπος αστοχία επιφανειών	
Κατηγορία Επιφανείας	Τύπος αστοχίας
Στέψη (CR)	Κατάπτωση (Falling)
Οροφή (L-SW)	Ολίσθηση (Sliding)
Δάπεδο (R-SW)	Αποφλοίωση (Slabbing)

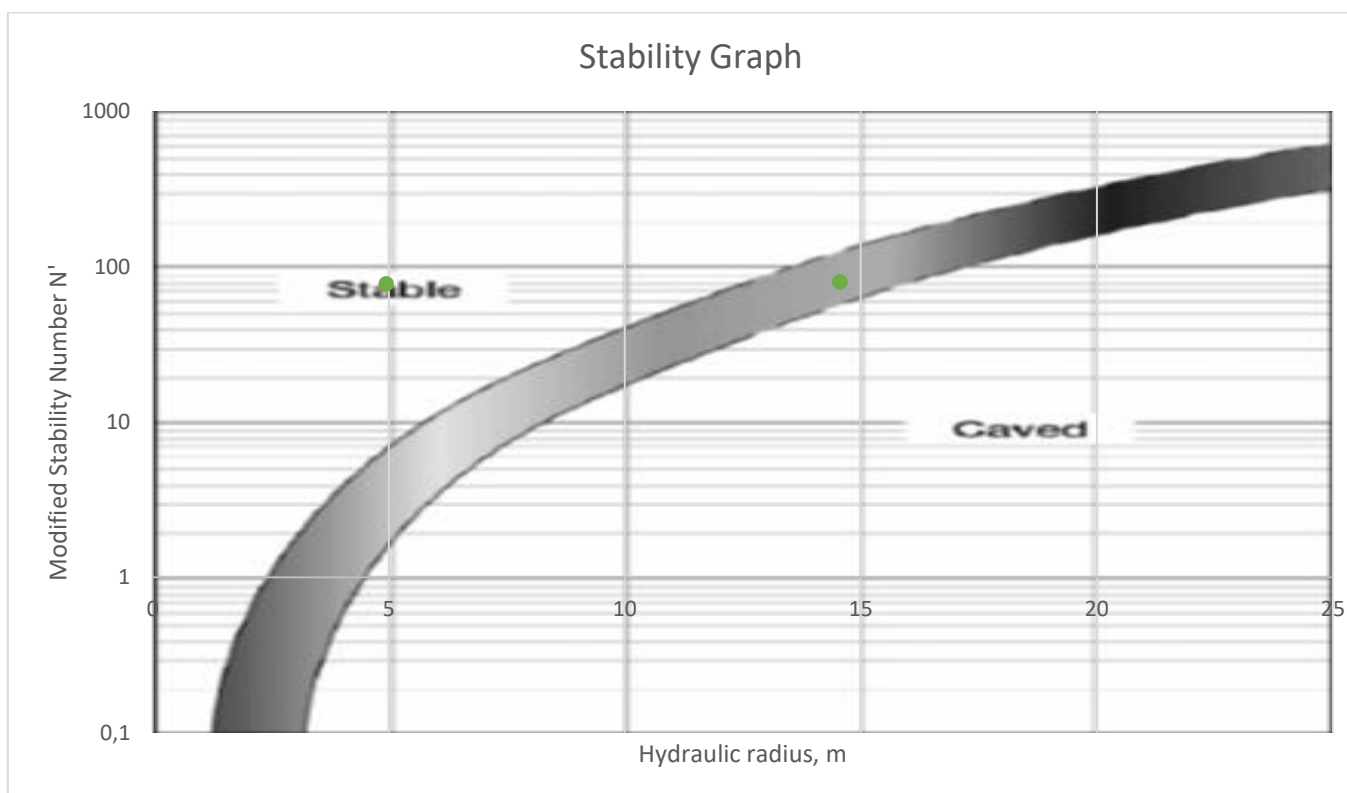
Πίνακας 5.13: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	60	50	60	18,28	0,97	0,8	2	77,60	4,95
L-SW	90	60	50	30	0,03	1	0,2	8	80,00	14,56
R-SW	90	60	50	30	0	1	0,2	8	80,00	14,56

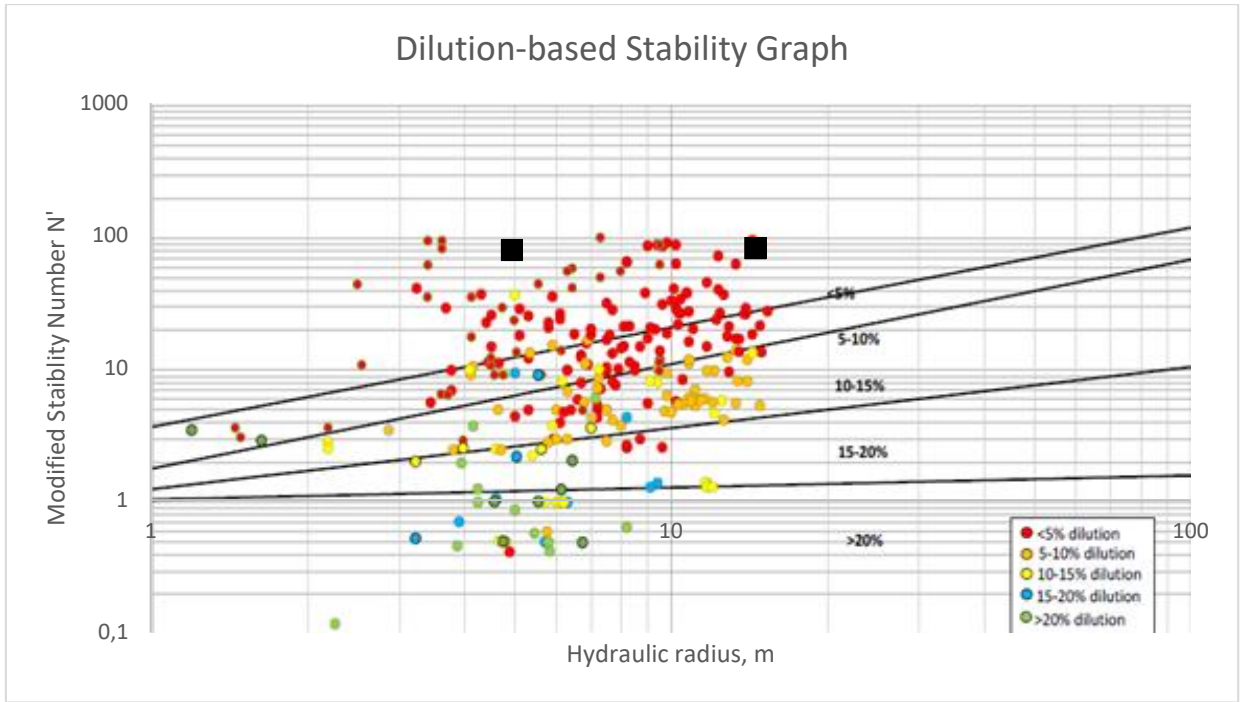
Πίνακας 5.14: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	0,93	0,8	1	37,2
L-SW	50	1	0,34	8	136
R-SW	50	1	0,34	8	136

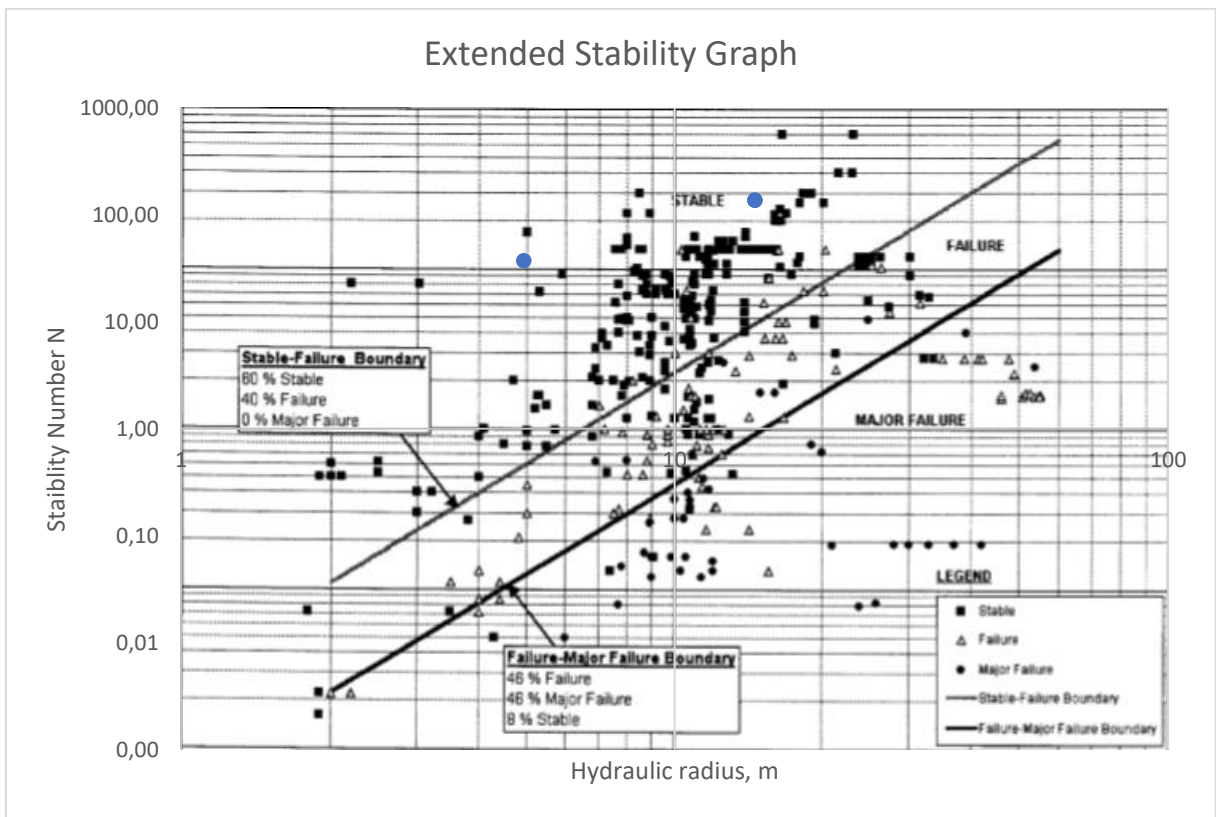
5.2.4.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



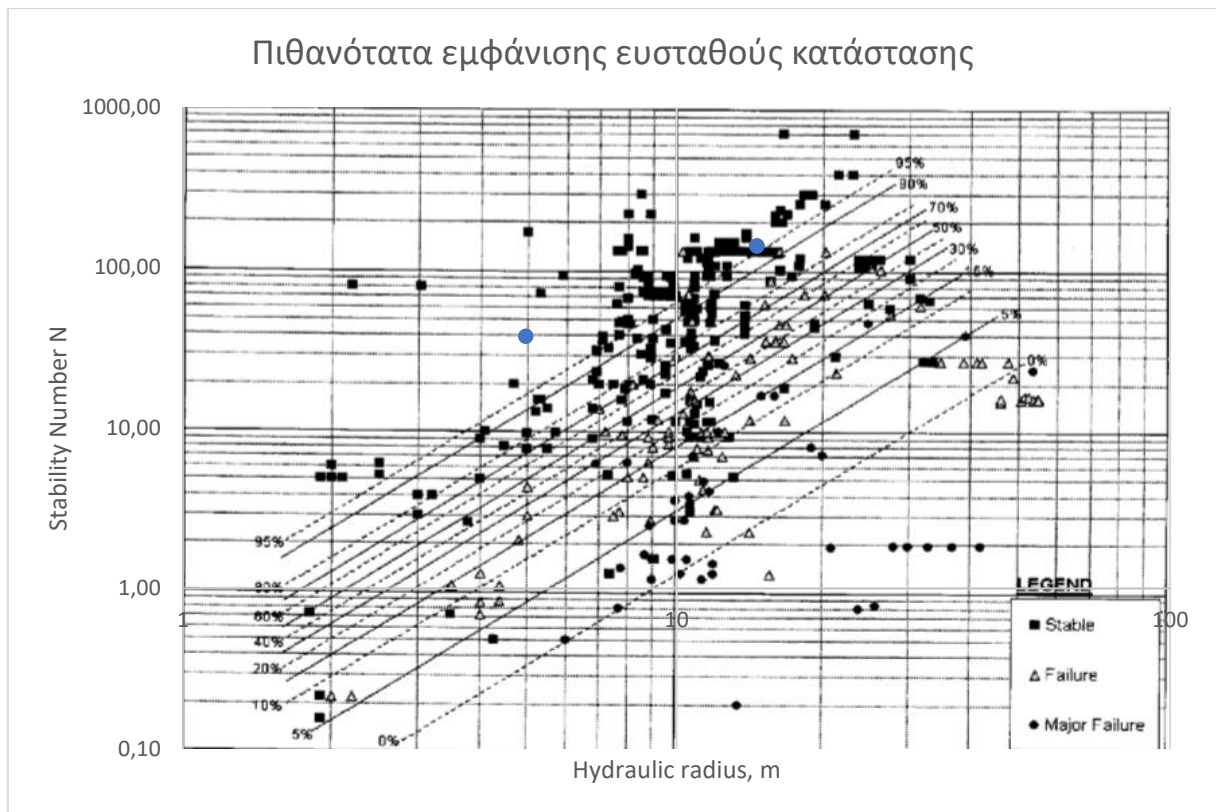
Εικόνα 5.20: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.21: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.22: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

5.2.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.15: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραιώση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	37,20	77,6	4,95	< 5	100	Stable
HW	136,00	80	14,56	< 5	95	Stable
R-SW	136,00	80	14,56	< 5	95	Stable

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 2^{ου} κύκλου αναλύσεων

5.3.1 Εισαγωγή

Στον συγκεκριμένο κύκλο αναλύσεων το υλικό στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένας μειωμένης αντοχής σχηματισμός σε σχέση με εκείνον που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Παρόλα αυτά το πέτρωμα αυτό παραμένει αρκετά συμπαγές και με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω και αναλογιζόμενοι των εξαιρετικών ιδιοτήτων

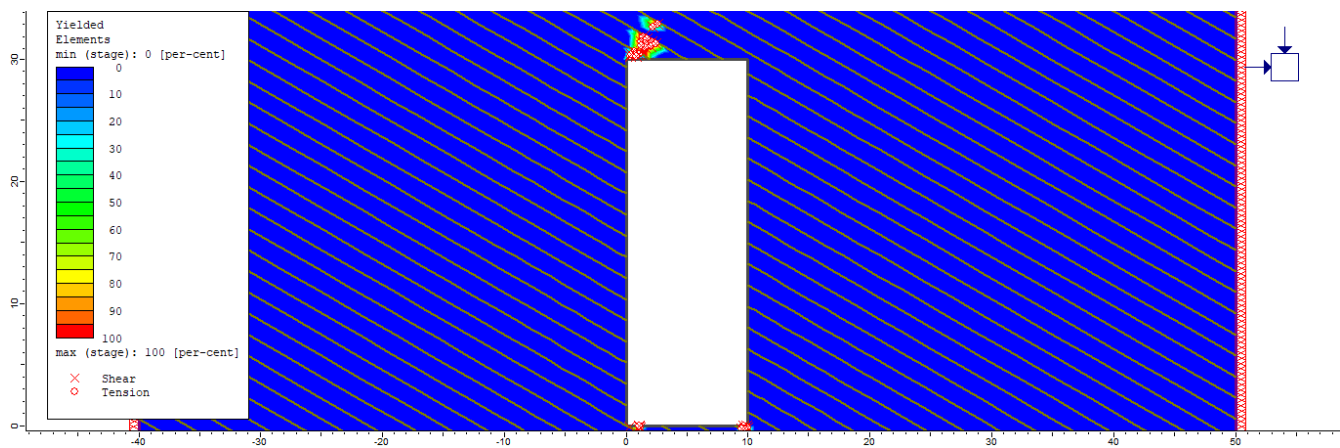
των διακλάσεων γίνεται αντιληπτό ότι δεν αναμένονται τελικώς πολύ εκτεταμένες περιπτώσεις αστάθειας και υπέρθραυσης, αλλά αυτές αναμένονται να εντοπιστούν σε μεγαλύτερο βαθμό από τον προηγούμενο κύκλο.

Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι και η συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται με κύρια χρήση στον έλεγχο της συμβατότητας των αναμενόμενων αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τις εμπειρικές μεθόδους ελέγχου της ευστάθειας και το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2.

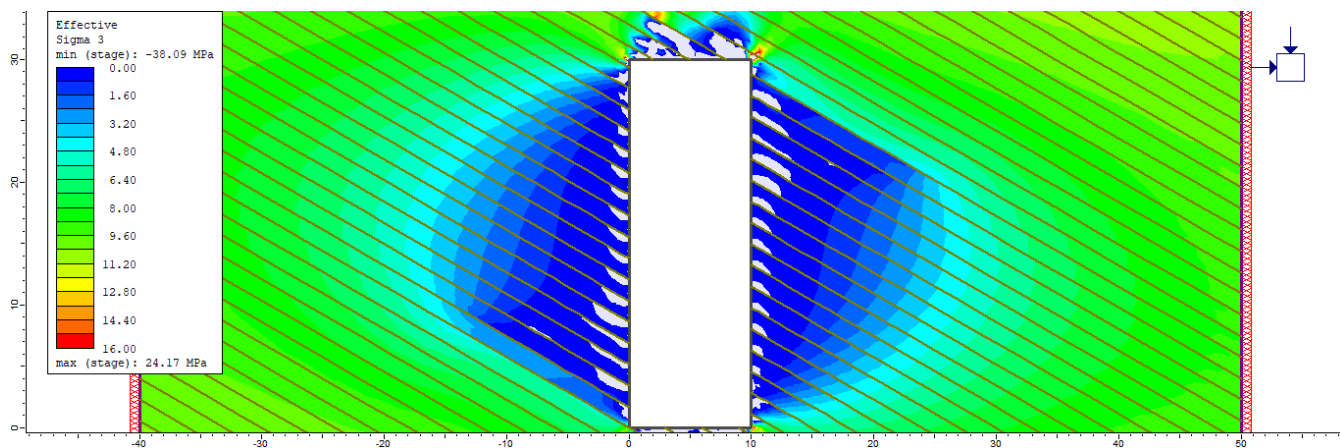
5.3.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.3.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.3.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.24: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.25: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.3.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.16: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

30 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	0	300	0,00	#4
	FW - RSW	30	1000	20	0		0,00	#4
	CR	10	1000	20	0,49		0,16	#4

5.3.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.3.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

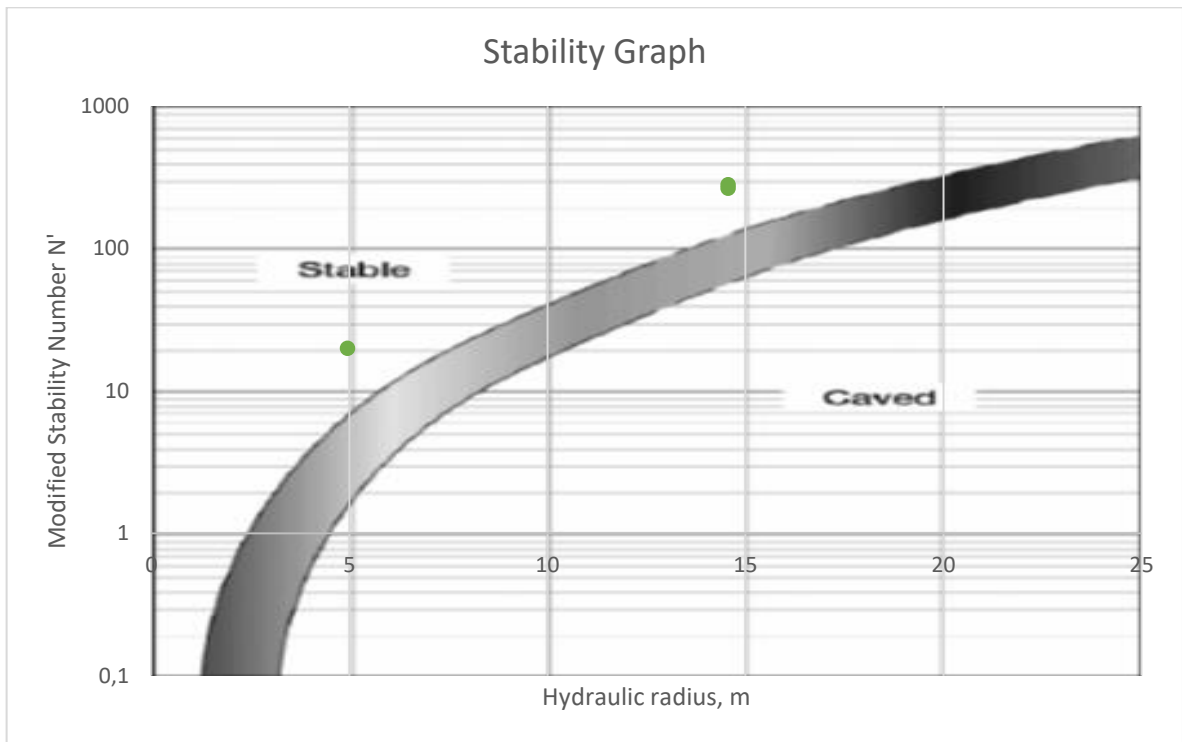
Πίνακας 5.17: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	30	50	30	0	1	0,2	2	20,00	4,95
L-SW	90	30	50	60	7,21	0,88	0,8	8	281,60	14,56
R-SW	90	30	50	60	7,54	0,83	0,8	8	265,60	14,56

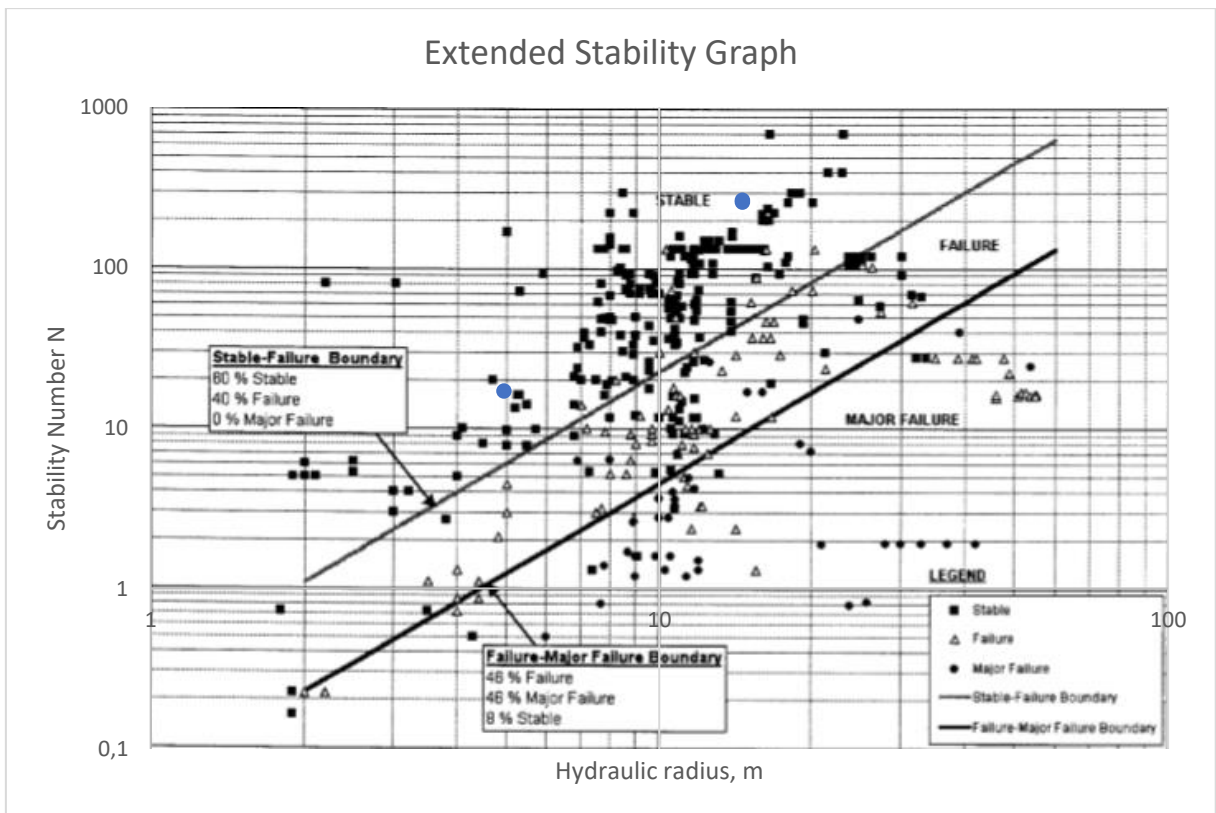
Πίνακας 5.18: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	1	0,34	1,00	17
L-SW	50	0,82	0,8	8,00	262,4
R-SW	50	0,8	0,8	8,00	256

5.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.26: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.27: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

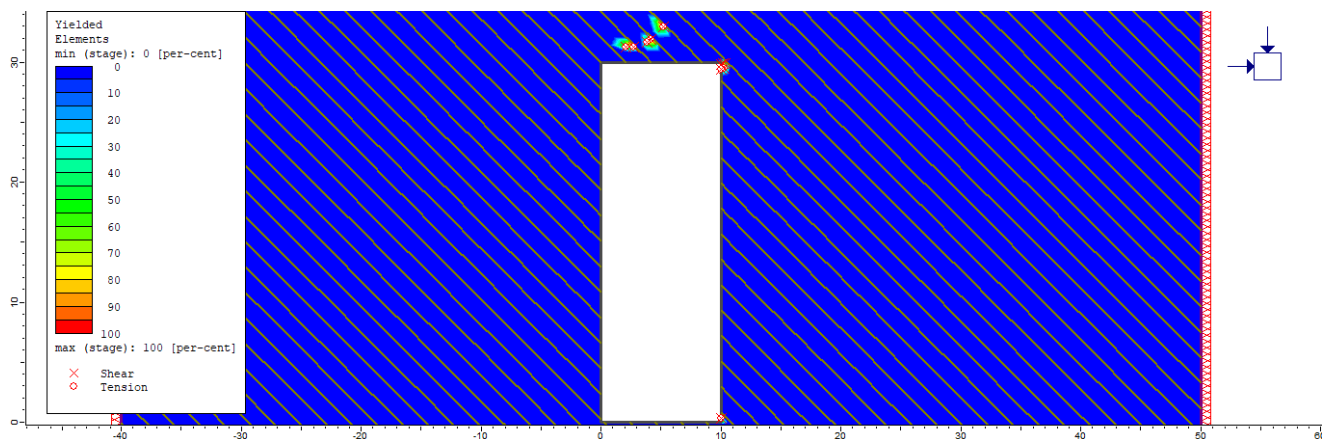
5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.19: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων						
Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	17	20	4,95	< 5	95	Stable
HW	262,4	281,6	14,56	< 5	100	Stable
R-SW	256	265,6	14,56	< 5	100	Stable

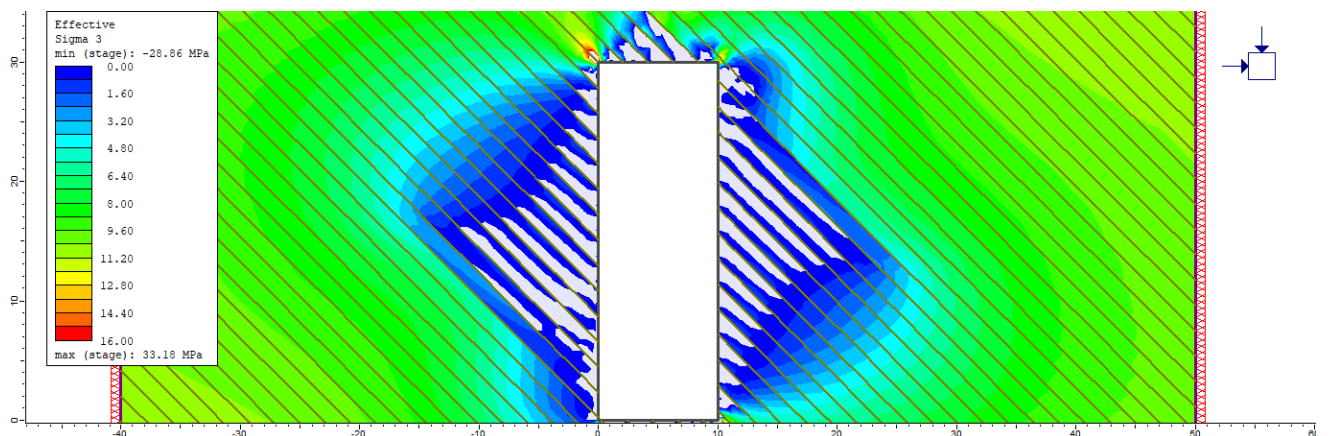
5.3.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.3.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.28: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.29: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.3.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.20: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

45 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	0	300	0,00	#5
	FW - RSW	30	1000	20	0,11		0,04	#5
	CR	10	1000	20	0		0,00	#5

5.3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.3.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

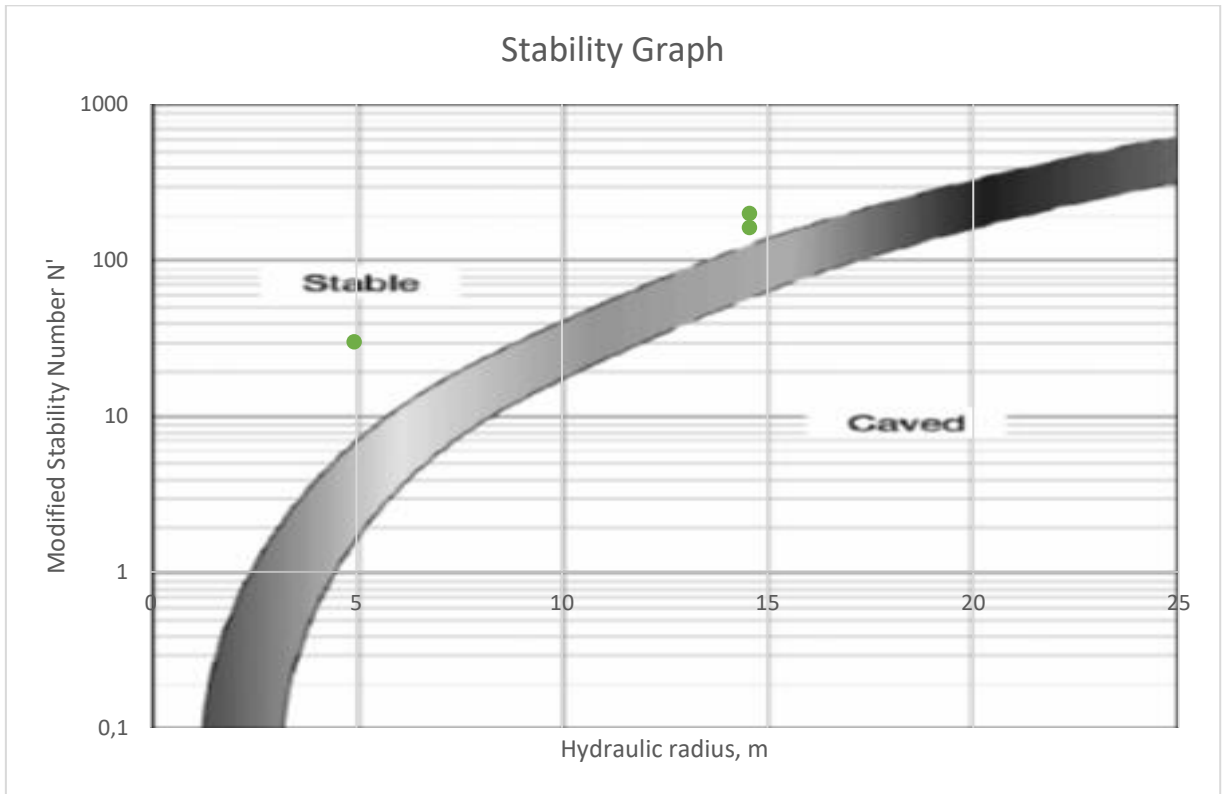
Πίνακας 5.21: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	45	50	45	9,97	0,6	0,5	2	30,00	4,95
L-SW	90	45	50	45	1,49	1	0,5	6,5	162,50	14,56
R-SW	90	45	50	45	1,69	1	0,5	8	200,00	14,56

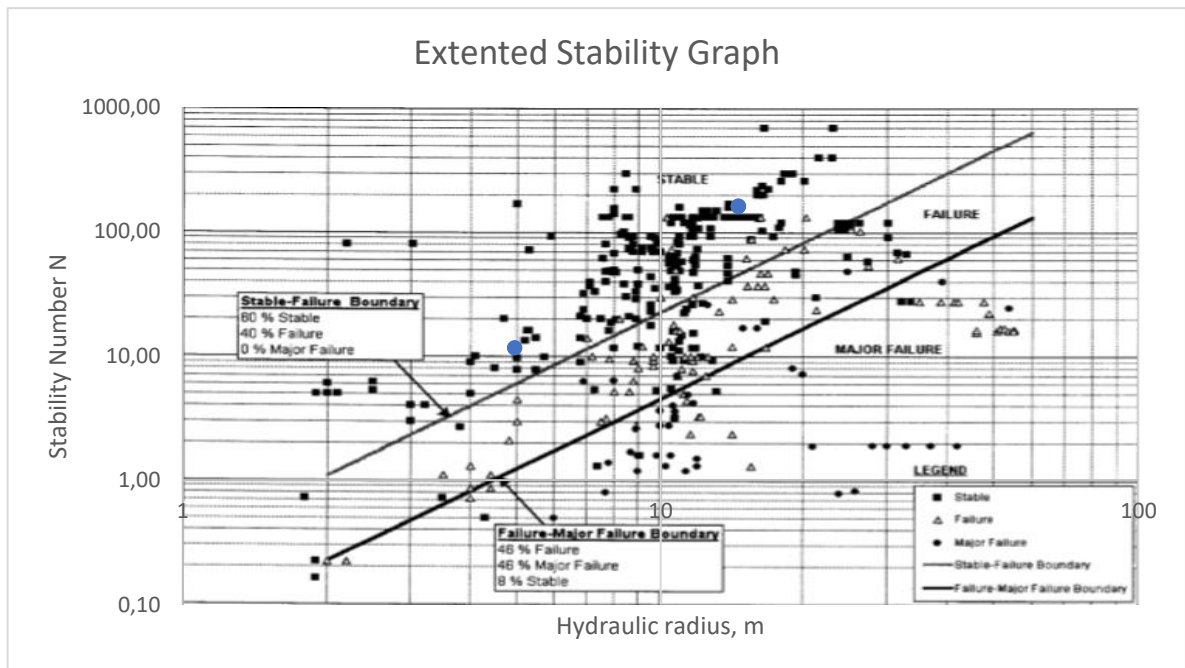
Πίνακας 5.22: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	0,58	0,4	1	11,6
L-SW	50	1	0,4	8	160
R-SW	50	1	0,4	8	160

5.3.3.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.30: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.31: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

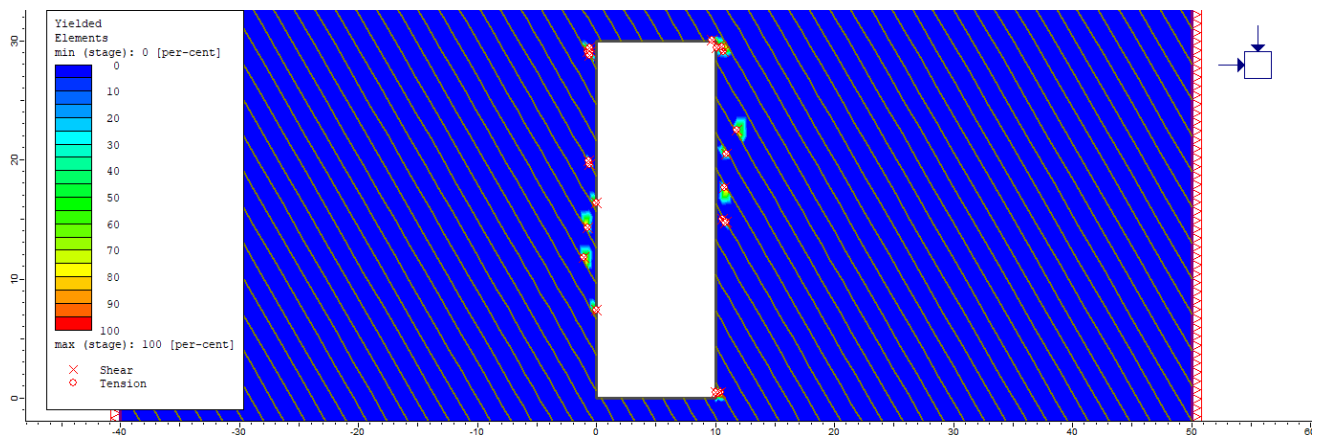
5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.23: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων						
Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	11,60	30	4,95	< 5	88	Stable
HW	160,00	162,5	14,56	< 5	100	Stable
R-SW	160,00	200	14,56	< 5	100	Stable

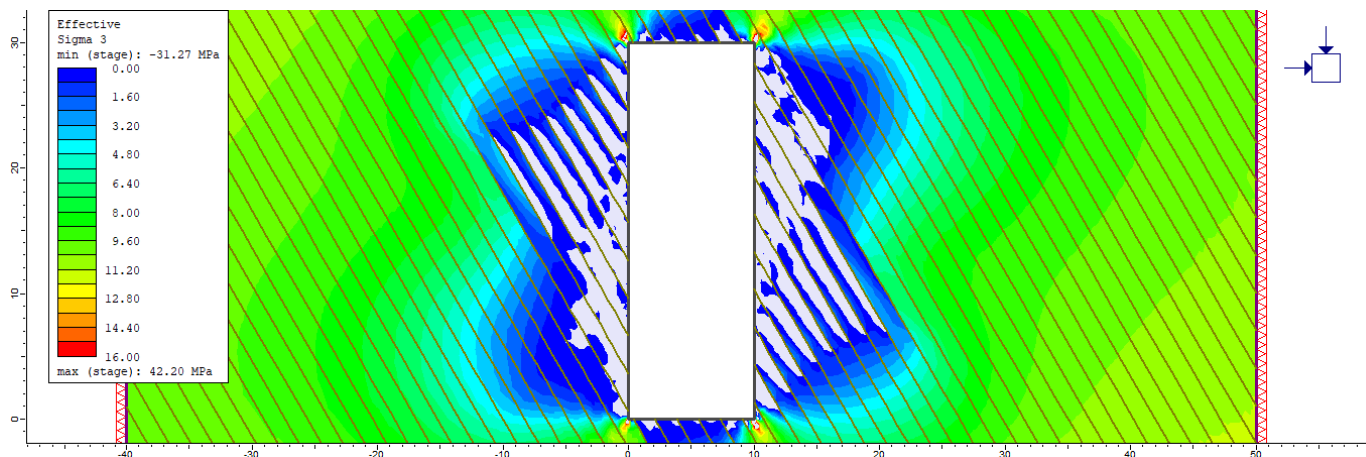
5.3.4 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.3.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.32: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.33: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.3.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

60 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	0,91	300	0,30	#6
	FW - RSW	30	1000	20	0,69		0,23	#6
	CR	10	1000	20	0		0,00	#6

5.3.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.3.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

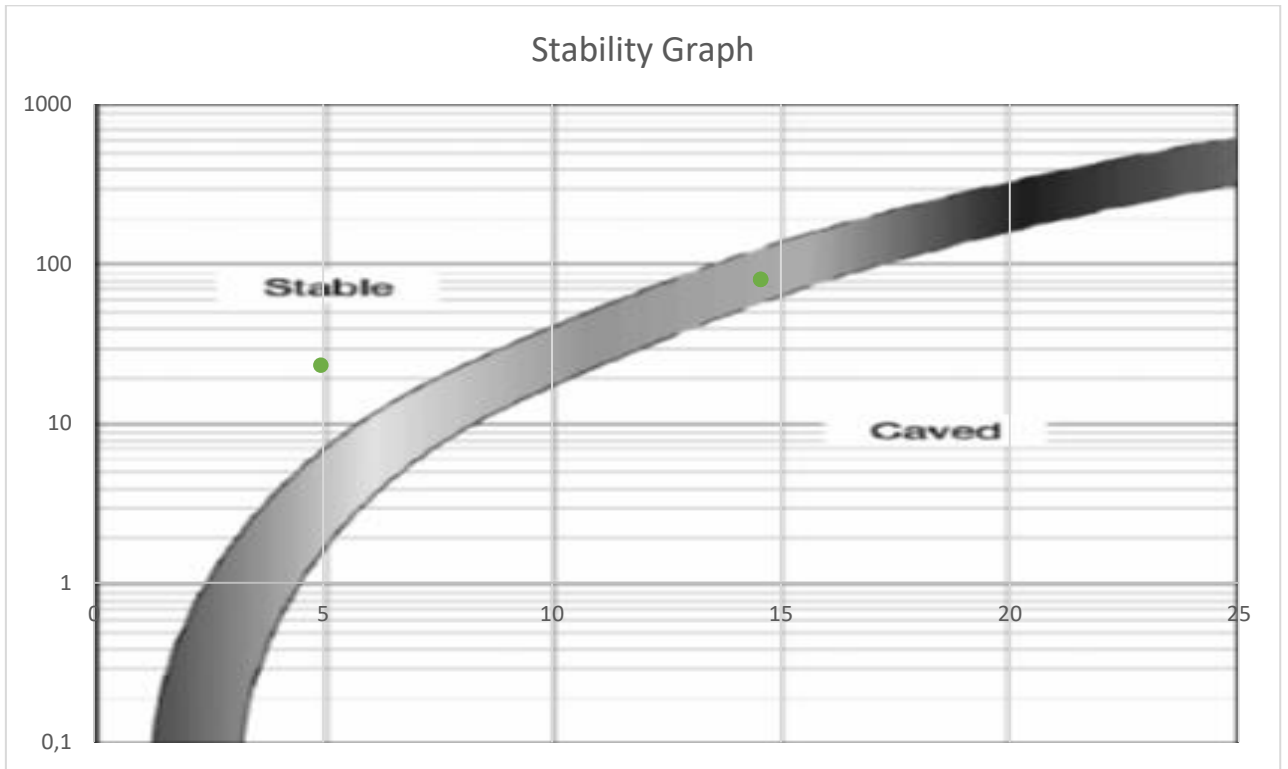
Πίνακας 5.25: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	60	50	60	17,97	0,29	0,8	2	23,20	4,95
L-SW	90	60	50	30	0,88	1	0,2	8	80,00	14,56
R-SW	90	60	50	30	0,36	1	0,2	8	80,00	14,56

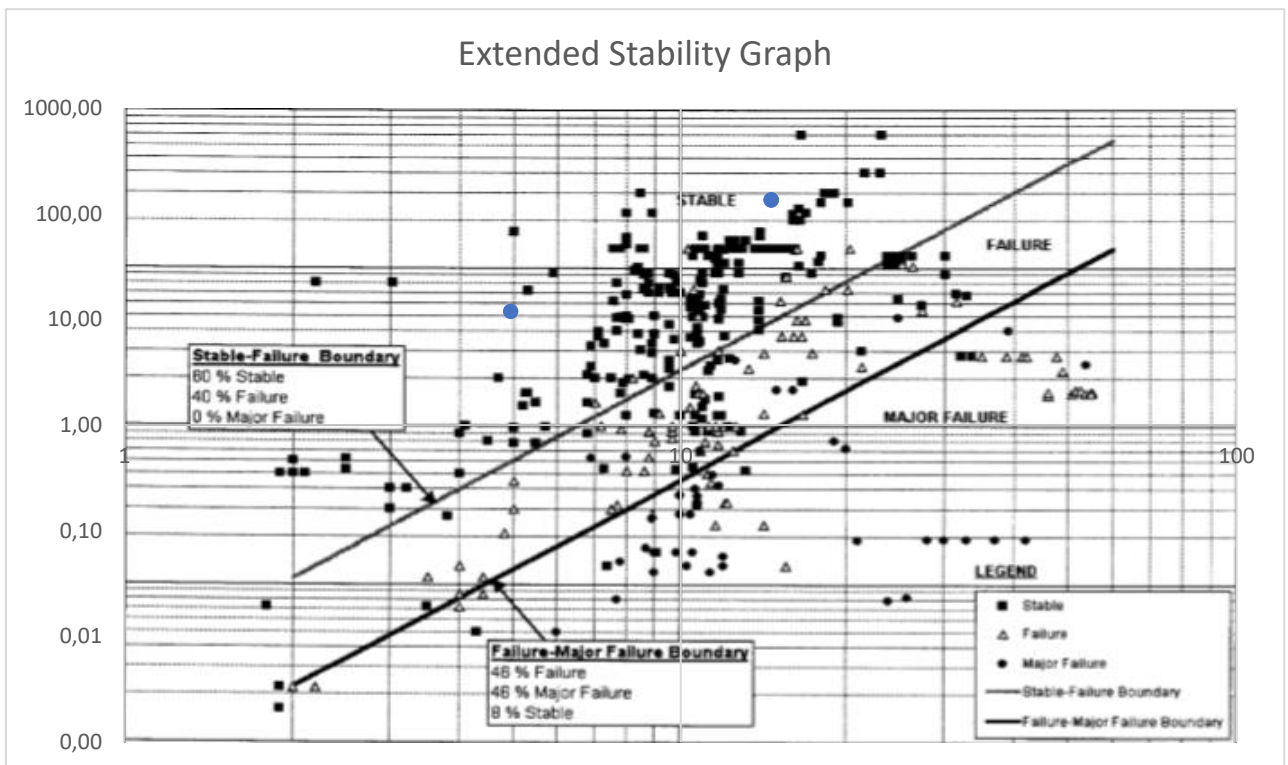
Πίνακας 5.26: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	50	0,3	0,8	1	12
L-SW	50	1	0,34	8	136
R-SW	50	1	0,34	8	136

5.3.3.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.34: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.35: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.3.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.27: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων						
Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροποποιημένος Δείκτης ευστάθειας N'	Υδραυλική ακτίνα HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	12,00	23,2	4,95	< 5	88	Stable
HW	136,00	80	14,56	< 5	95	Stable
R-SW	136,00	80	14,56	< 5	95	Stable

5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 3^{ου} κύκλου αναλύσεων

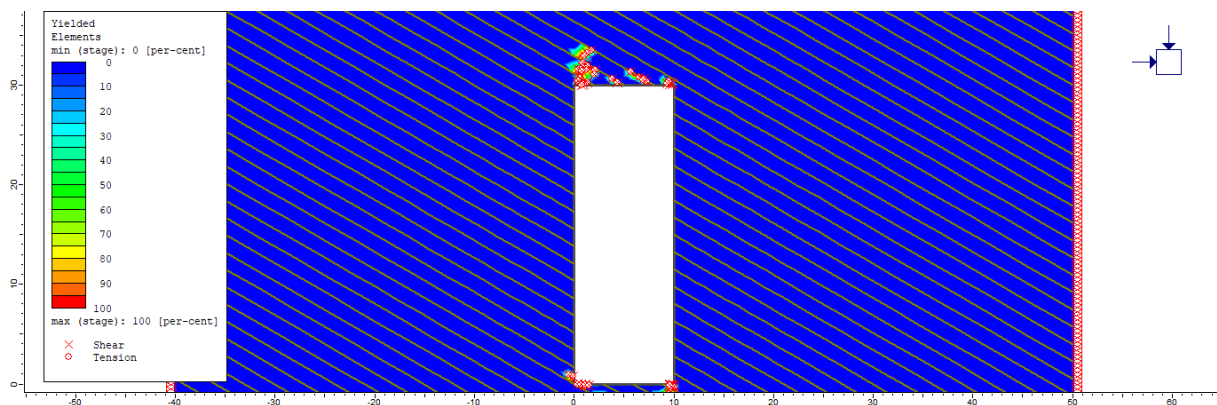
5.4.1 Εισαγωγή

Το υλικό που εντοπίζεται στις εξεταζόμενες τρεις αναλύσεις αυτής της κατηγορίας είναι ίδιο με αυτό του προηγούμενου κύκλου. Παρόλα αυτά εντός των ασυνεχειών εντοπίζεται υλικό πλήρωσης, γεγονός που επηρεάζει τελικώς σε σημαντικό βαθμό την ευστάθεια του μετώπου εξόρυξης. Αν και συνολικά οι συνθήκες που δημιουργούνται δεν είναι εξαιρετικά δυσμενείς για την ευστάθεια του εξορυκτικού χώρου, αναμένονται μεγαλύτερα ποσοστά προσμίξεων από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (1^{ος} και 2^{ος} κύκλος αναλύσεων).

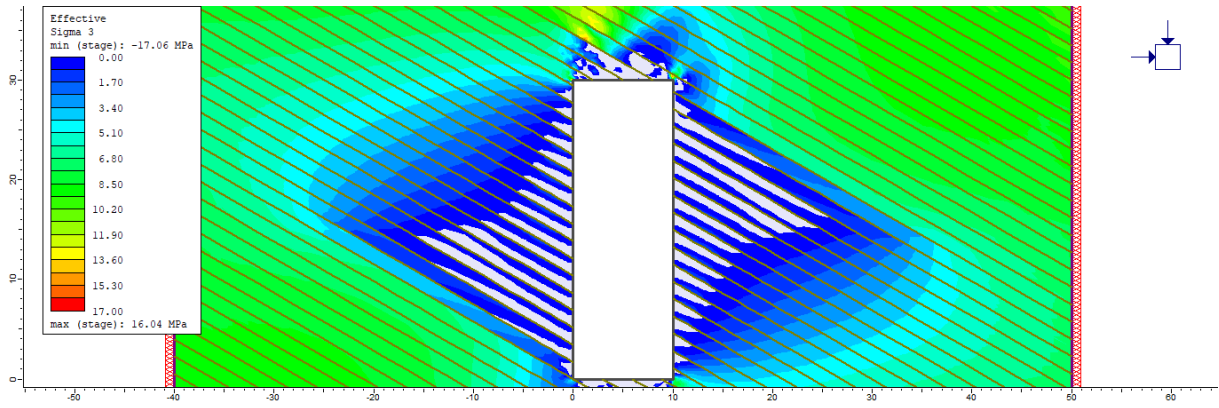
5.4.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.4.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.4.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.36: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.37: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.4.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.28: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

30 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	0,35	300	0,12	#7
	FW - RSW	30	1000	20	0		0,00	#7
	CR	10	1000	20	4,43		1,48	#7

5.4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

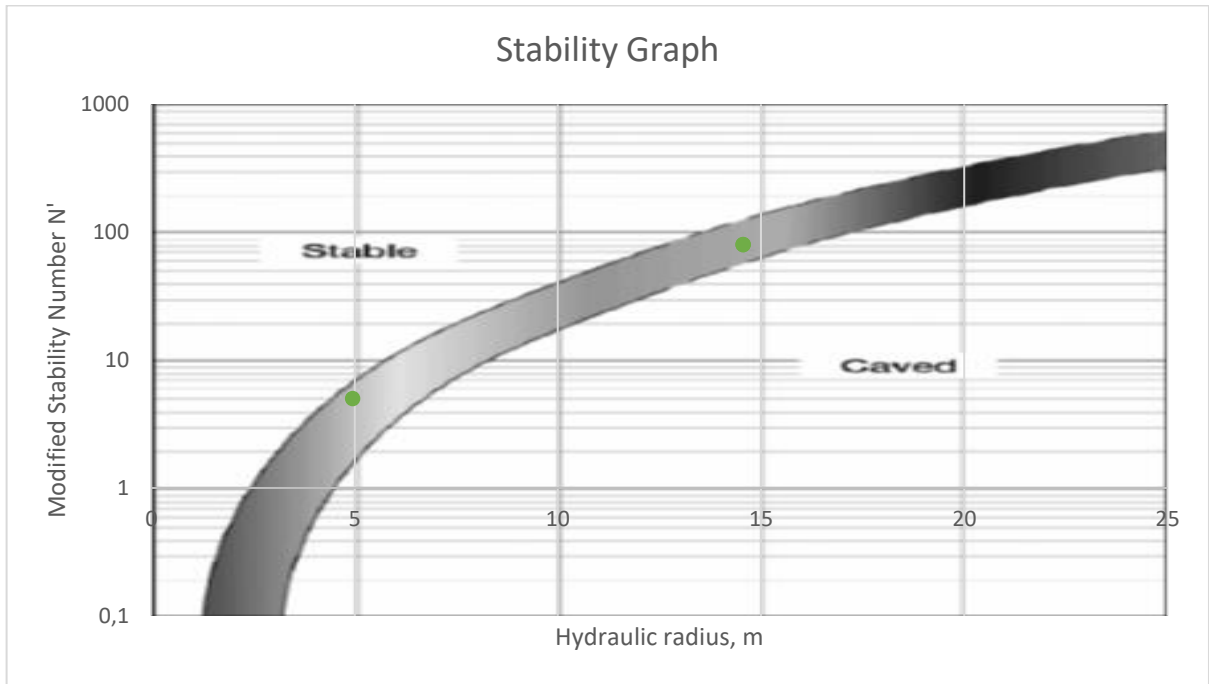
5.4.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Πίνακας 5.29: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

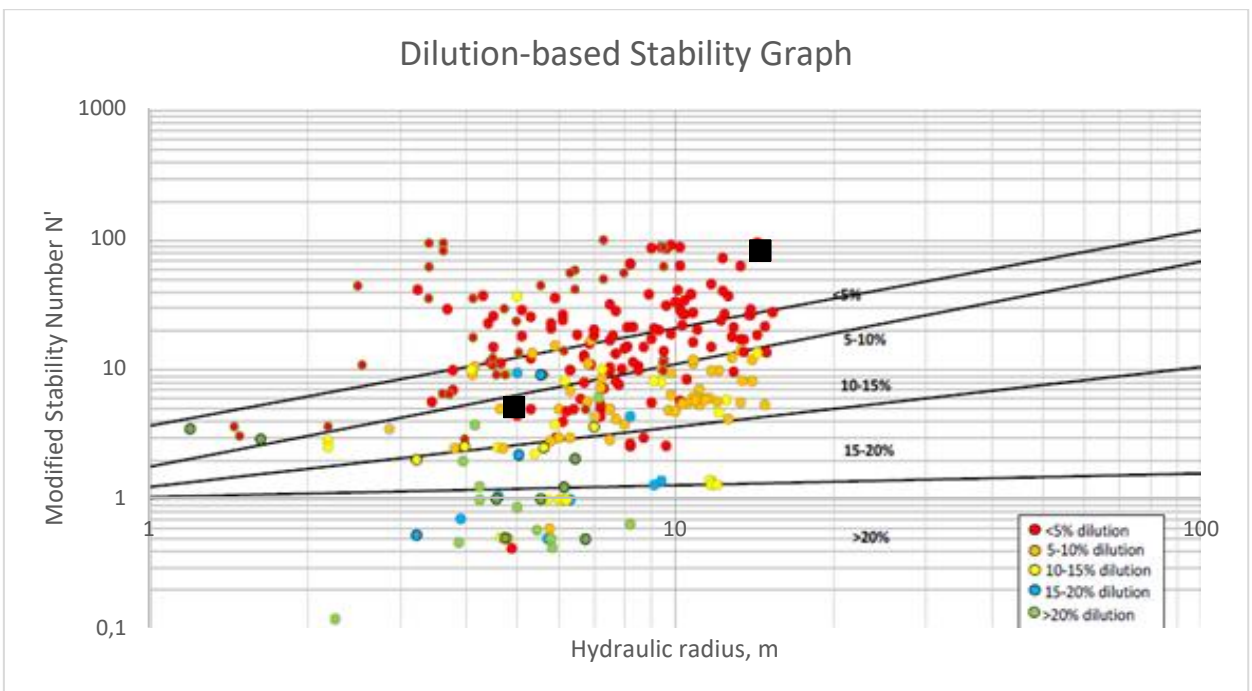
Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	30	12,5	30	0,05	1	0,2	2	5,00	4,95
L-SW	90	30	12,5	60	4,31	1	0,8	8	80,00	14,56
R-SW	90	30	12,5	60	4,17	1	0,8	8	80,00	14,56

Πίνακας 5.30: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews					
Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	1	0,34	1	4,25
L-SW	12,5	1	0,8	8	80
R-SW	12,5	1	0,8	8	80

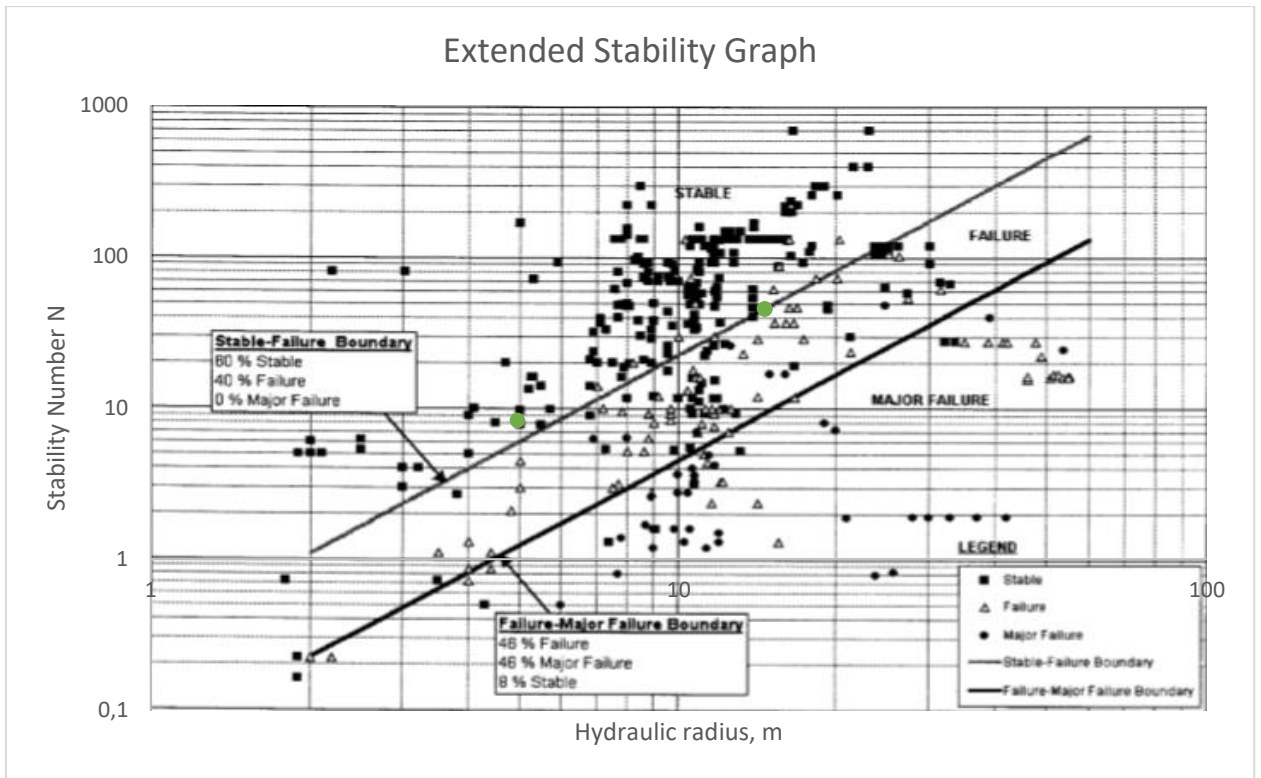
5.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



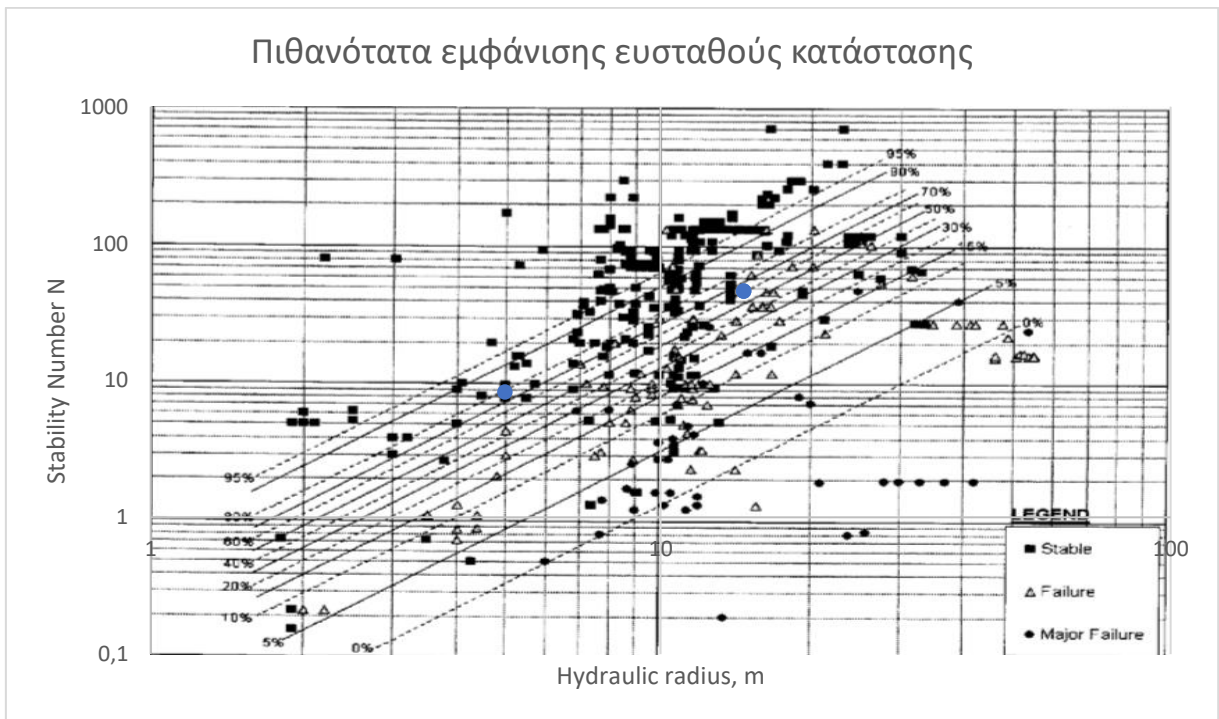
Εικόνα 5.38: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



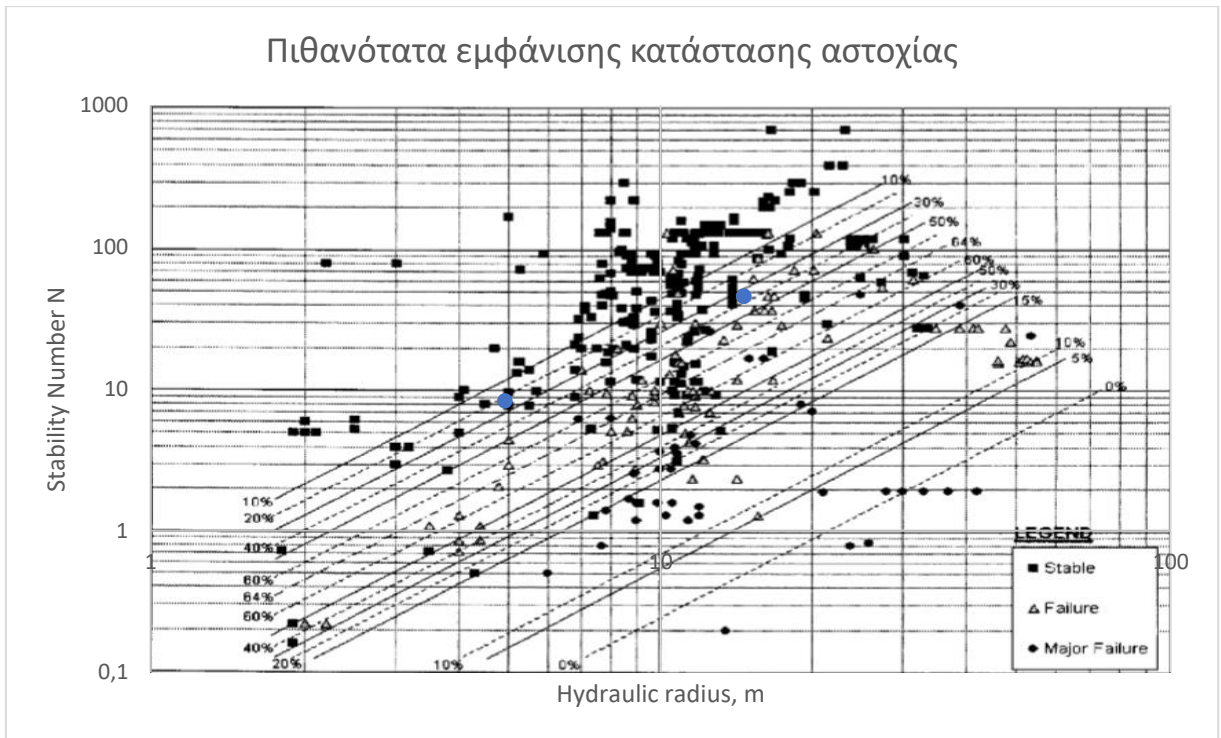
Εικόνα 5.39: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Παπαϊοανου και Suorineni (2015)



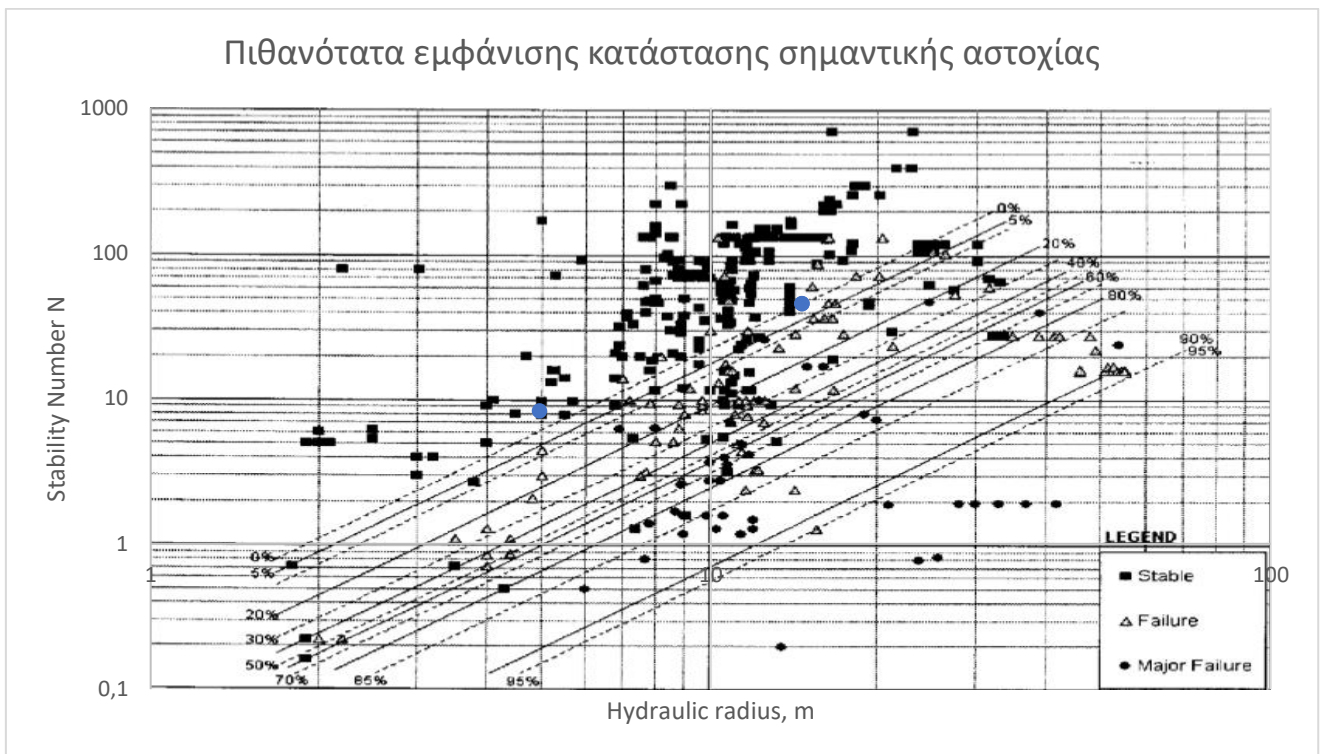
Εικόνα 5.40: Χρήση του *Extended Mathews' Stability Graph* κατά *Mawdesley et al (2001)*



Εικόνα 5.41: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης



Εικόνα 5.42: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης αστοχίας



Εικόνα 5.43: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης εκτεταμένης αστοχίας

5.4.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

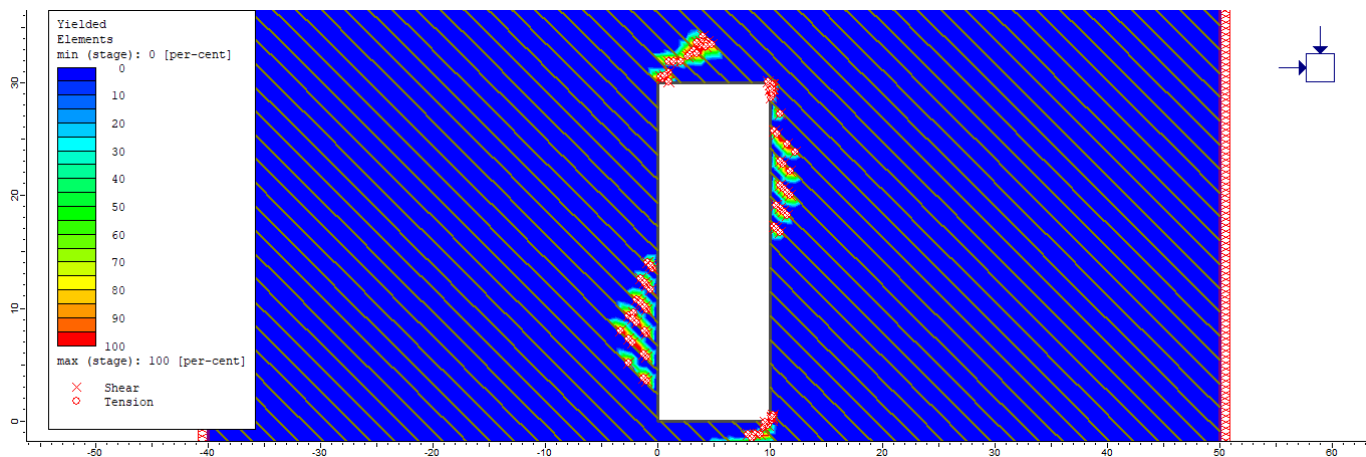
Πίνακας 5.31: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	8,24	5	4,95	10-15	75	25	0	Stable
HW	45	80	14,56	< 5	60	40	0	Stable (οριακά)
R-SW	45	80	14,56	< 5	60	40	0	Stable (οριακά)

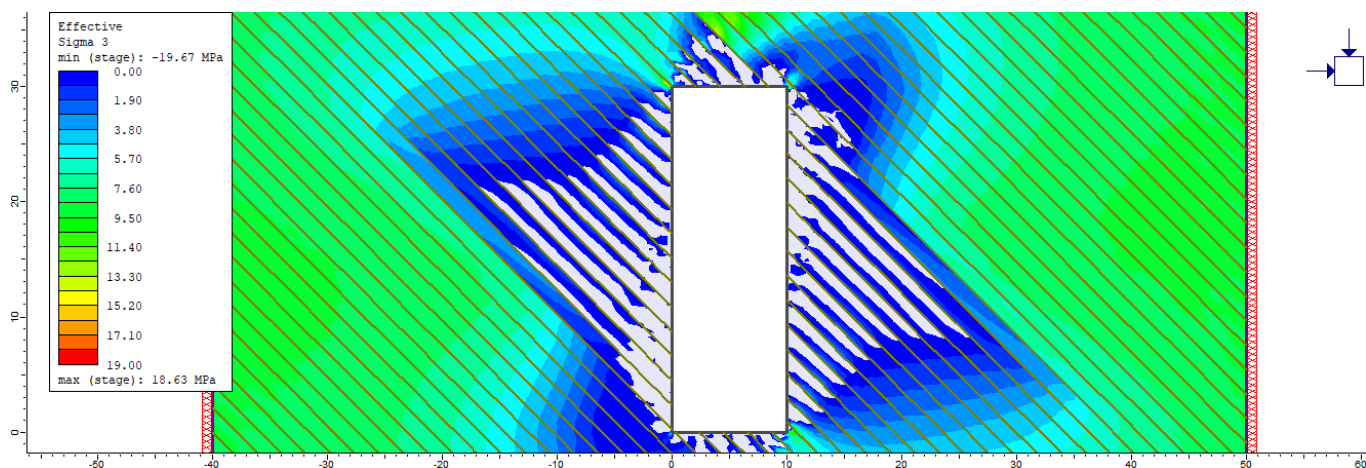
5.4.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.4.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.4.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.44: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.45: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.4.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.32: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
45 degrees	HW - LSW	30	1000	20	7,22	300	2,41	#8
	FW - RSW	30	1000	20	5,29		1,76	#8
	CR	10	1000	20	5,26		1,75	#8

5.4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.4.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

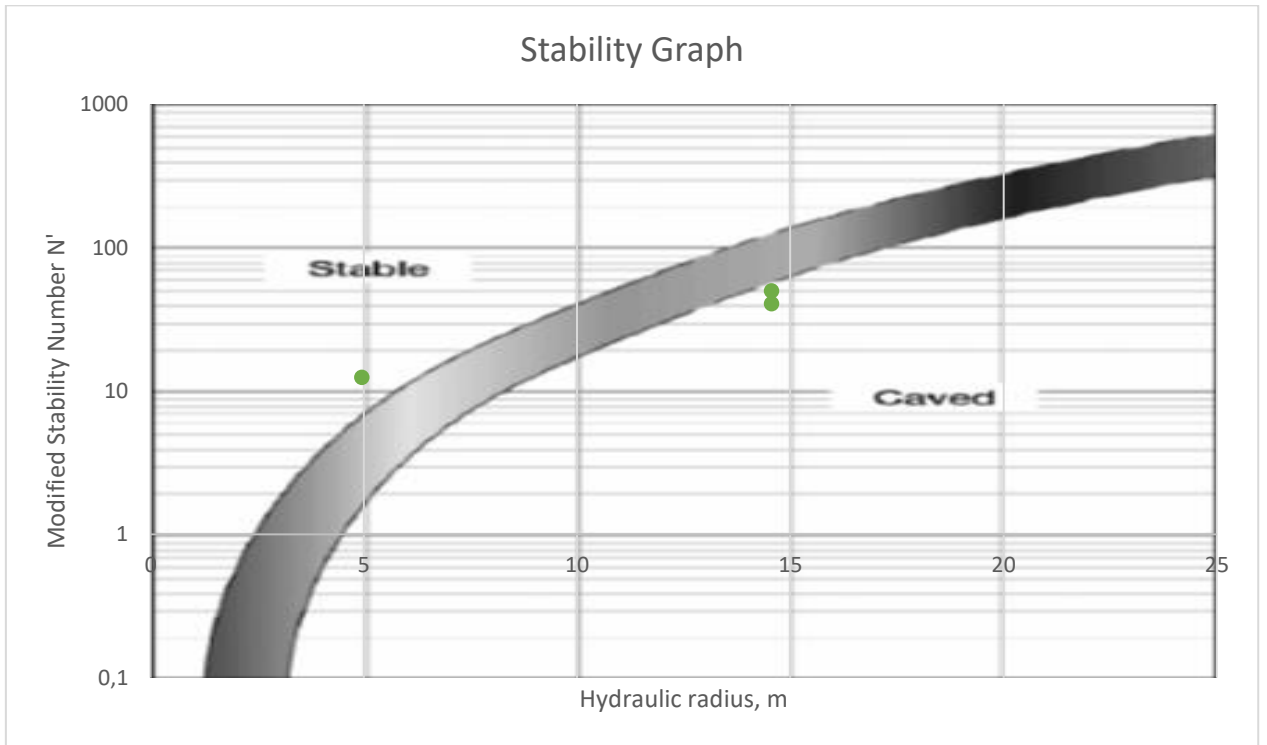
Πίνακας 5.33: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	45	12,5	45	0,61	1	0,5	2	12,50	4,95
L-SW	90	45	12,5	45	0,75	1	0,5	6,5	40,63	14,56
R-SW	90	45	12,5	45	0	1	0,5	8	50,00	14,56

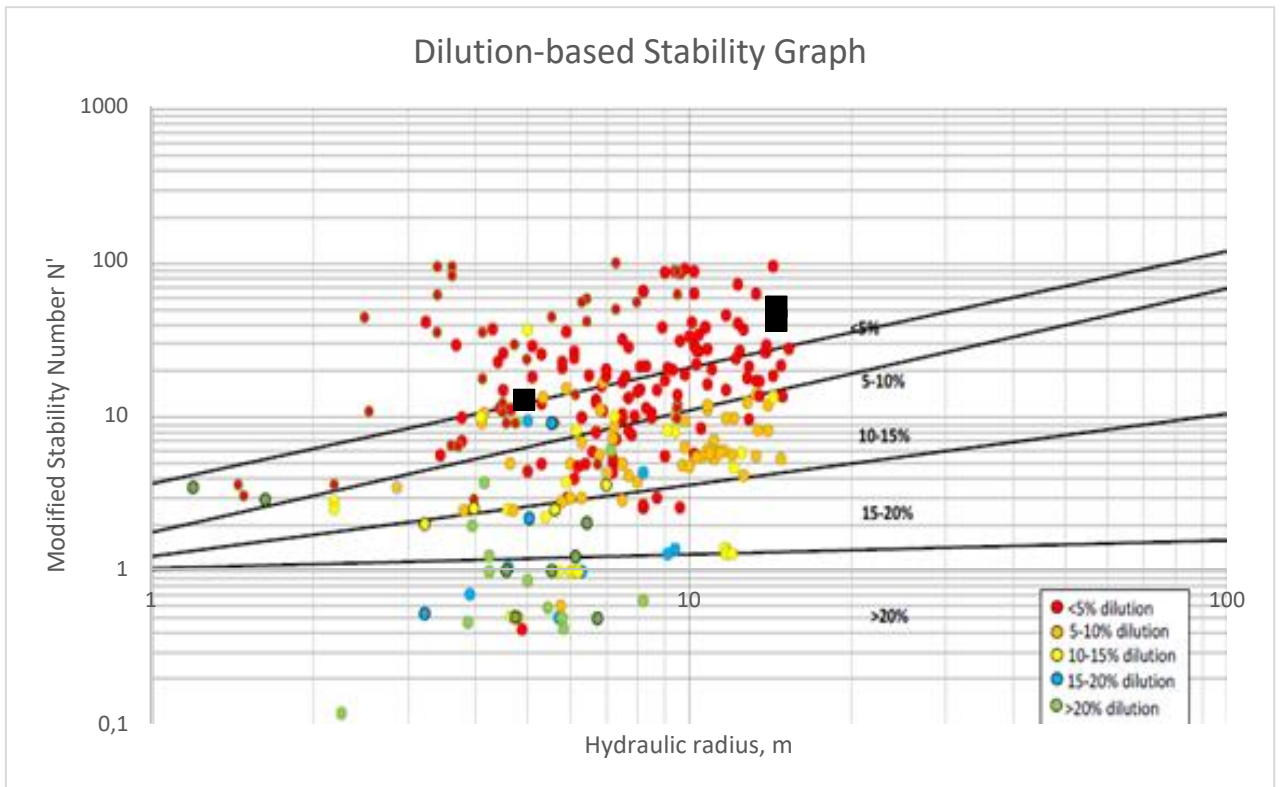
Πίνακας 5.34: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	1	0,4	1	5
L-SW	12,5	1	0,4	8	40
R-SW	12,5	1	0,4	8	40

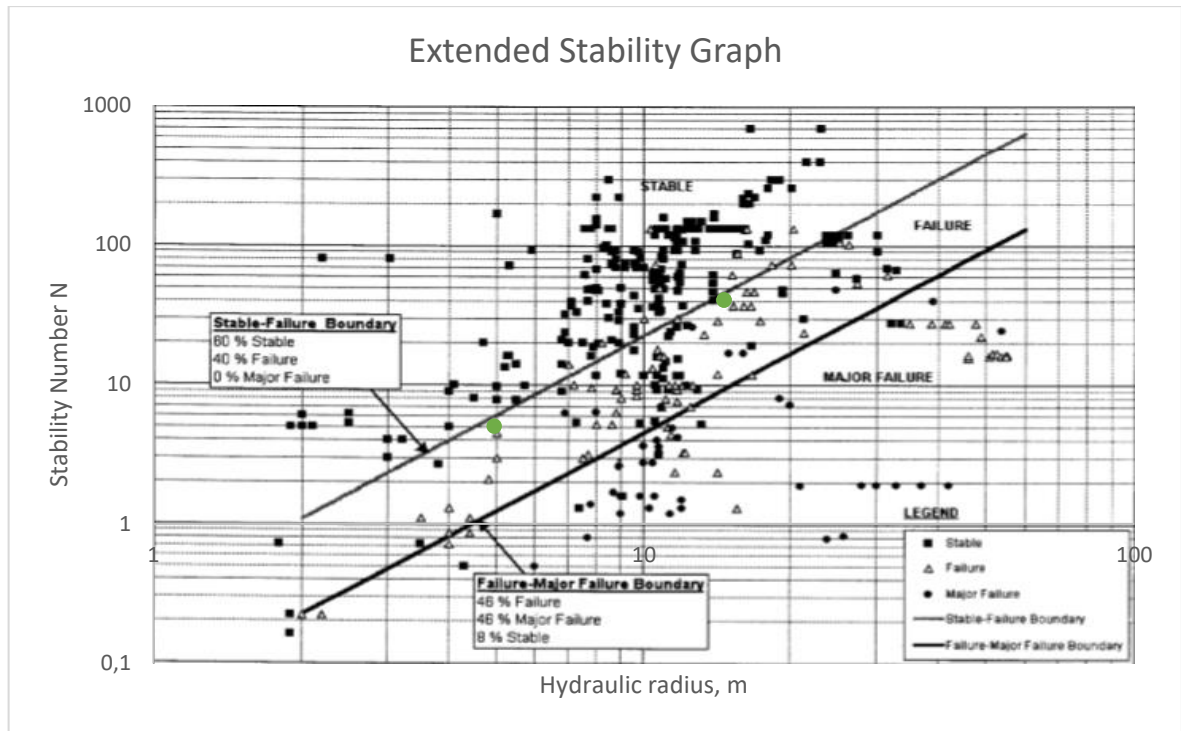
5.4.3.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



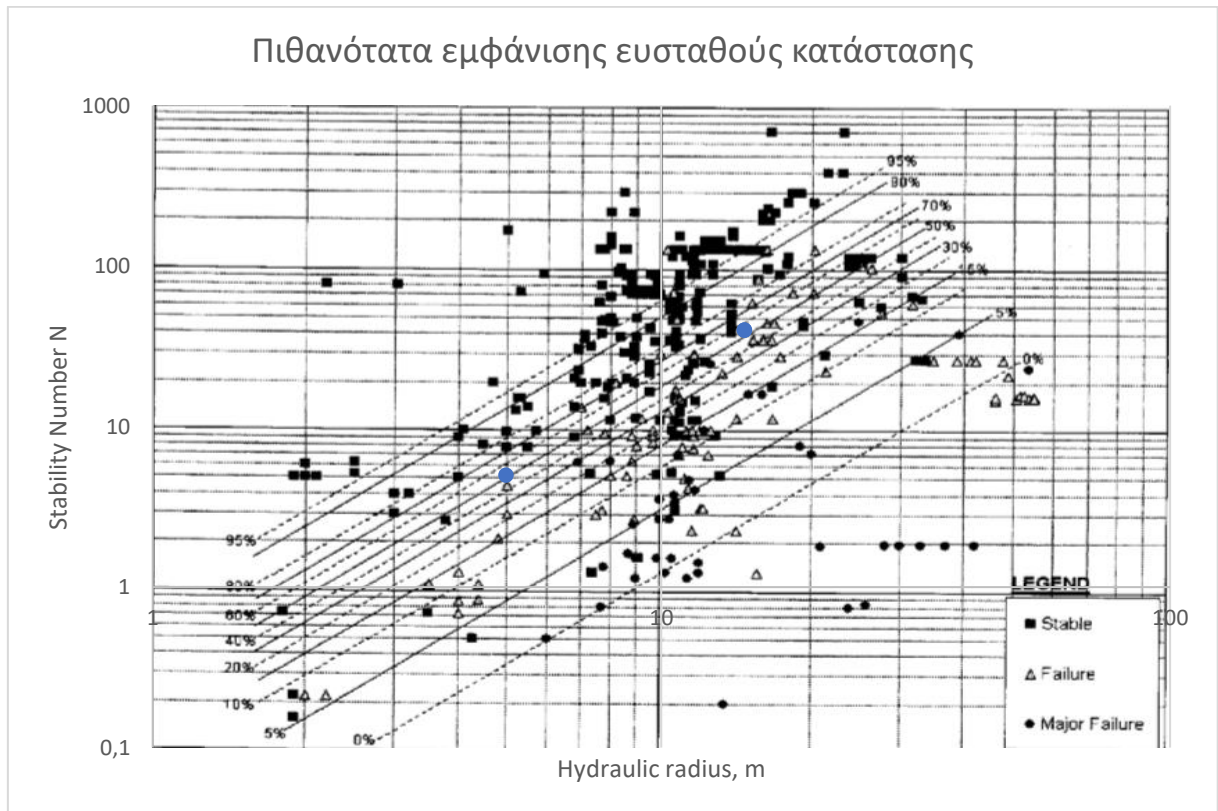
Εικόνα 5.46: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



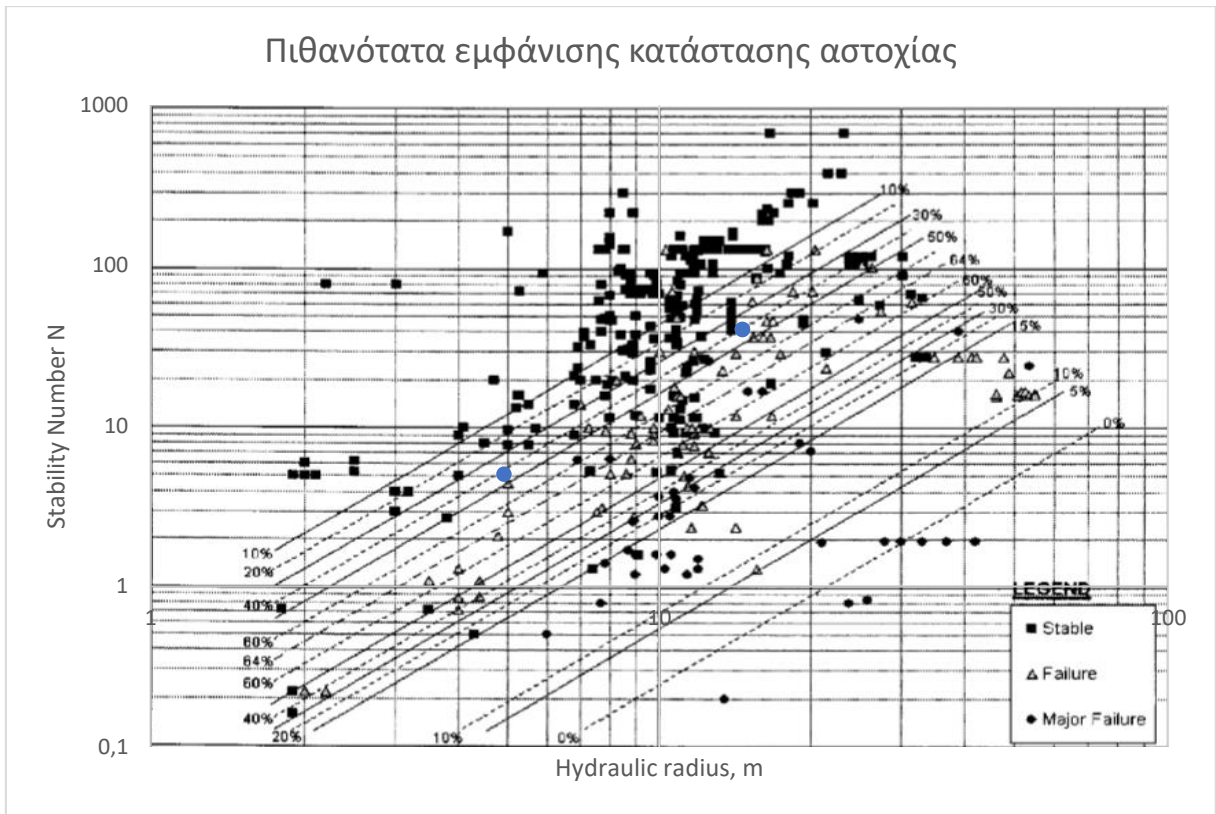
Εικόνα 5.47: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



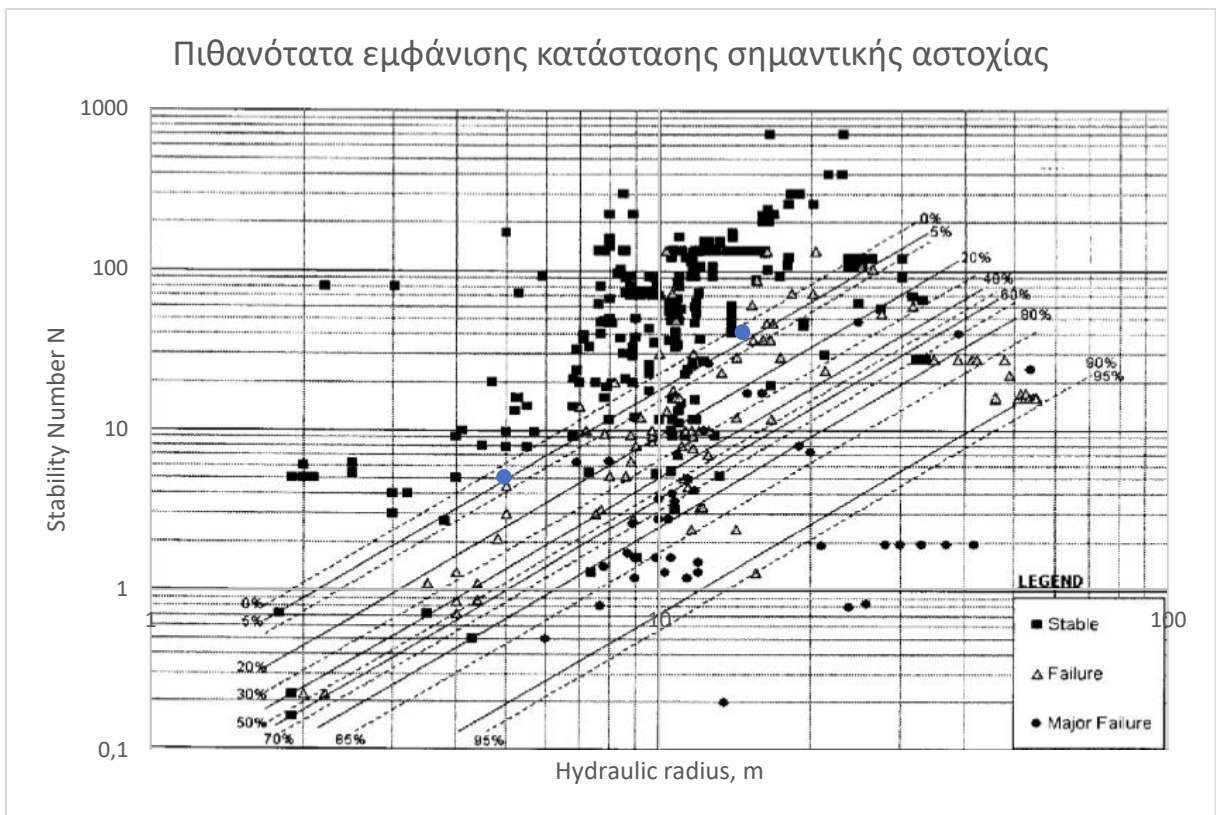
Εικόνα 5.48: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.49: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης



Εικόνα 5.50: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης αστοχίας



Εικόνα 5.51: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης εκτεταμένης αστοχίας

5.4.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

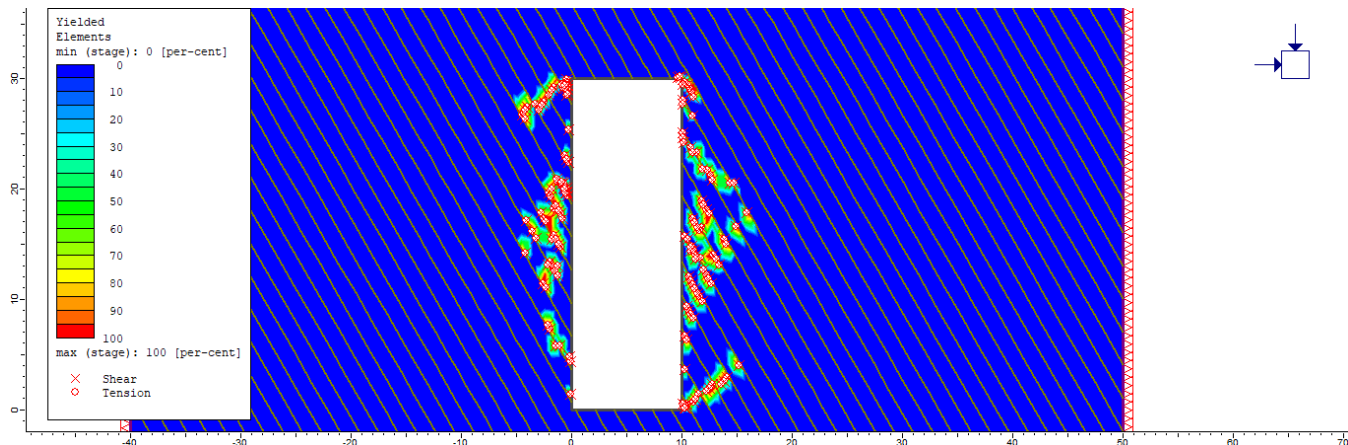
Πίνακας 5.35: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	5	12,5	4,95	< 5	50	40	5	Failure (οριακά)
HW	40	40,625	14,56	< 5	58	40	2	Failure (οριακά)
R-SW	40	50	14,56	< 5	58	40	2	Failure (οριακά)

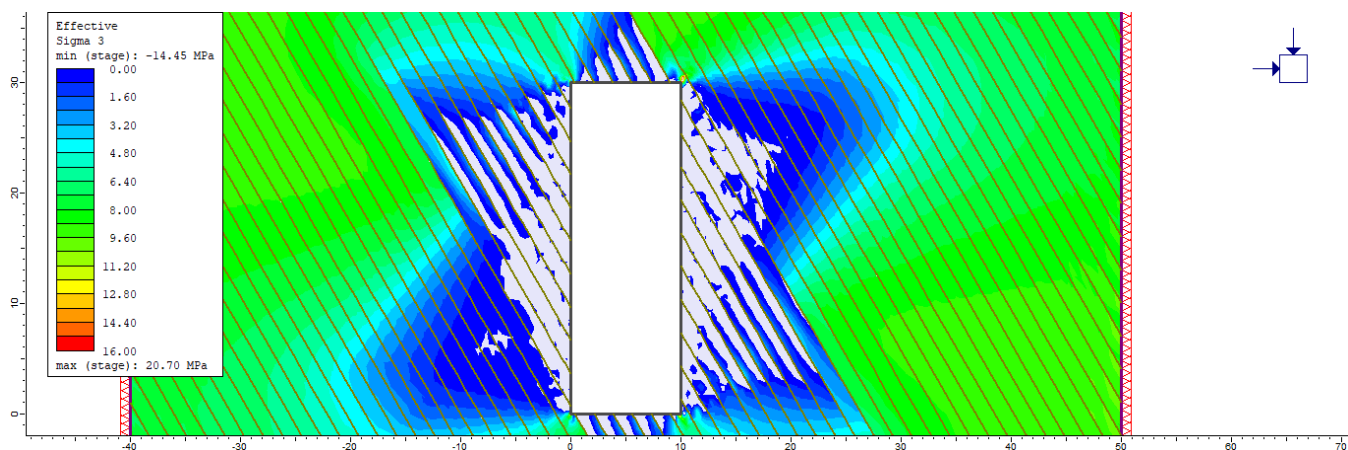
5.4.4 Κατηγορία 3^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.4.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.4.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.52: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



5.4.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.36: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
60 degrees	HW - LSW	30	1000	20	16,19	300	5,40	#9
	FW - RSW	30	1000	20	28,28		9,43	#9
	CR	10	1000	20	0,03		0,00	#9

5.4.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.4.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

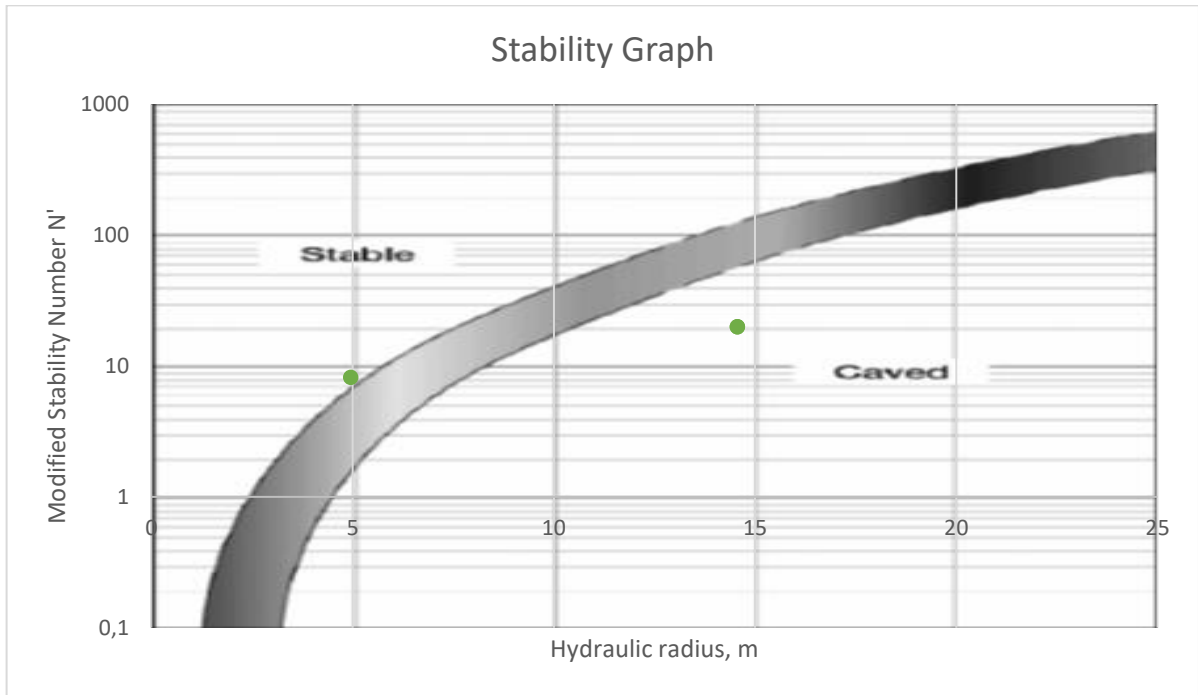
Πίνακας 5.37: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ ₁	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	60	12,5	60	13,09	0,41	0,8	2	8,20	4,95
L-SW	90	60	12,5	30	1,27	1	0,2	8	20,00	14,56
R-SW	90	60	12,5	30	0,86	1	0,2	8	20,00	14,56

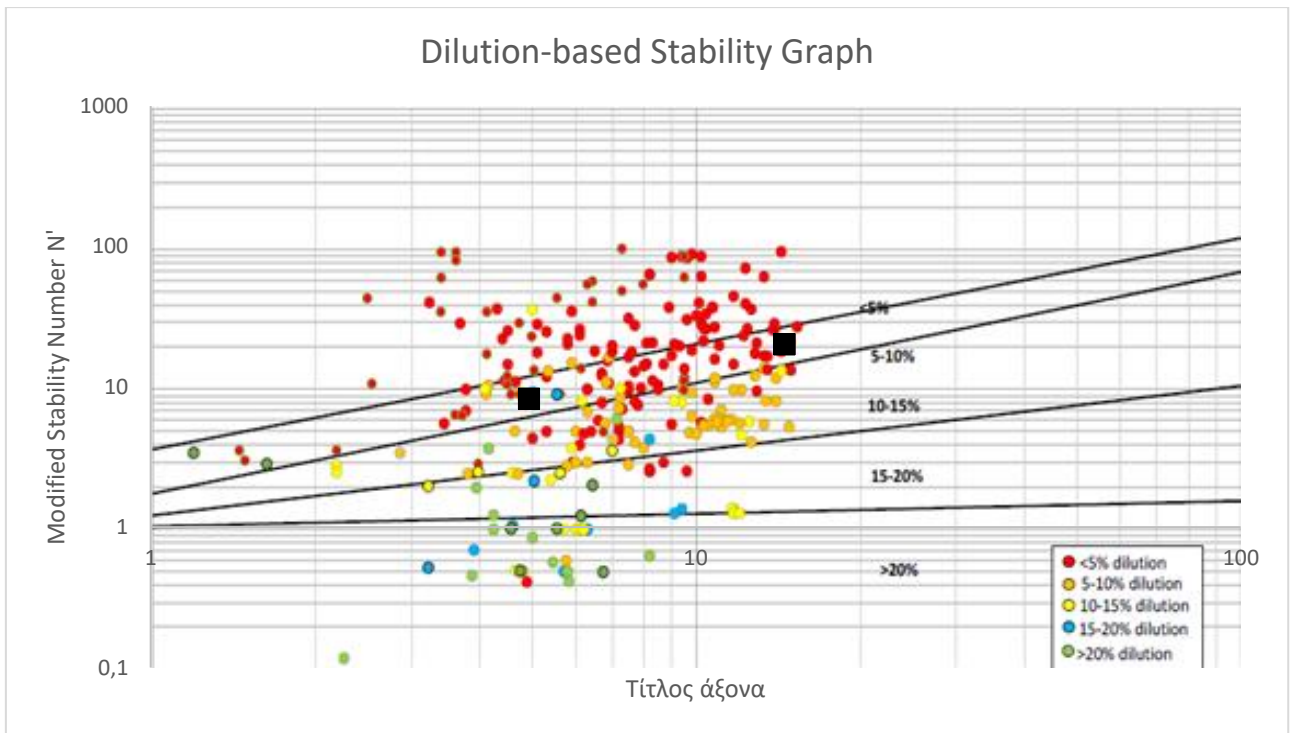
Πίνακας 5.38: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	0,4	0,8	1	4
L-SW	12,5	1	0,34	8	34
R-SW	12,5	1	0,34	8	34

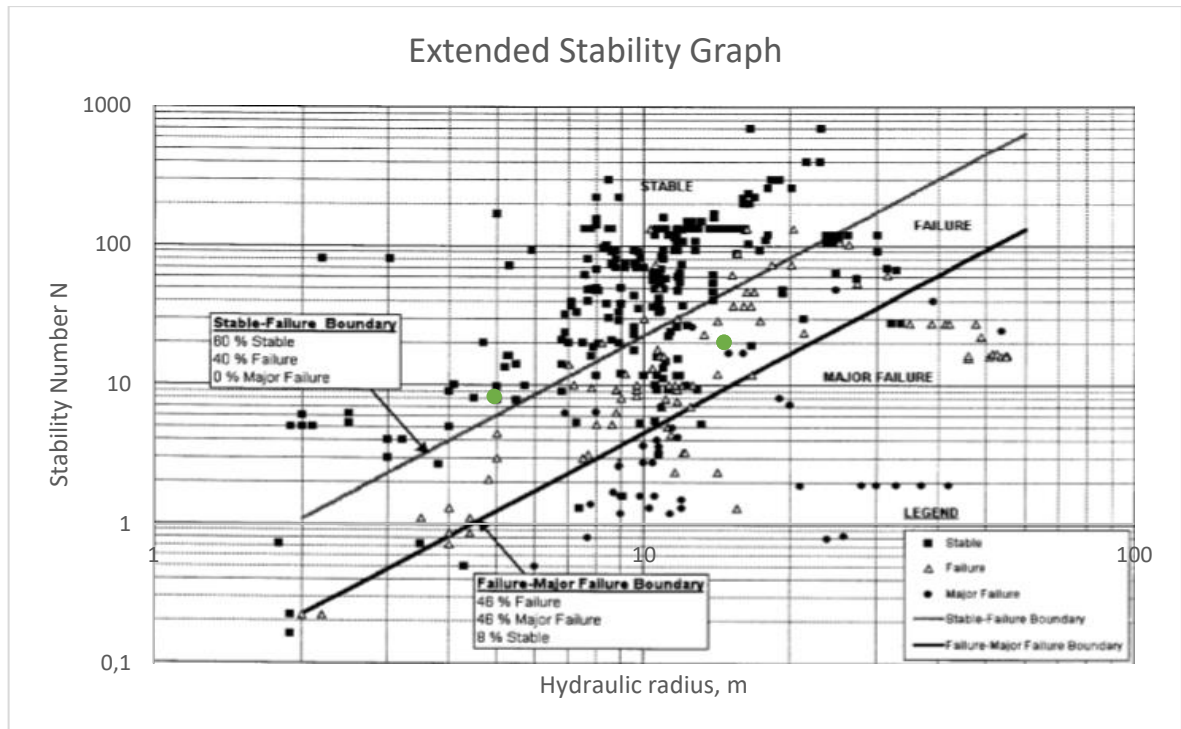
5.4.4.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



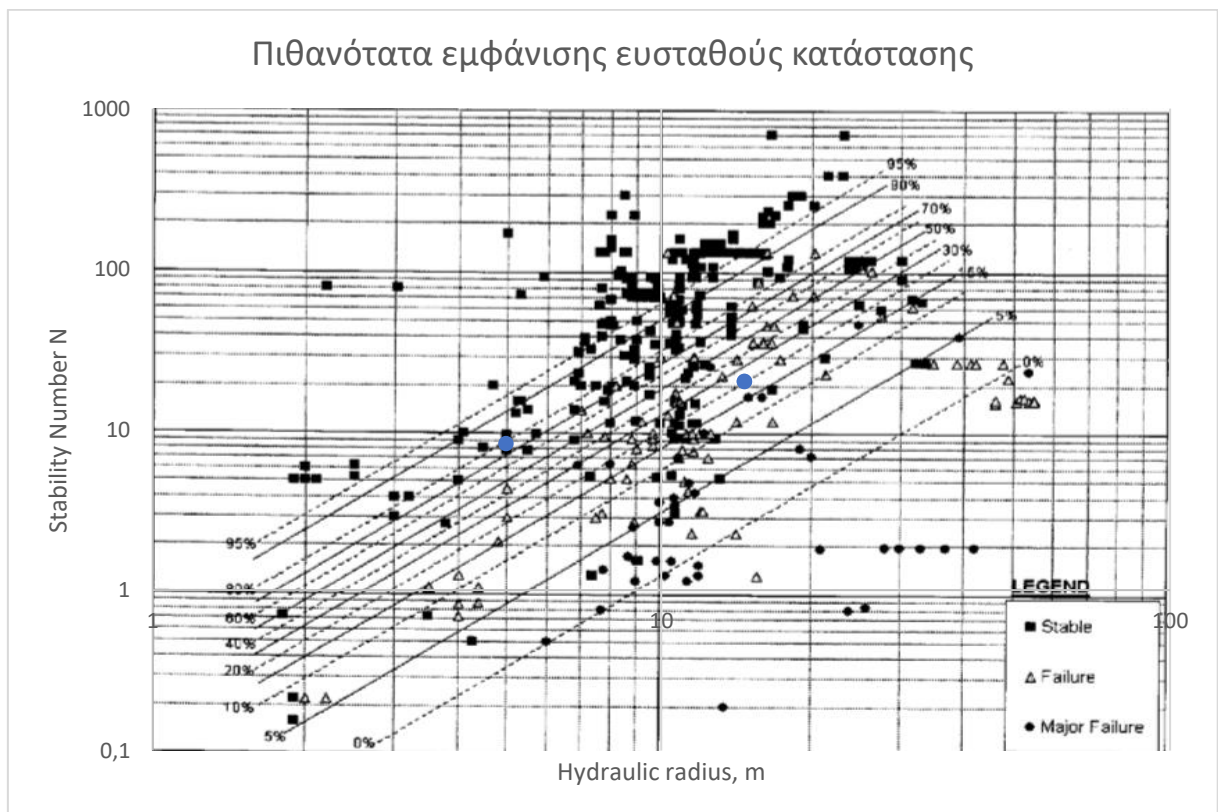
Εικόνα 5.54: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



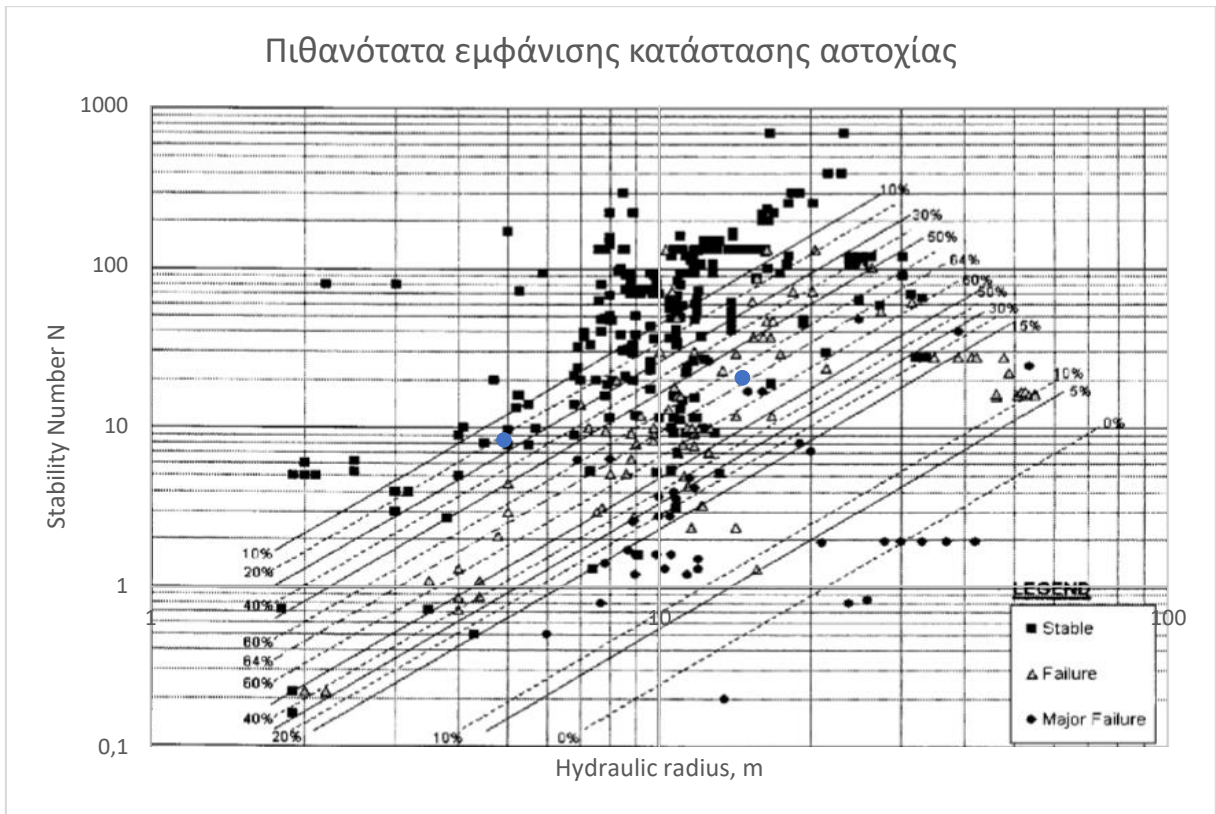
Εικόνα 5.55: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Παραϊοανου και Suorineni (2015)



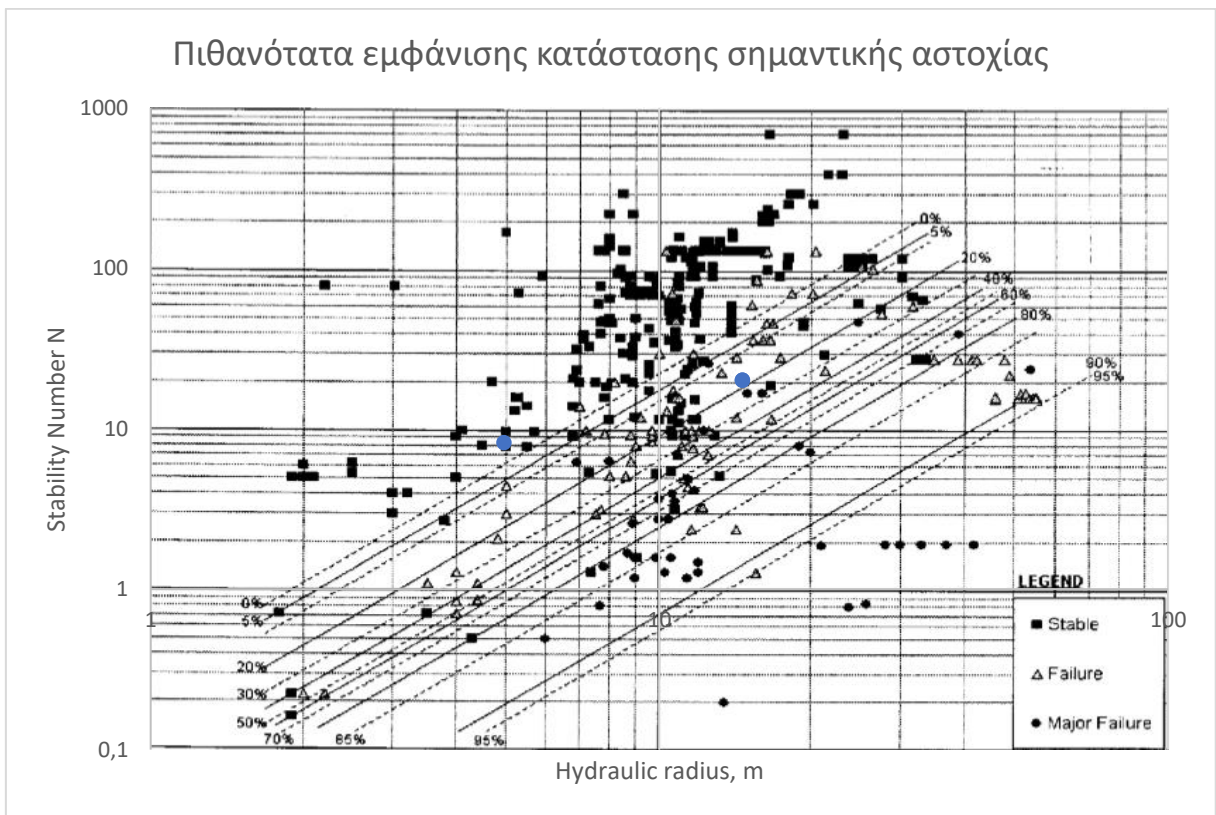
Εικόνα 5.56: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.57: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης



Εικόνα 5.58: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης αστοχίας



Εικόνα 5.59: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης εκτεταμένης αστοχίας

5.4.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.39: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	4	8,2	4,95	5 - 10	80	20	0	Stable
HW	34	20	14,56	5 - 10	20	64	16	Failure
R-SW	34	20	14,56	5 - 10	20	64	16	Failure

5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 4^{ου} κύκλου αναλύσεων

5.5.1 Εισαγωγή

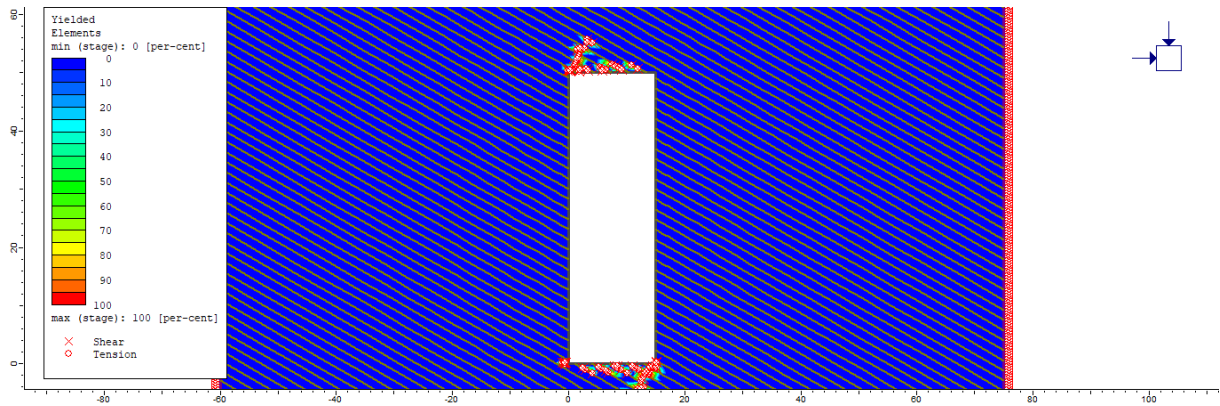
Στις συγκεκριμένες εξεταζόμενες περιπτώσεις ισχύουν ακριβώς οι ίδιες συνθήκες και δεδομένα εισόδου με εκείνα που εφαρμόστηκαν στον τρίτο κύκλο αναλύσεων με μία μοναδική διαφοροποίηση. Η διαφοροποίηση αυτή εντοπίζεται στις διαστάσεις του μετώπου εξόρυξης, όπου αυτές είναι αυξημένες. Η συνθήκη αυτή είναι ικανή σε συνάρτηση και με τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου που δίδονται να προκαλέσουν στις εξεταζόμενες επιφάνειες αυξημένα προβλήματα αστάθειας και σε ορισμένες περιπτώσεις σχετικά υψηλά ποσοστά υπέρθραυσης. Συνεπώς, για τις περιπτώσεις του τέταρτου κύκλου προσομοιώσεων αναμένονται εντονότερα προβλήματα μειωμένης ευστάθειας μετώπου και παράλληλα μεγαλύτερα ποσοστά υπέρθραυσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω των αναμενόμενων υψηλών ποσοστών πρόσμιξης παρατίθενται και ορισμένα επιπλέον εμπειρικά διαγράμματα που αφορούν την πιθανότητα να εμφανίσει κάποια επιφάνεια μία συγκεκριμένη κατάσταση ευστάθειας.

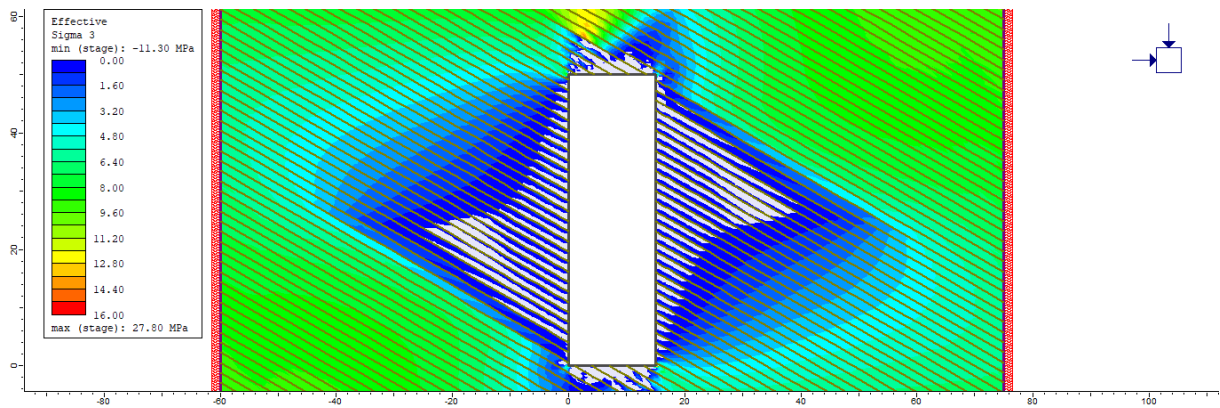
5.5.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.5.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.5.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.60: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.61: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.5.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.40: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
30 degrees	HW - LSW	50	1000	20	0	750	0,00	#10
	FW - RSW	50	1000	20	0		0,00	#10
	CR	15	1000	20	13,92		1,86	#10

5.5.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.5.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

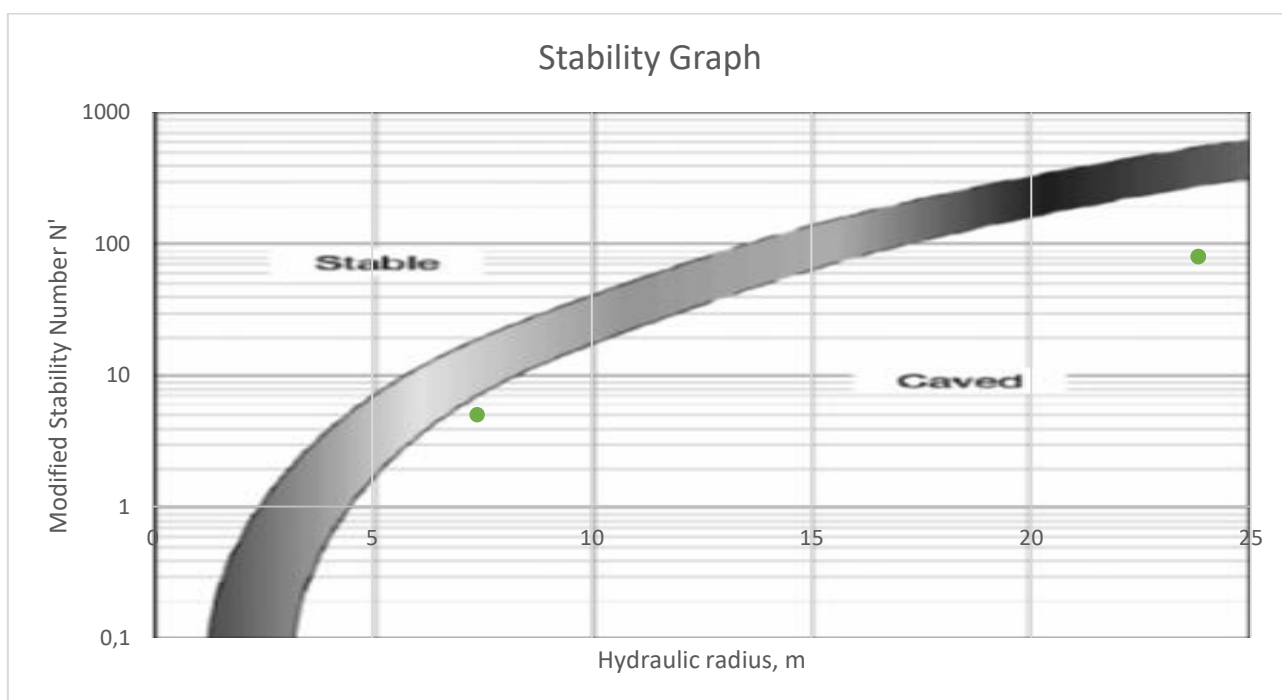
Πίνακας 5.41: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	30	12,5	30	1,61	1	0,2	2	5,00	7,39
L-SW	90	30	12,5	60	3,38	1	0,8	8	80,00	23,81
R-SW	90	30	12,5	60	3,37	1	0,8	8	80,00	23,81

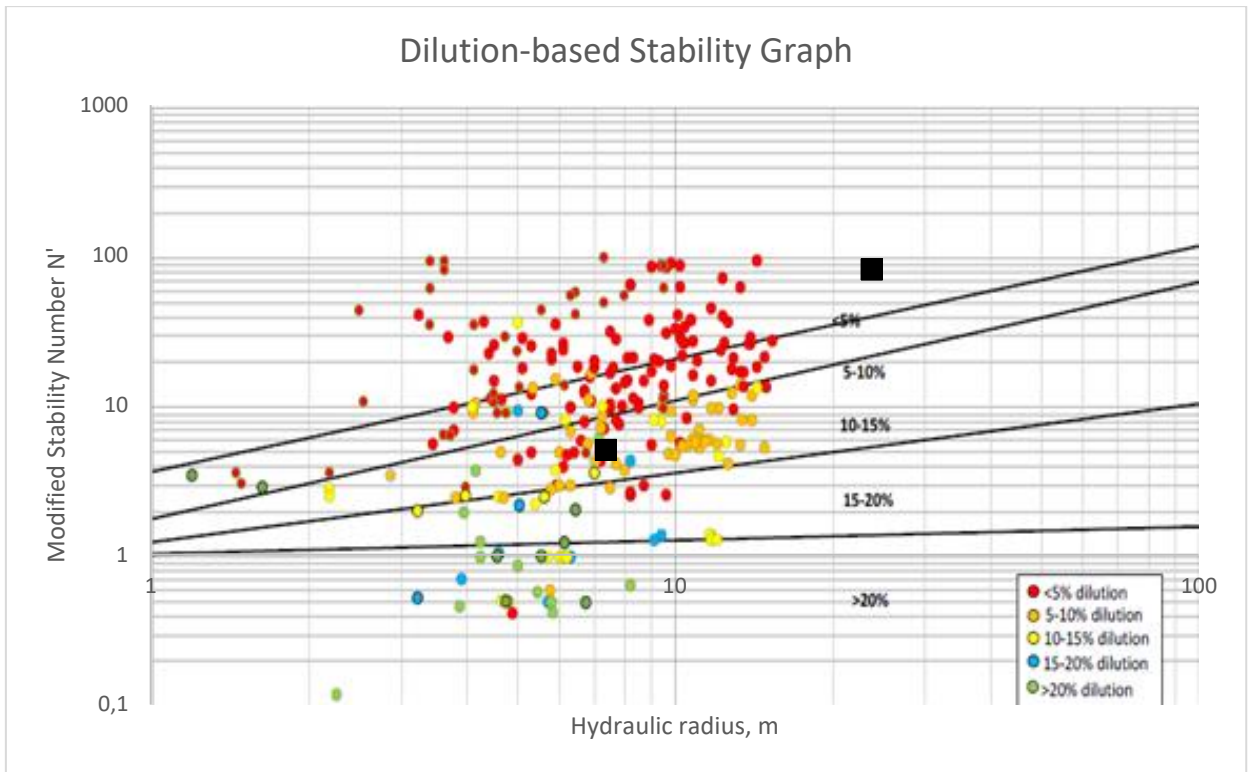
Πίνακας 5.42: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	1	0,34	1	4,25
L-SW	12,5	1	0,8	8	80
R-SW	12,5	1	0,8	8	80

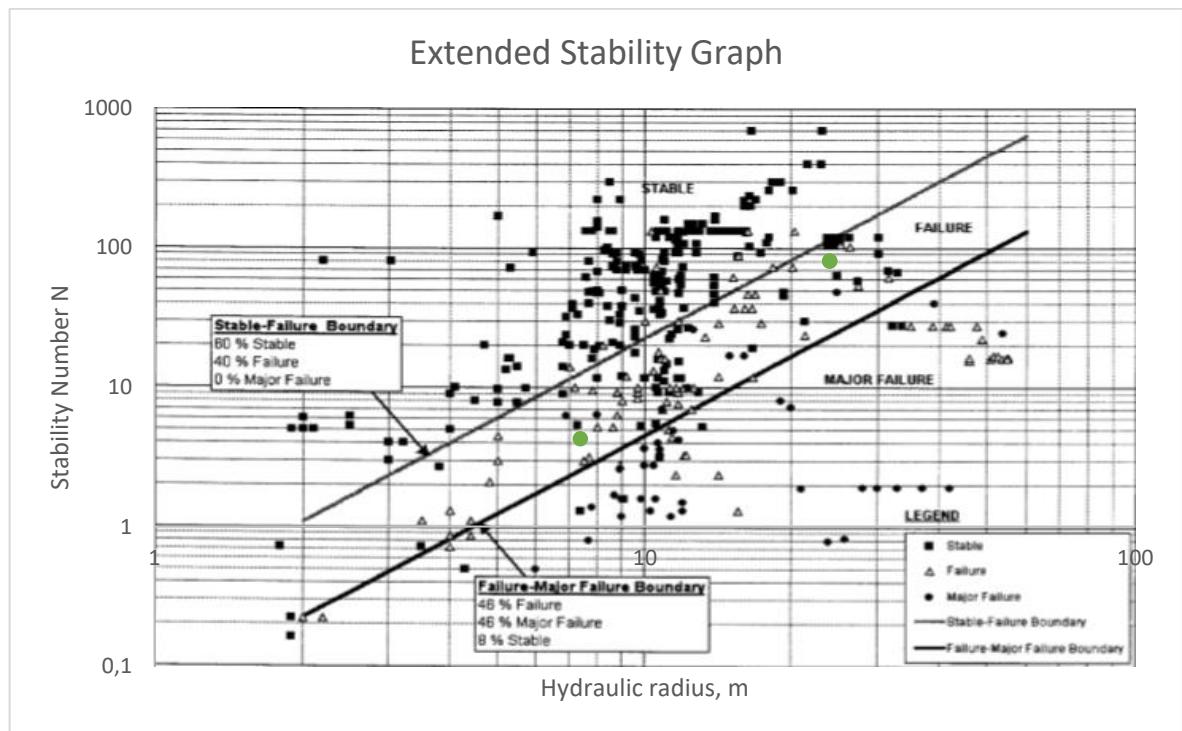
5.5.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.62: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.63: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.64: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.5.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

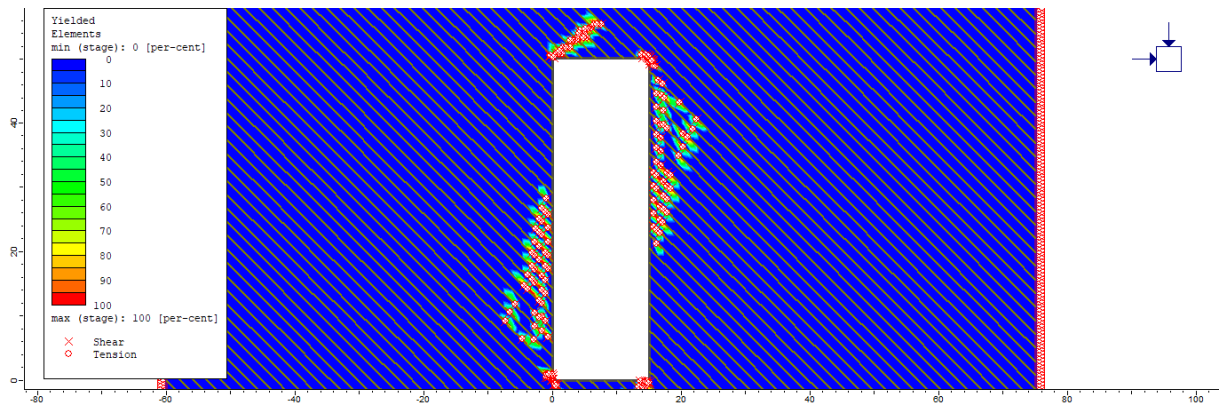
Πίνακας 5.43: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	4,25	5	7,39	10-15	15	61	24	Failure
HW	80	80	23,81	< 5	42	50	8	Failure
R-SW	80	80	23,81	< 5	42	50	8	Failure

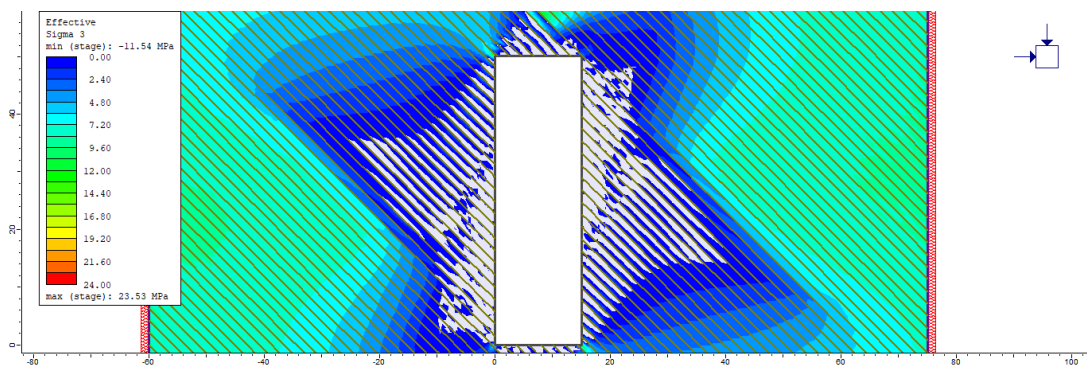
5.5.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.5.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.65: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.66: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.5.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.44: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

45 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	50	1000	20	60,21	750	8,03	#11
	FW - RSW	50	1000	20	30,64		4,09	#11
	CR	15	1000	20	24,84		3,31	#11

5.5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.5.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

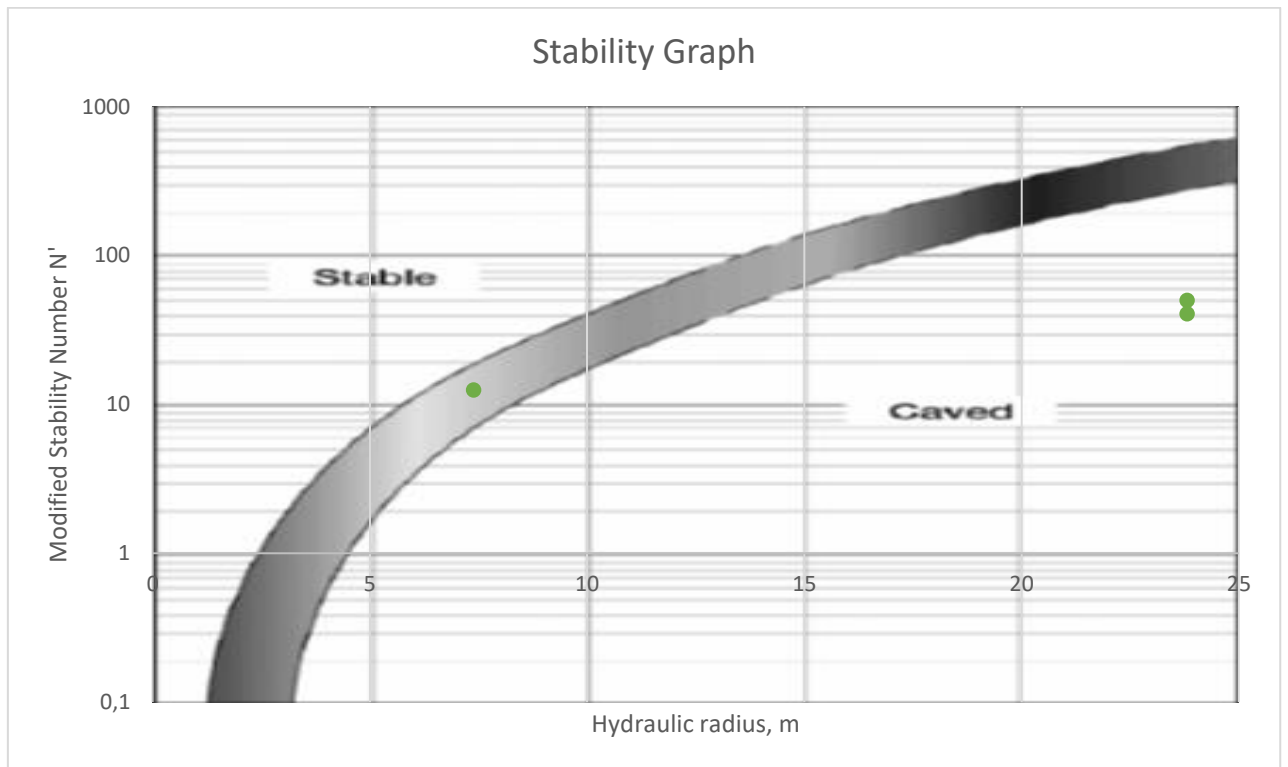
Πίνακας 5.45: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	45	12,5	45	0,89	1	0,5	2	12,50	7,39
L-SW	90	45	12,5	45	0,08	1	0,5	6,5	40,63	23,81
R-SW	90	45	12,5	45	0,75	1	0,5	8	50,00	23,81

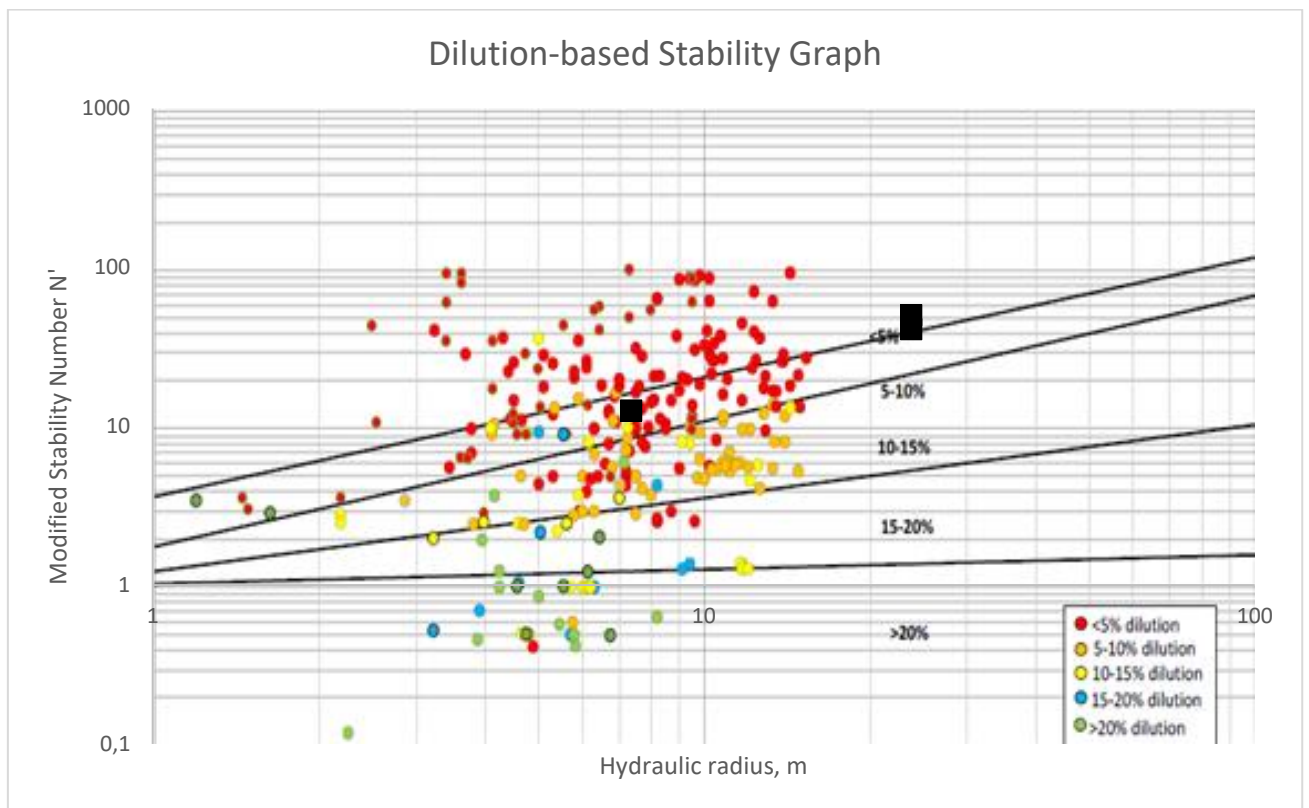
Πίνακας 5.46: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	1	0,4	1	5
L-SW	12,5	1	0,4	8	40
R-SW	12,5	1	0,4	8	40

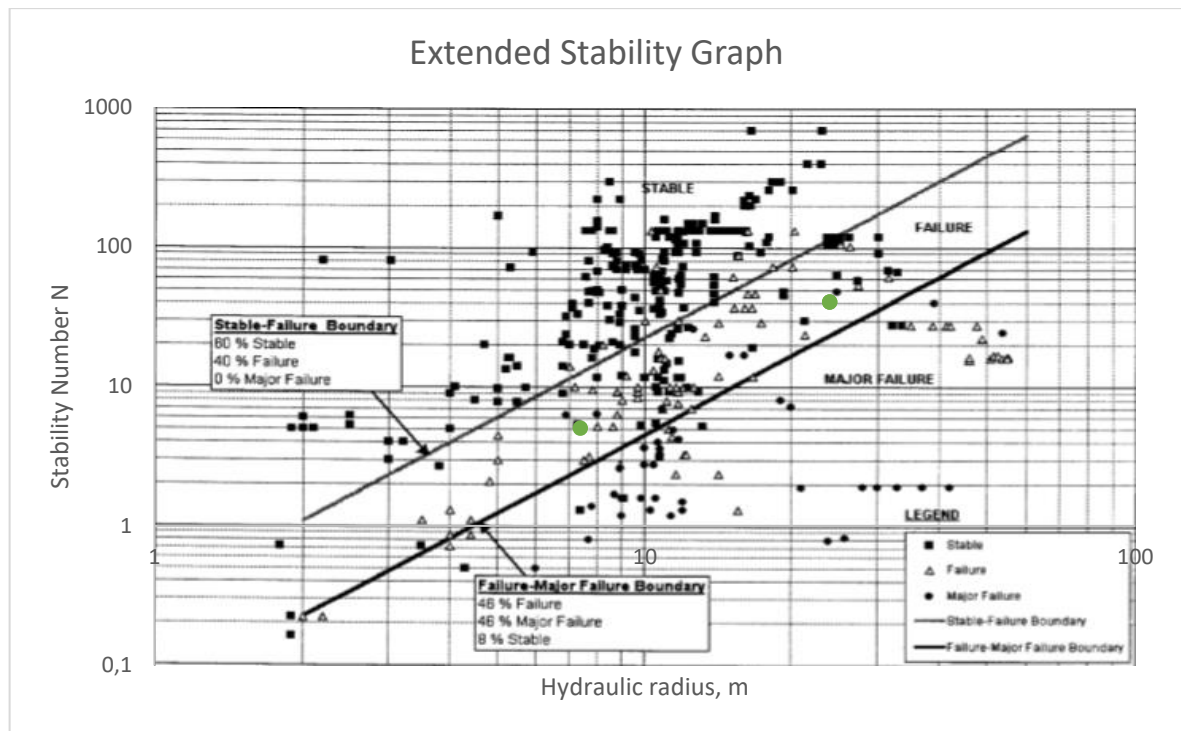
5.5.3.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.67: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.68: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.69: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.5.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

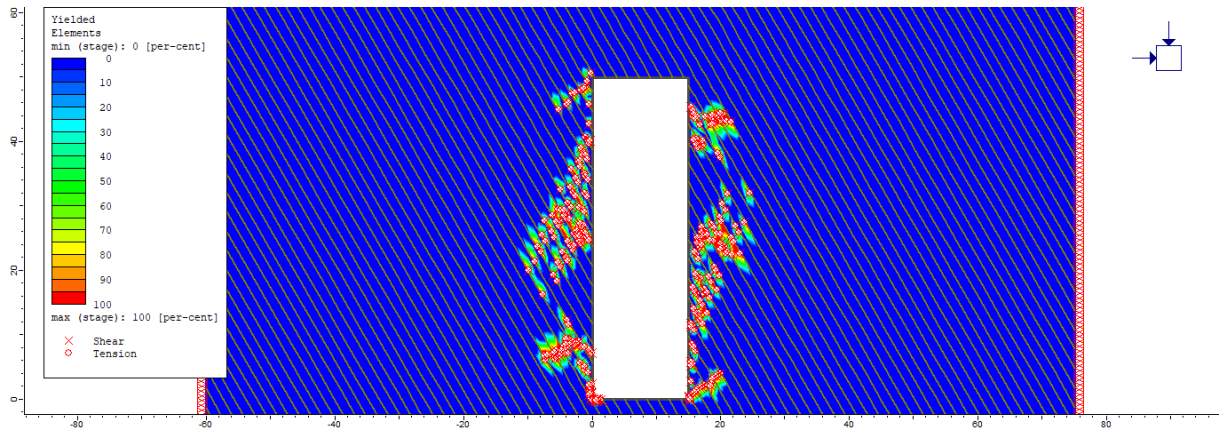
Πίνακας 5.47: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	5	12,5	7,39	5-10	17	63	20	Failure
HW	40	40,625	23,81	5-10	17	62	21	Failure
R-SW	40	50	23,81	< 5	17	62	21	Failure

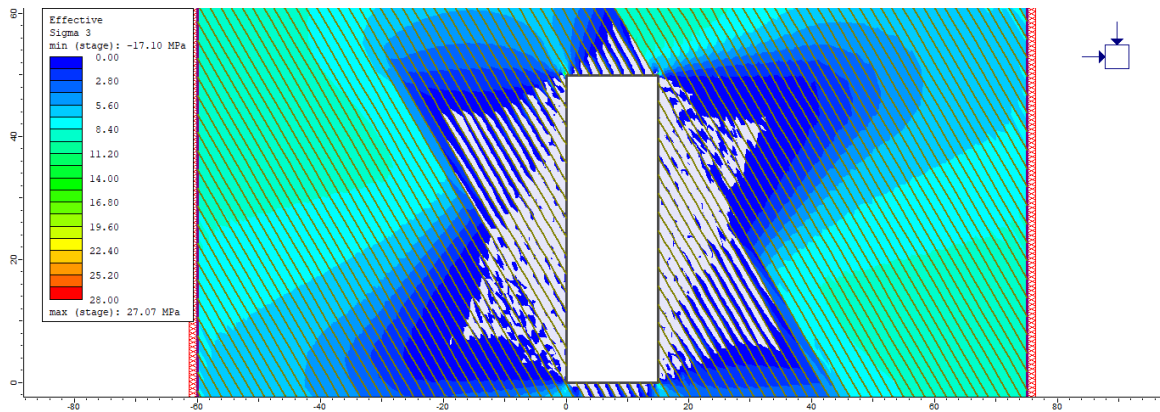
5.5.4 Κατηγορία 3^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.5.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.5.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.70: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.71: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.5.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.48: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθρασης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
60 degrees	HW - LSW	50	1000	20	100,96	750	13,46	#12
	FW - RSW	50	1000	20	101,74		13,57	#12
	CR	15	1000	20	0		0,00	#12

5.5.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.5.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

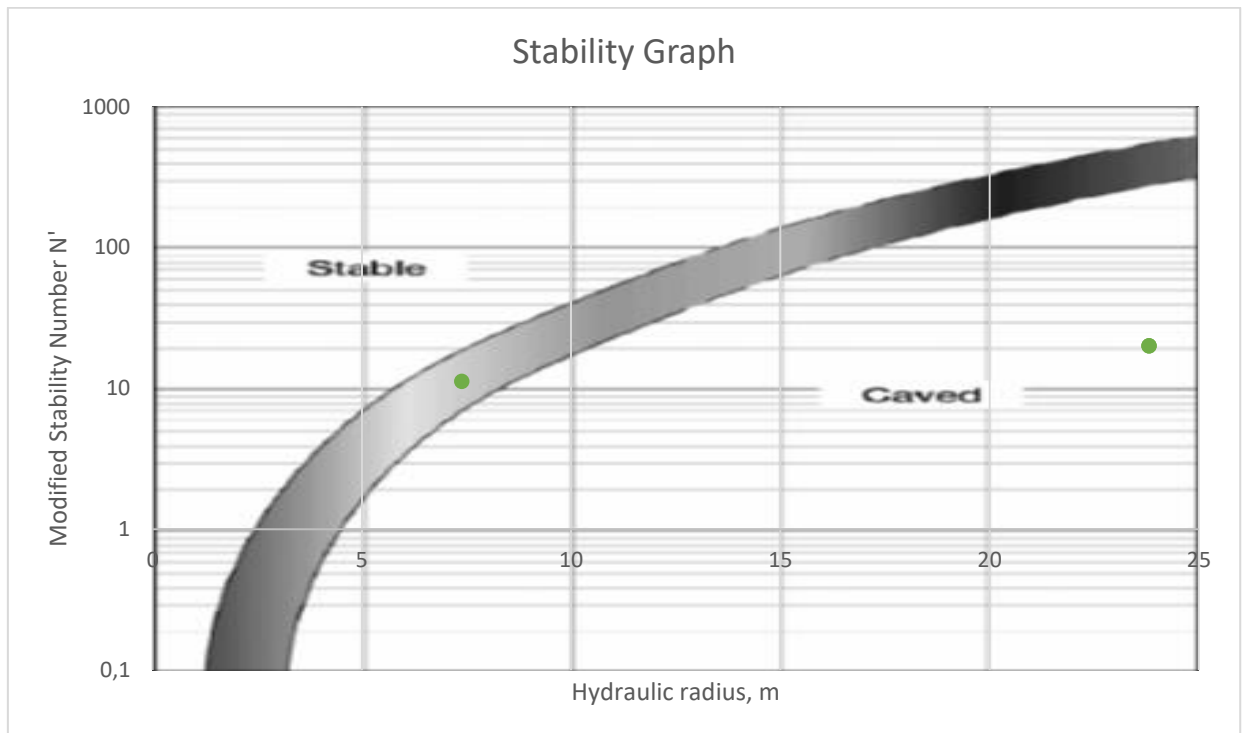
Πίνακας 5.49: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	60	12,5	60	10,65	0,56	0,8	2	11,20	7,39
L-SW	90	60	12,5	30	1,76	1	0,2	8	20,00	23,81
R-SW	90	60	12,5	30	0,4	1	0,2	8	20,00	23,81

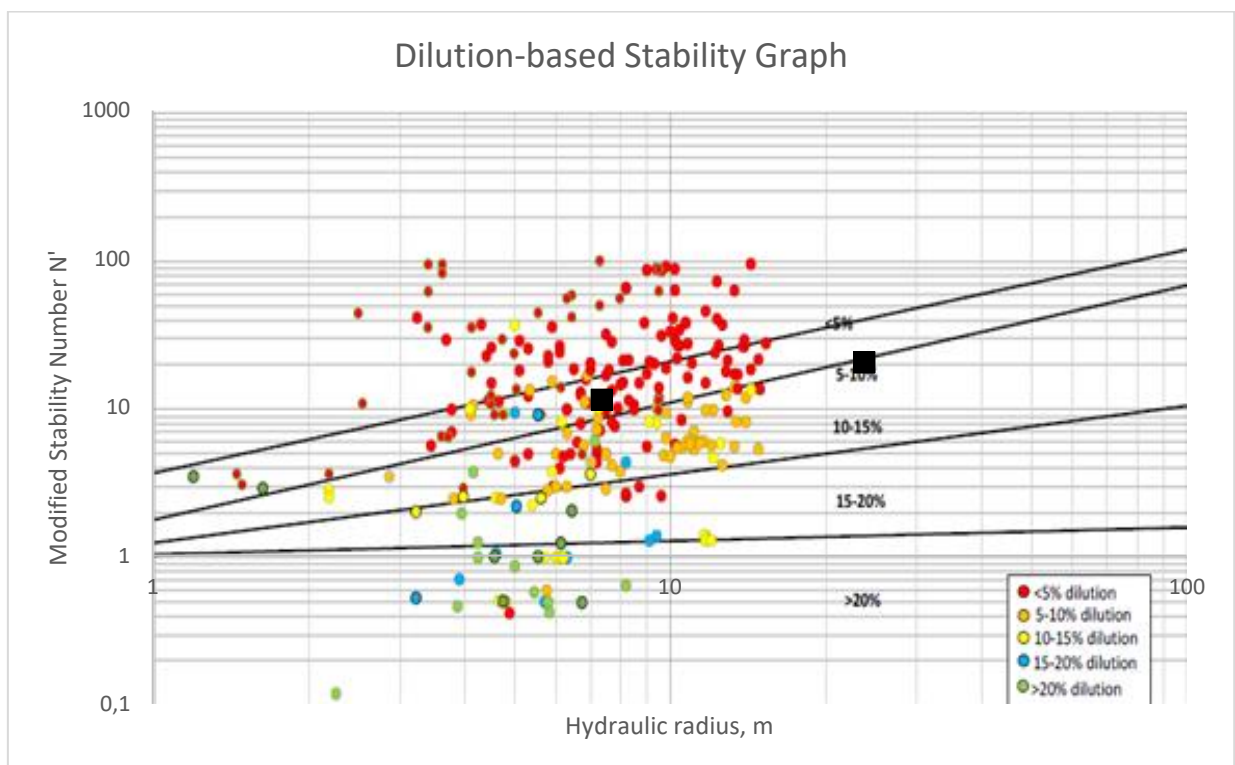
Πίνακας 5.50: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	12,5	0,58	0,8	1	5,8
L-SW	12,5	1	0,34	8	34
R-SW	12,5	1	0,34	8	34

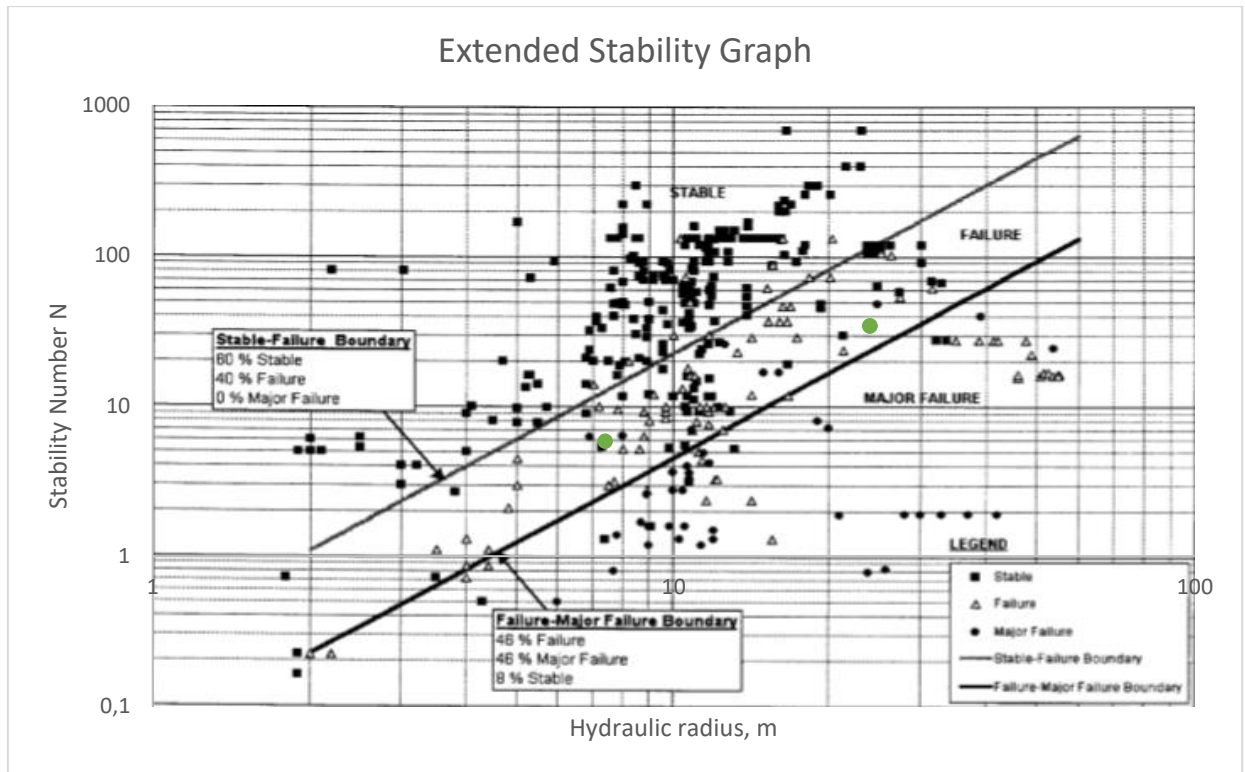
5.5.4.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.72: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.73: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.74: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.5.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.51: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	5,8	11,2	7,39	5-10	19	63	18	Failure
HW	34	20	23,81	10-15	13	60	27	Failure
R-SW	34	20	23,81	10-15	13	60	27	Failure

5.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 5^{ου} κύκλου αναλύσεων

5.6.1 Εισαγωγή

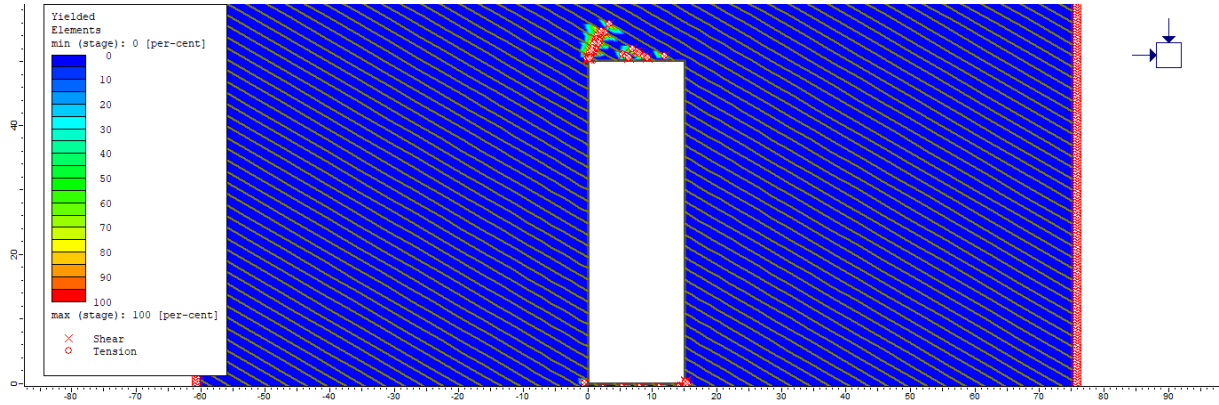
Στον κύκλο αυτό χρησιμοποιείται η ίδια επαυξημένη γεωμετρία μετώπου εξόρυξης, ενώ ακόμη πραγματοποιείται αλλαγή στο υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, με ταυτόχρονη μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Κατ' αυτό το τρόπο τα ποσοστά υπέρθραυσης που αναμένονται

σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αρκετά υψηλότερα ακόμη και από τις μελέτες του 4^{ου} κύκλου προσομοιώσεων.

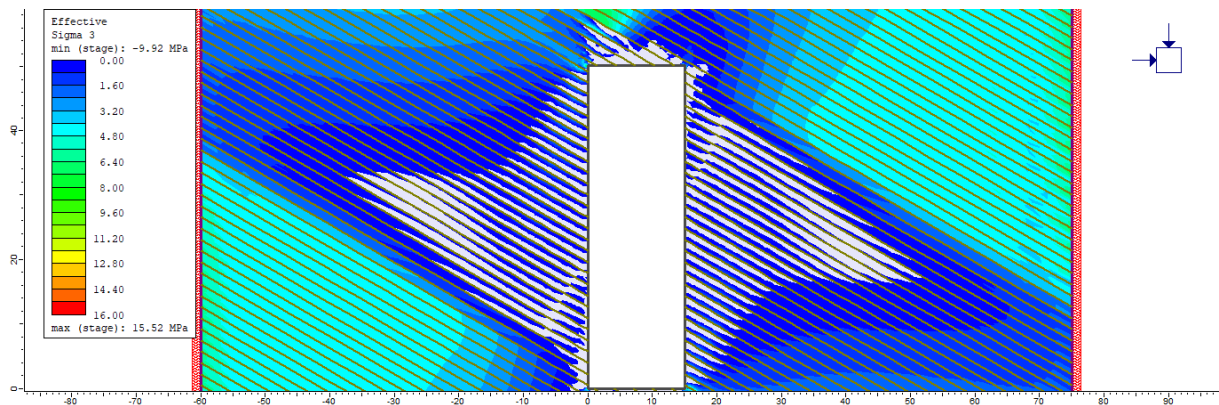
5.6.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.6.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.6.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.75: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.76: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.6.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.52: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
30 degrees	HW - LSW	50	1000	20	0	750	0,00	#13
	FW - RSW	50	1000	20	0		0,00	#13
	CR	15	1000	20	16,21		2,16	#13

5.6.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.6.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

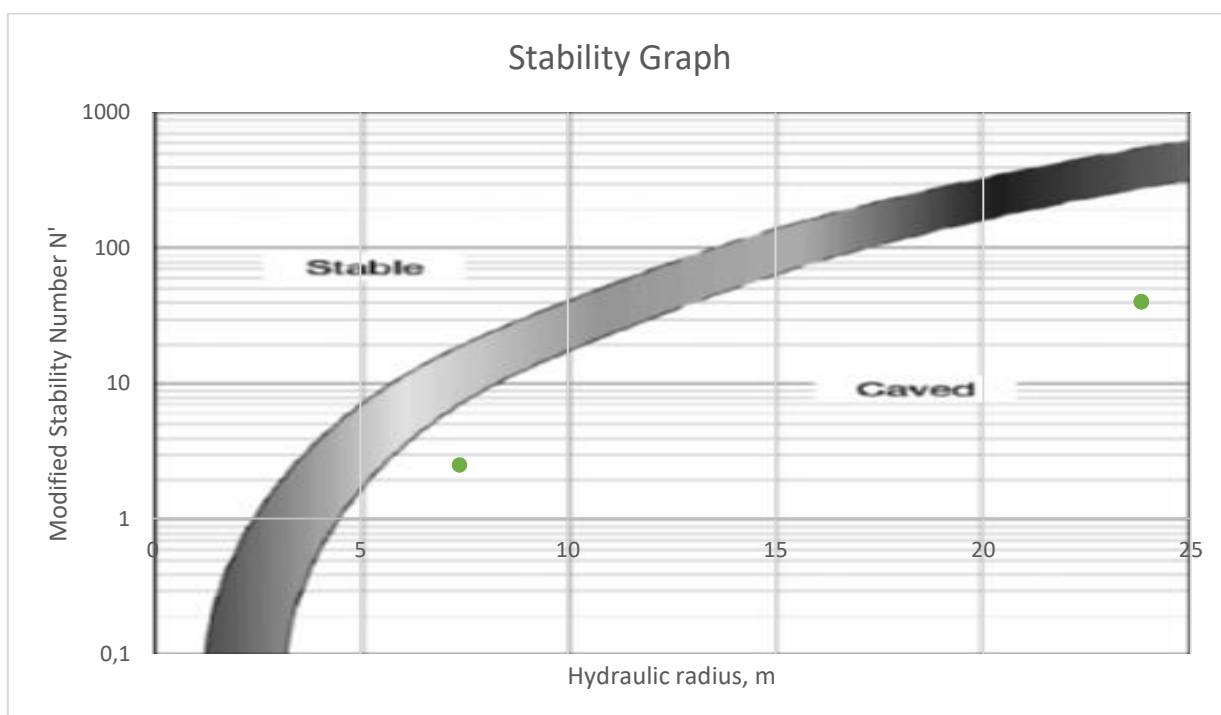
Πίνακας 5.53: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	30	6,25	30	1,44	1	0,2	2	2,50	7,39
L-SW	90	30	6,25	60	0,64	1	0,8	8	40,00	23,81
R-SW	90	30	6,25	60	0,63	1	0,8	8	40,00	23,81

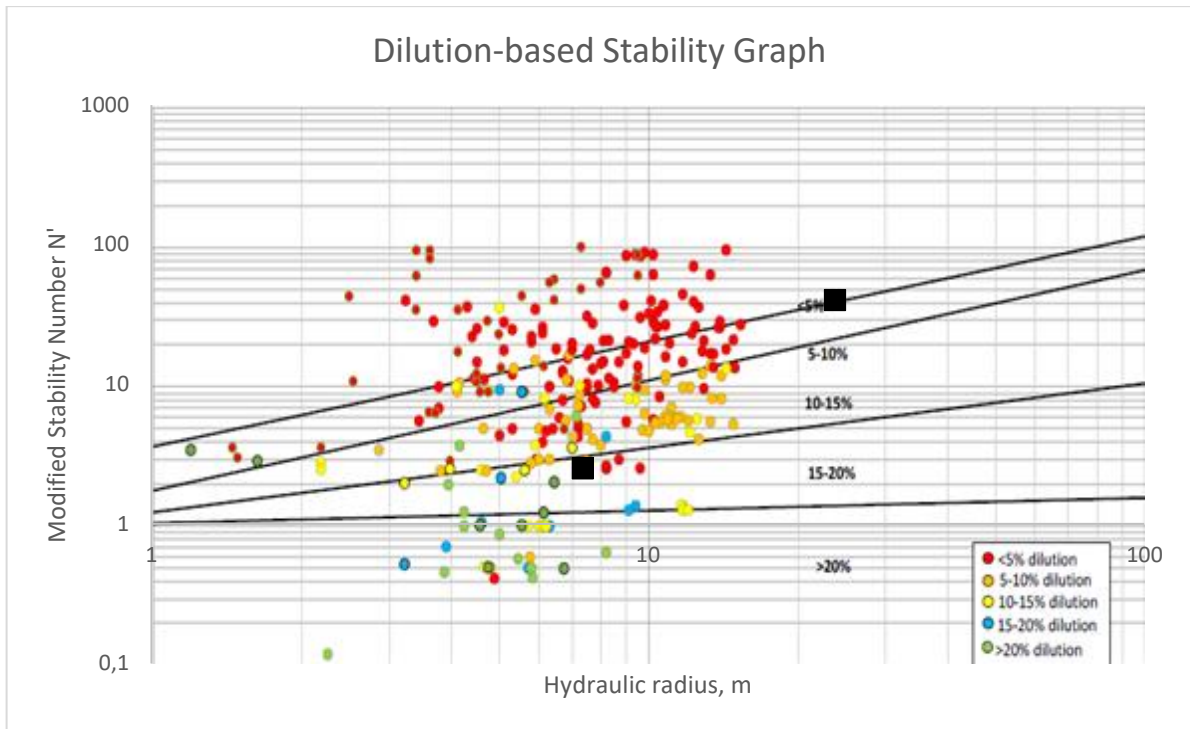
Πίνακας 5.54: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	6,5	1	0,34	1	2,125
L-SW	6,5	1	0,8	8	40
R-SW	6,5	1	0,8	8	40

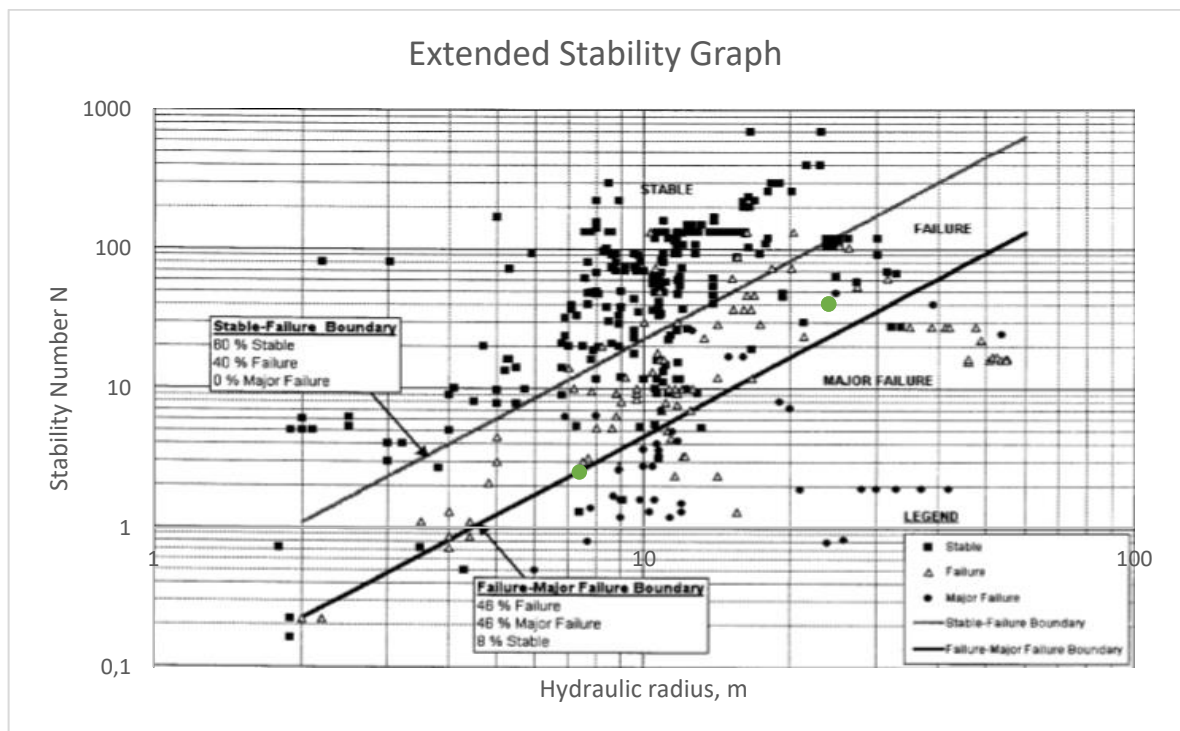
5.6.2.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.77: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.78: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.79: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.6.2.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

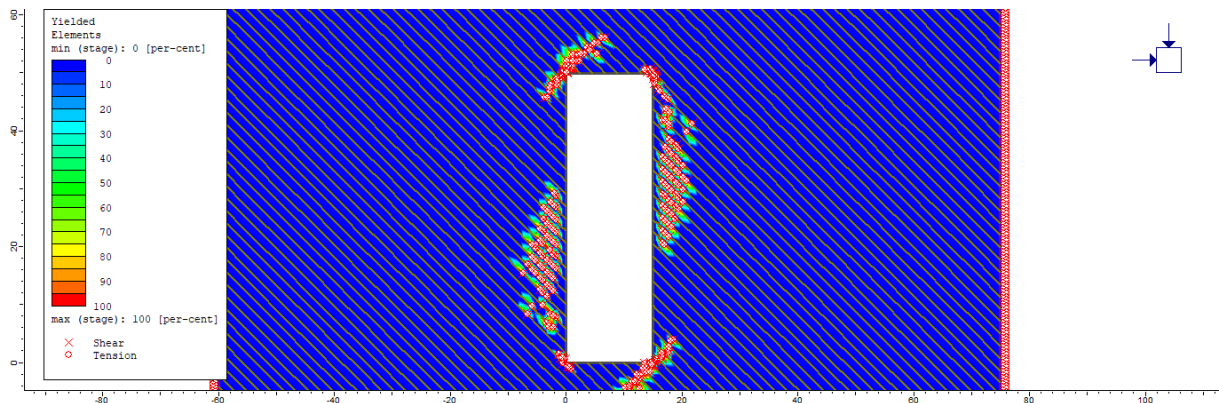
Πίνακας 5.55: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	2,125	2,5	7,39	15-20	7,5	45	47,5	Failure (οριακά)
HW	40	40	23,81	< 5	16	62	22	Failure
R-SW	40	40	23,81	< 5	16	62	22	Failure

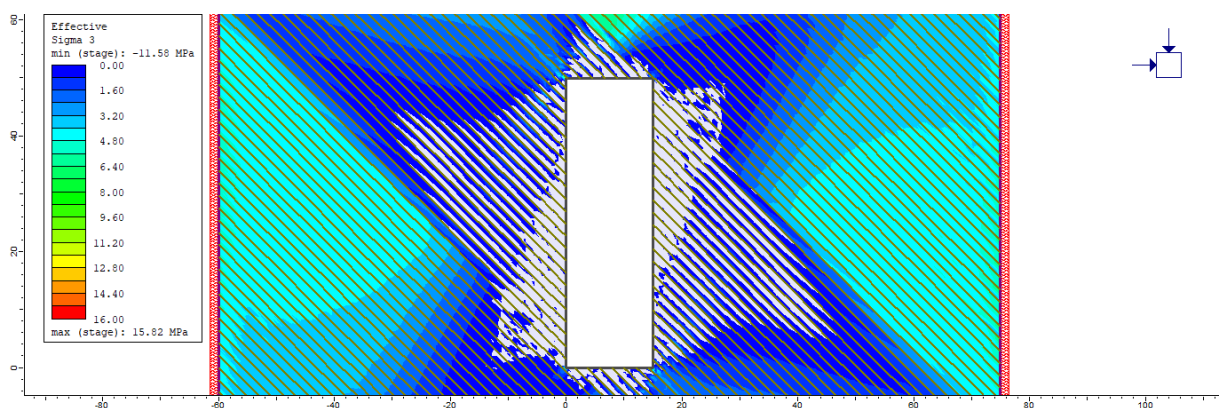
5.6.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.6.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.6.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.80: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.81: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.6.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.56: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

45 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	50	1000	20	113,2	750	15,09	#14
	FW - RSW	50	1000	20	67,08		8,94	#14
	CR	15	1000	20	28,79		3,84	#14

5.6.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.6.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

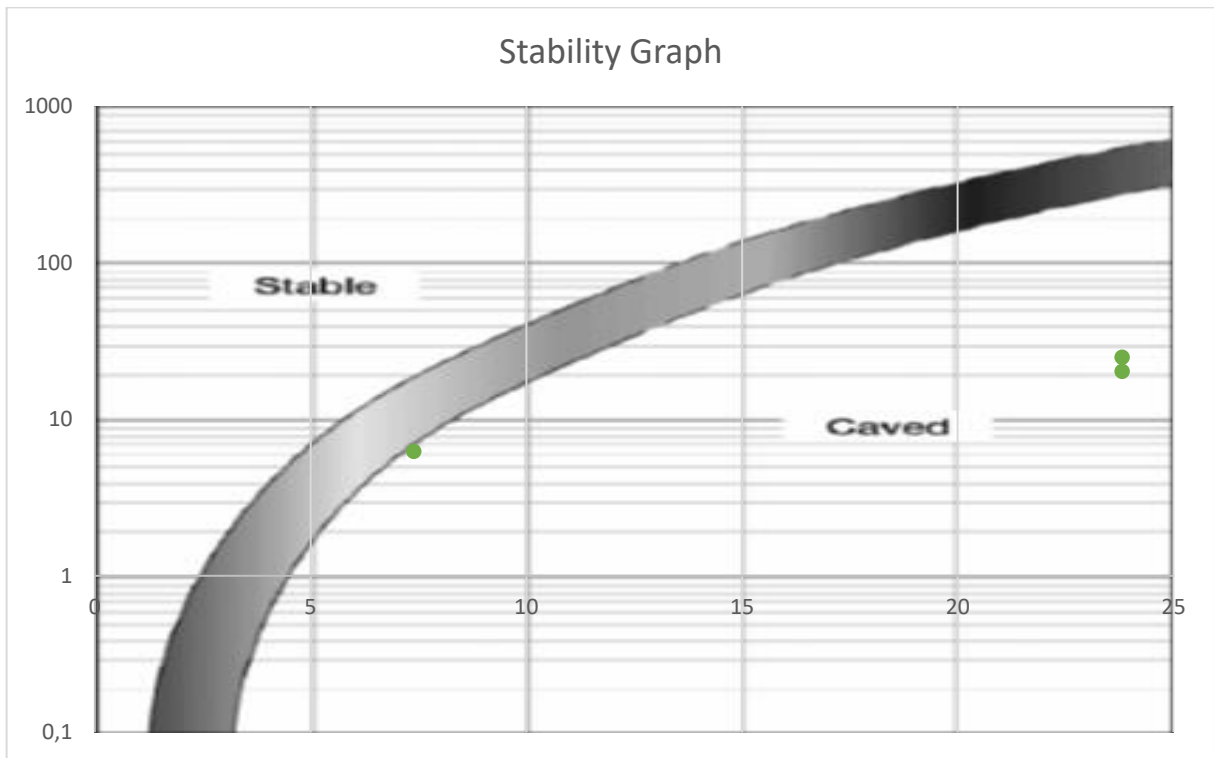
Πίνακας 5.57: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών - Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. ακτίνα (m)
Crown	0	45	6,25	45	0,55	1	0,5	2	6,25	7,39
L-SW	90	45	6,25	45	0,03	1	0,5	6,5	20,31	23,81
R-SW	90	45	6,25	45	0,1	1	0,5	8	25,00	23,81

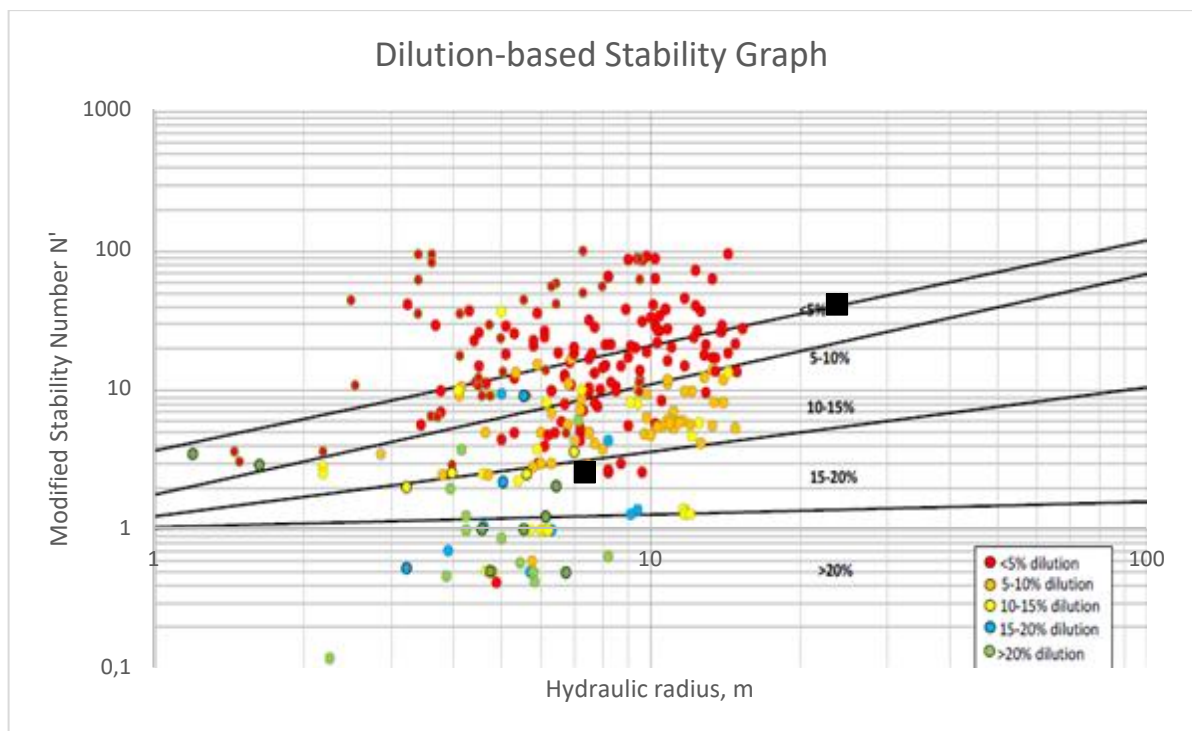
Πίνακας 5.58: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	6,5	1	0,4	1	2,5
L-SW	6,5	1	0,4	8	20
R-SW	6,5	1	0,4	8	20

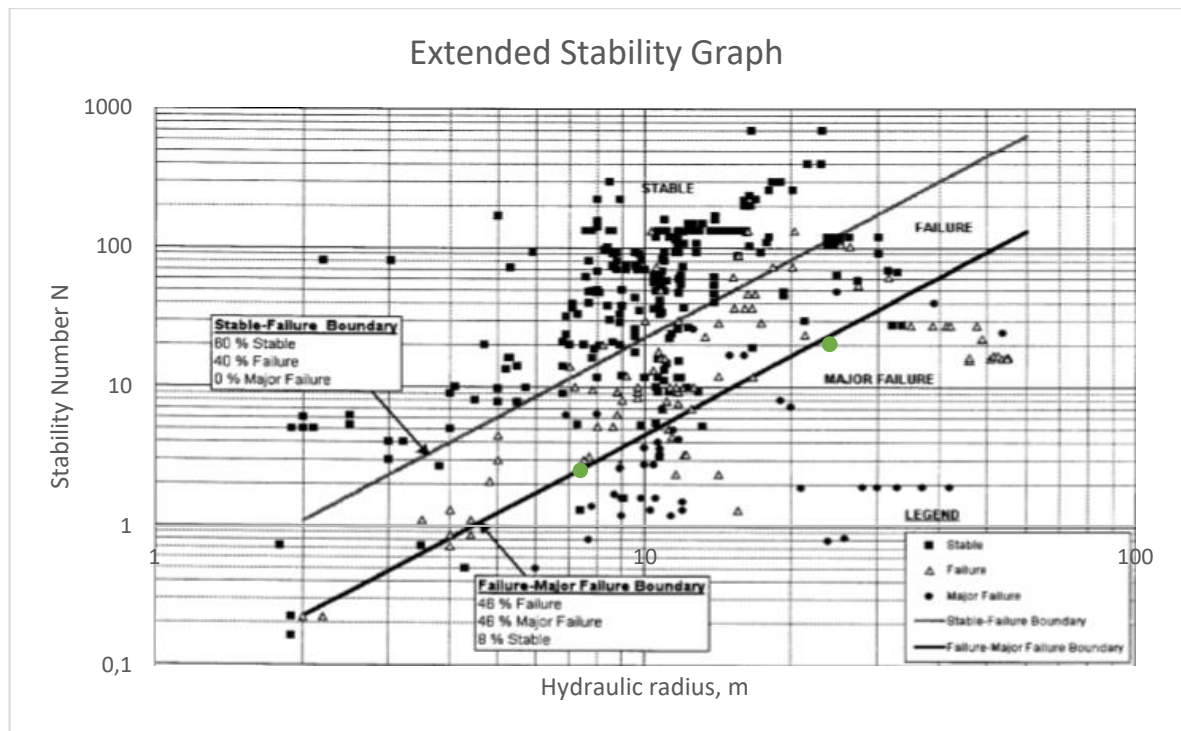
5.6.3.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.82: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.83: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Παπαϊοανου και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.84: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.6.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

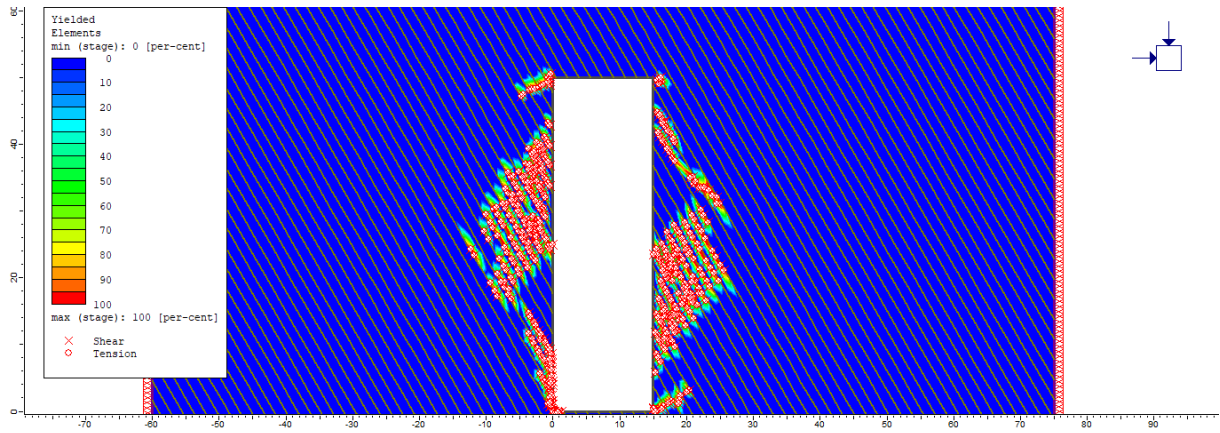
Πίνακας 5.59: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	2,5	6,25	7,39	15-20	8	45	47	Failure (οριακά)
HW	20	20,31	23,81	5-10	7	40	53	Major Failure
R-SW	20	25	23,81	5-10	7	40	53	Major Failure

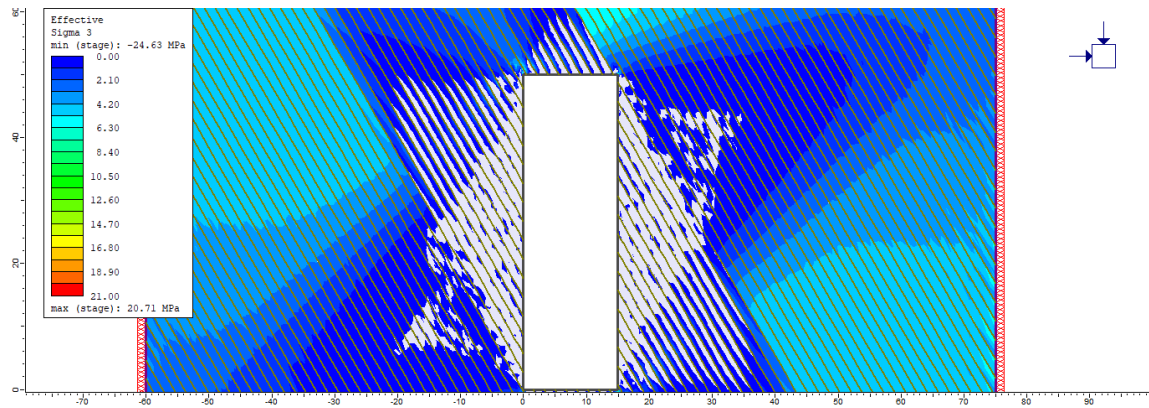
5.6.4 Κατηγορία 3^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.6.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.6.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.85: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.86: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.6.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.60: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθρασης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
60 degrees	HW - LSW	50	1000	20	164,48	750	21,93	#15
	FW - RSW	50	1000	20	142,71		19,03	#15
	CR	15	1000	20	0		0,00	#15

5.6.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.6.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Πίνακας 5.61: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών – Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. Ακτίνα (m)
Crown	0	60	6,25	60	4,35	1	0,8	2	10,00	7,39
L-SW	90	60	6,25	30	2,89	1	0,2	8	10,00	23,81
R-SW	90	60	6,25	30	1,15	1	0,2	8	10,00	23,81

Πίνακας 5.62: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

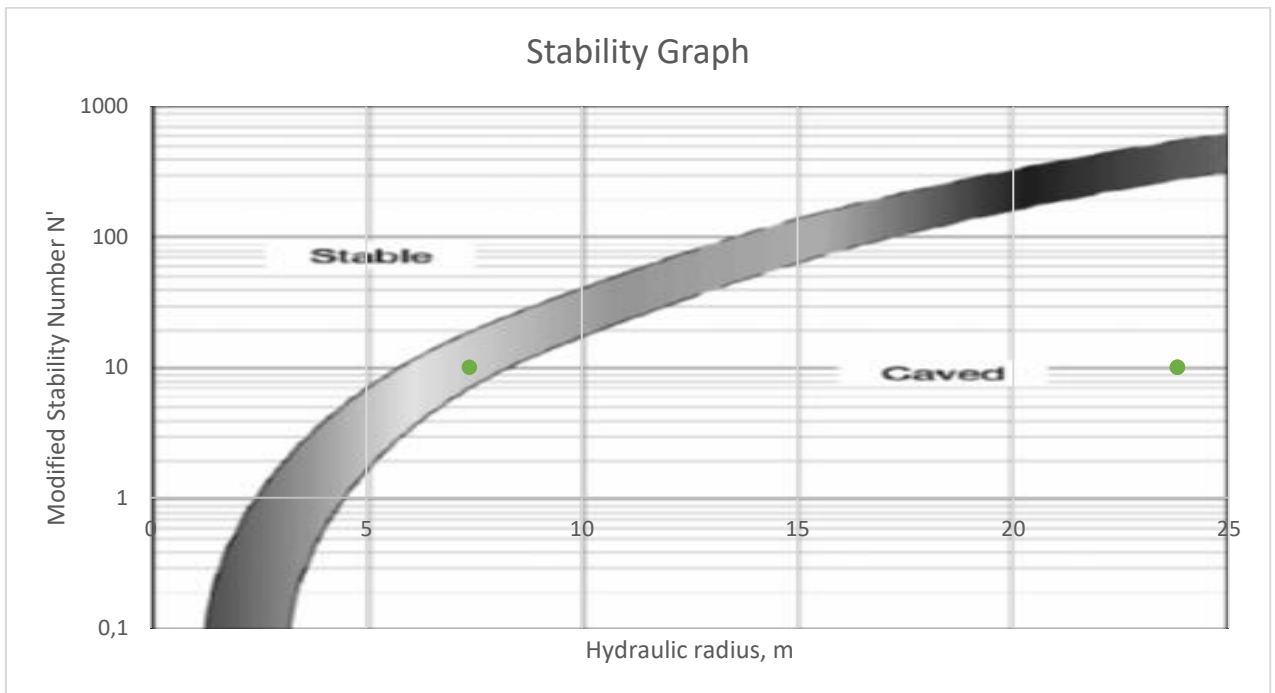
Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	6,5	1	0,8	1	5
L-SW	6,5	1	0,34	8	17
R-SW	6,5	1	0,34	8	17

5.6.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας

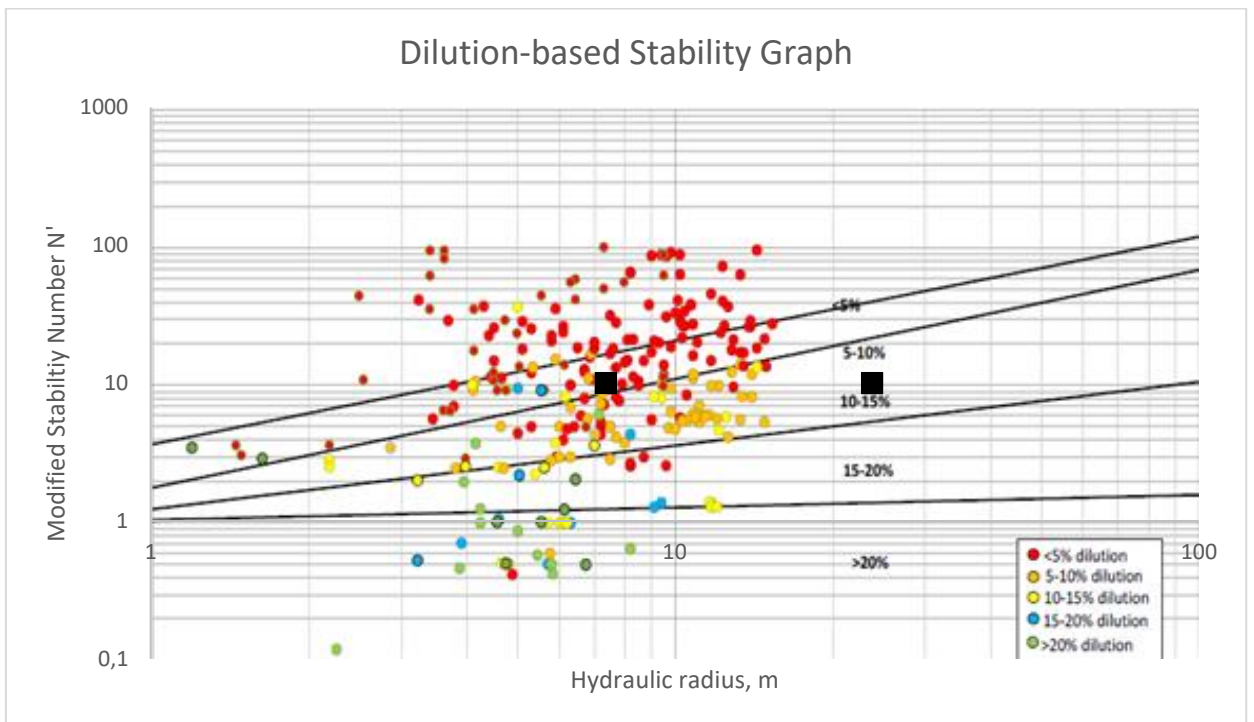
5.6.4.2.2.1 Εισαγωγή

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω των εκτεταμένων προβλημάτων αστοχίας που εντοπίζονται είναι ενδιαφέρον να παρουσιαστούν όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα που απορρέουν από την ανάλυση της μελέτης.

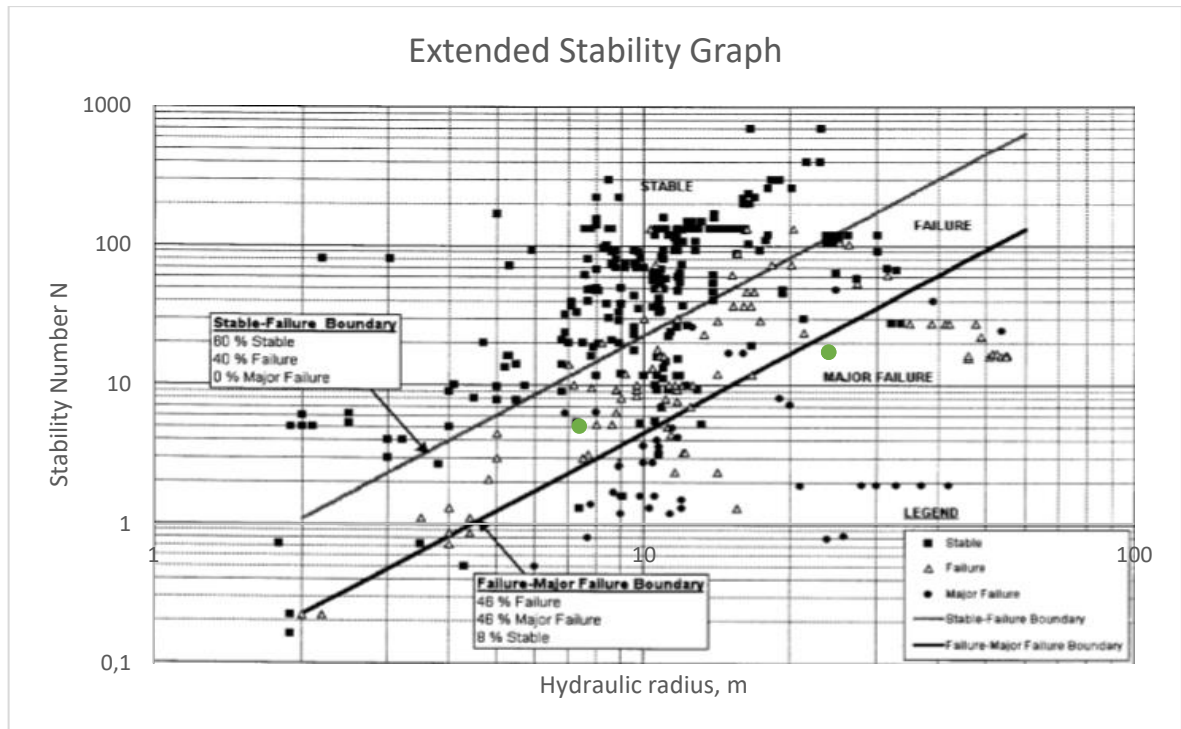
5.6.4.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



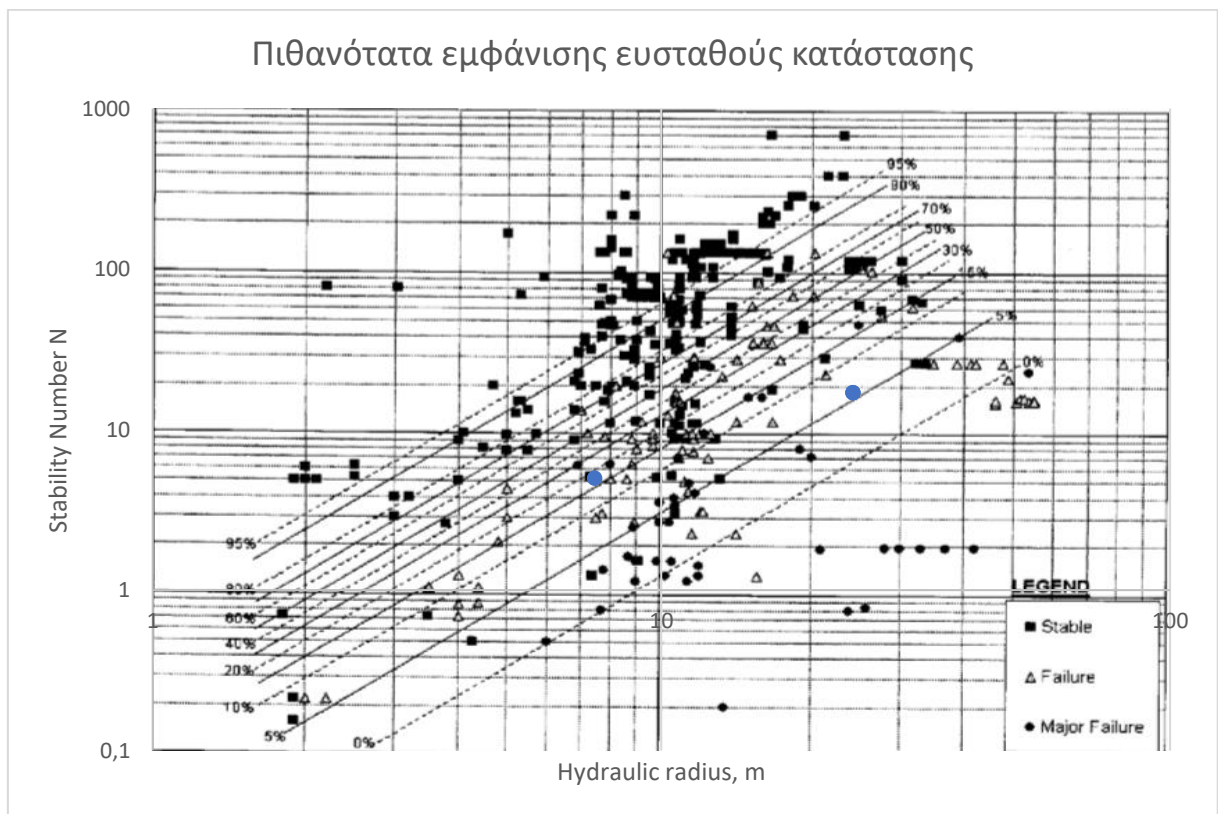
Εικόνα 5.87: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



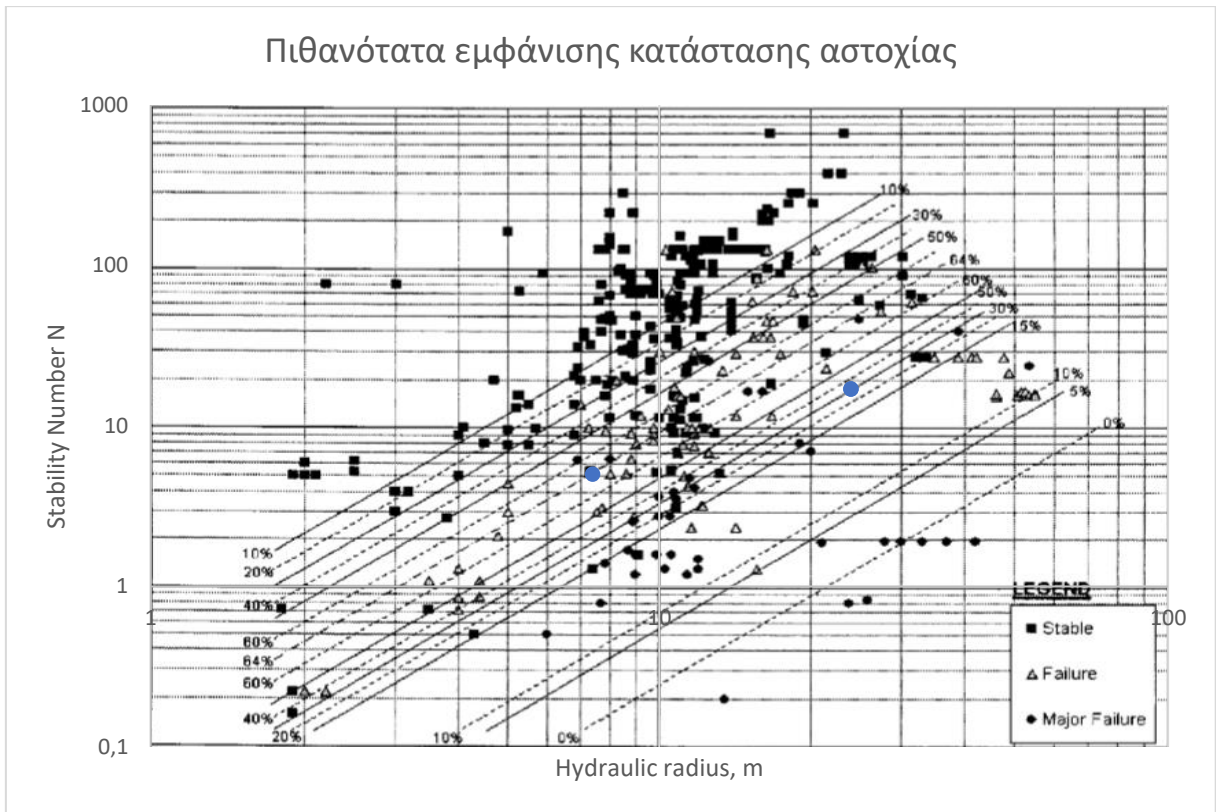
Εικόνα 5.88: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



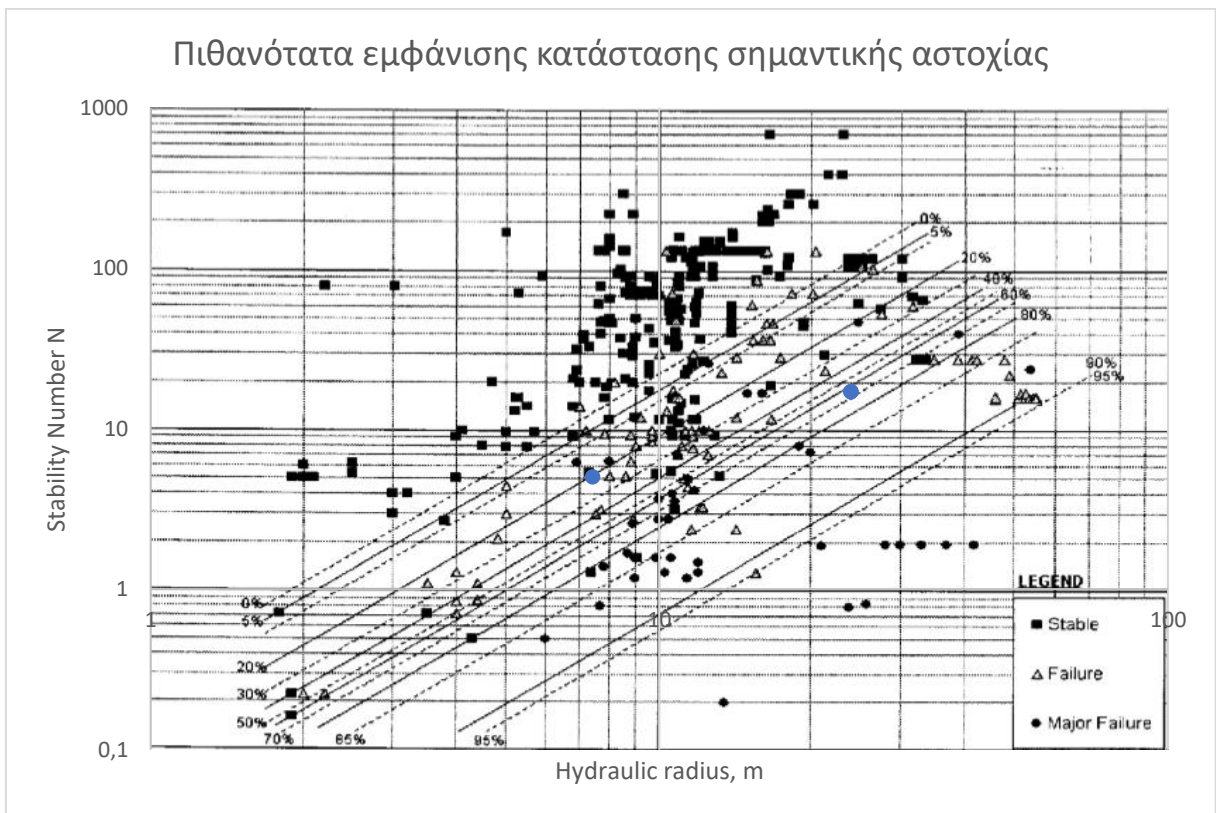
Εικόνα 5.89: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)



Εικόνα 5.90: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης



Εικόνα 5.91: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης αστοχίας



Εικόνα 5.92: Διάγραμμα ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης κατάστασης εκτεταμένης αστοχίας

5.6.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.63: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	5	10	7,39	5-10	17	63	20	Failure
HW	17	10	23,81	10-15	6	30	64	Major Failure
R-SW	17	10	23,81	10-15	6	30	64	Major Failure

5.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 6^{ου} κύκλου αναλύσεων

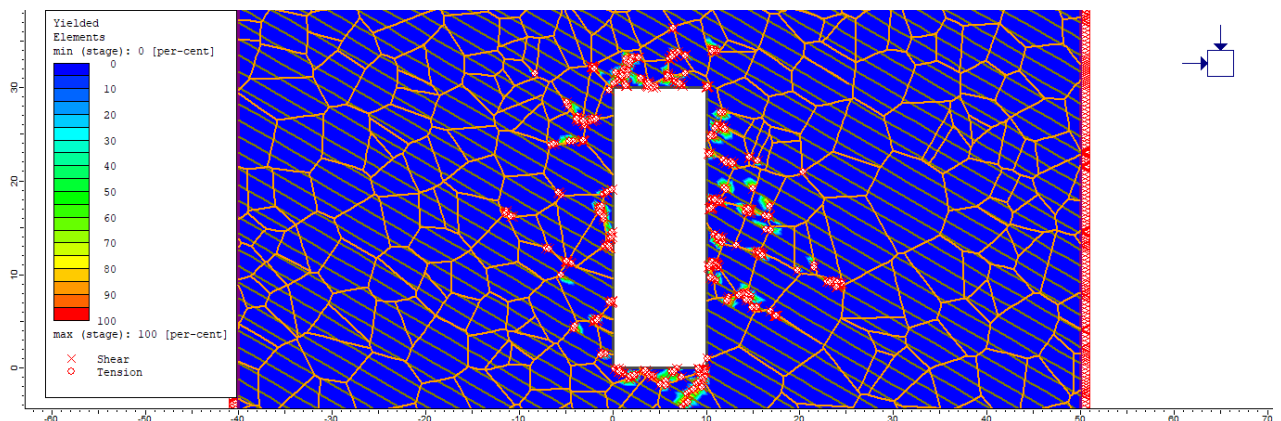
5.7.1 Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη κατηγορία αναλύσεων είναι αρκετά ιδιαίτερη. Στα μοντέλα που ανήκουν σε αυτήν περιλαμβάνονται τα δεδομένα που συναντώνται στον τρίτο κύκλο αναλύσεων με μία πολύ σημαντική διαφοροποίηση. Αυτή η διαφοροποίηση εντοπίζεται στον αριθμό των οικογενειών ασυνεχειών, όπου περιλαμβάνεται πέραν της μίας βασικής – κύριας οικογένειας και ορισμένες μικρότερες τυχαίου προσανατολισμού διακλάσεις. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία σημαντικής ανομοιομορφίας στην μάζα του περιβάλλοντος σχηματισμού γύρω από την εκσκαφή, η οποία επηρεάζει όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια σε πολύ μεγάλο βαθμό την κατάσταση σταθερότητας των εξεταζόμενων επιφανειών.

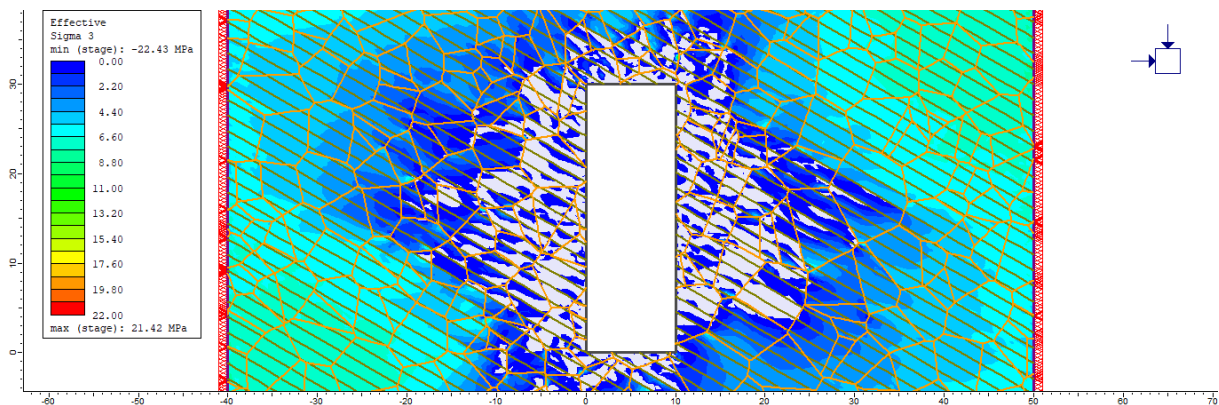
5.7.2 Κατηγορία 1^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 30°

5.7.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.7.2.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.93: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.94: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.7.2.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.64: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

30 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	3,99	300	1,33	#16
	FW - RSW	30	1000	20	8,17		2,72	#16
	CR	20	1000	10	7,04		2,35	#16

5.7.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

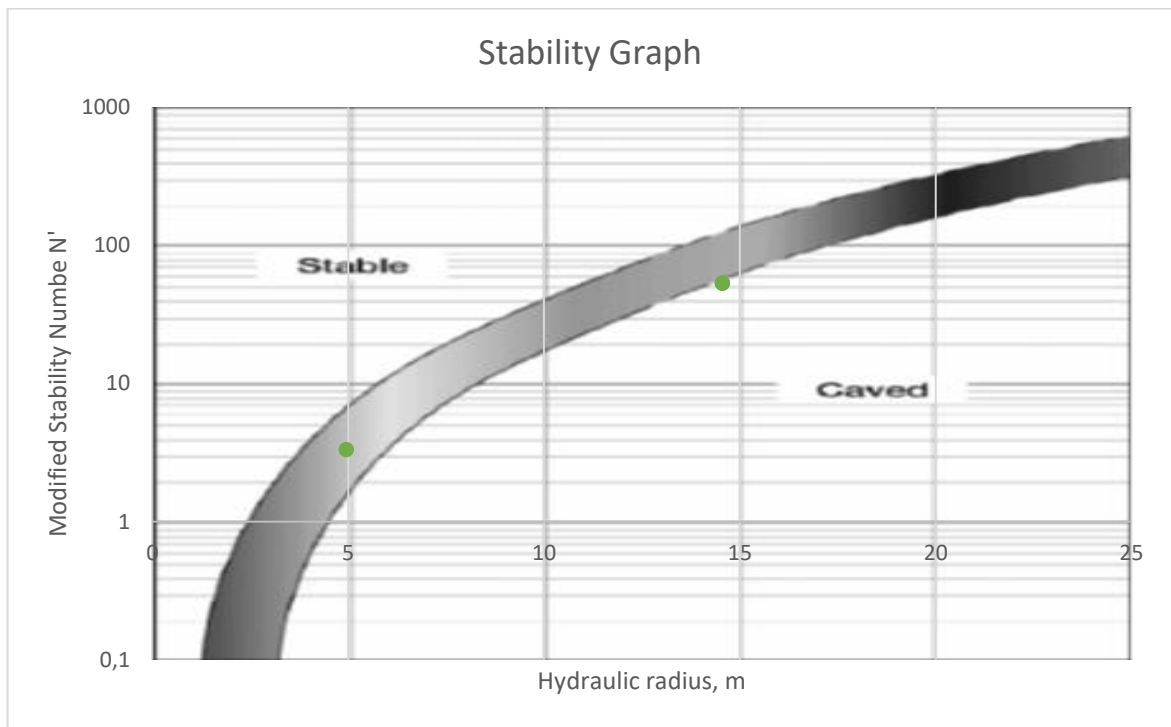
5.7.2.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Πίνακας 5.65: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών – Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

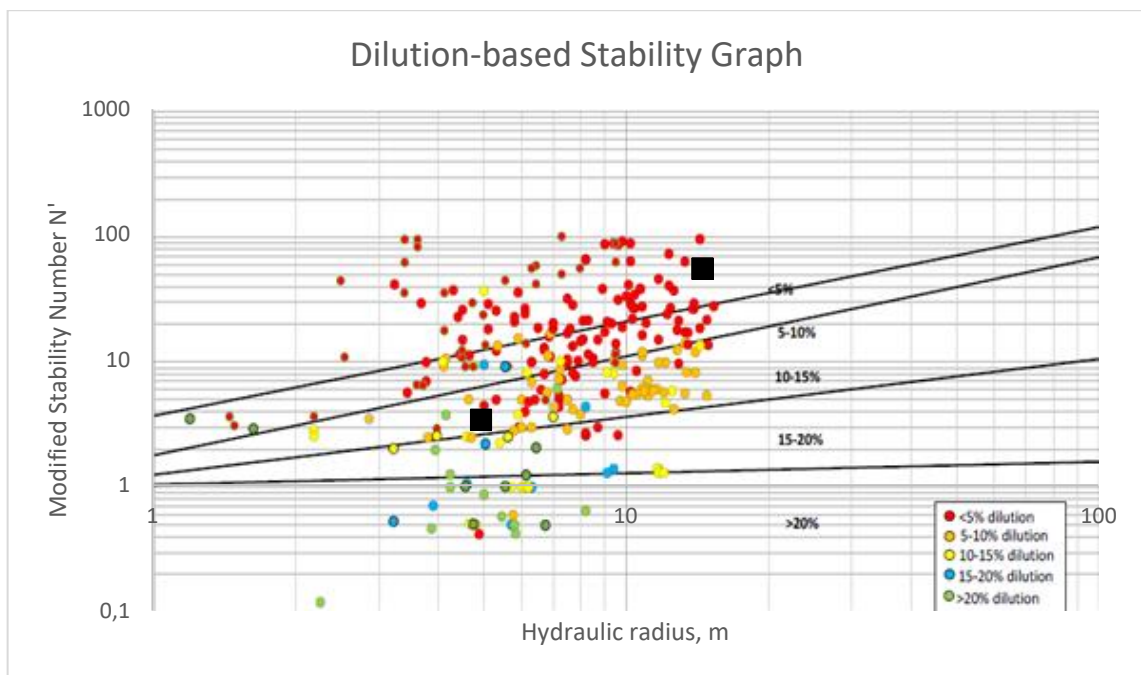
Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. Ακτίνα (m)
Crown	0	30	8,33	30	0,02	1	0,2	2	3,33	4,95
L-SW	90	30	8,33	60	0,45	1	0,8	8	53,31	14,56
R-SW	90	30	8,33	60	0,7	1	0,8	8	53,31	14,56

Πίνακας 5.66: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews					
Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	8,33	1	0,34	1	2,83
L-SW	8,33	1	0,8	8	53,31
R-SW	8,33	1	0,8	8	53,31

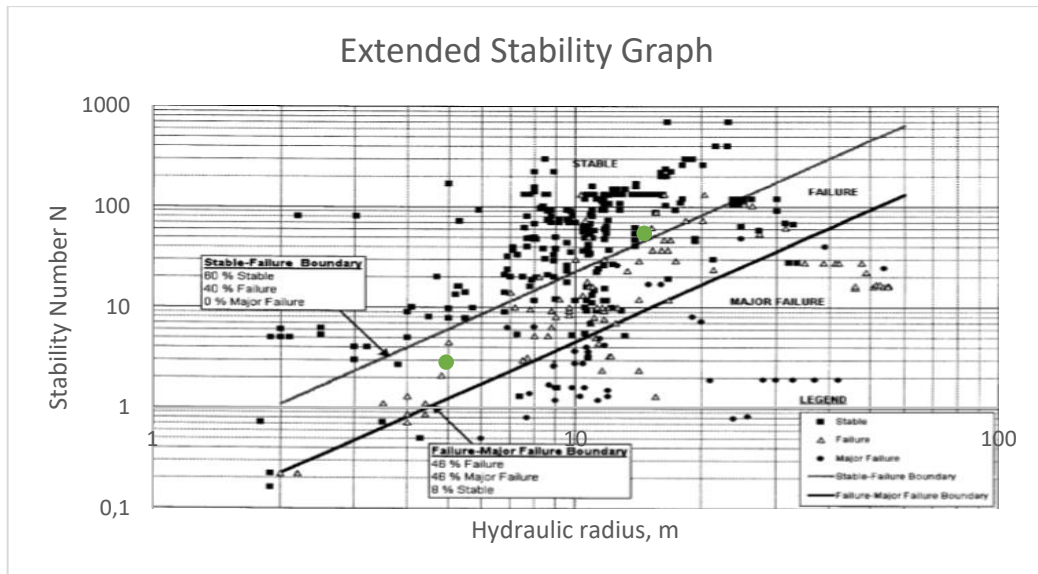
5.7.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.95: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.96: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.97: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.7.2.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

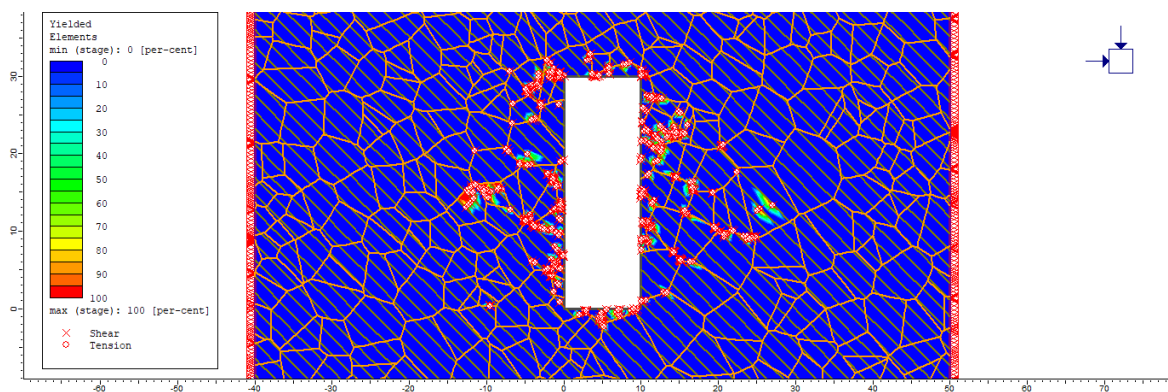
Πίνακας 5.67: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	2,83	3,33	4,95	10-15	23	62	18	Failure
HW	53,31	53,31	14,56	< 5	70	30	0	Stable
R-SW	53,31	53,31	14,56	< 5	70	30	0	Stable

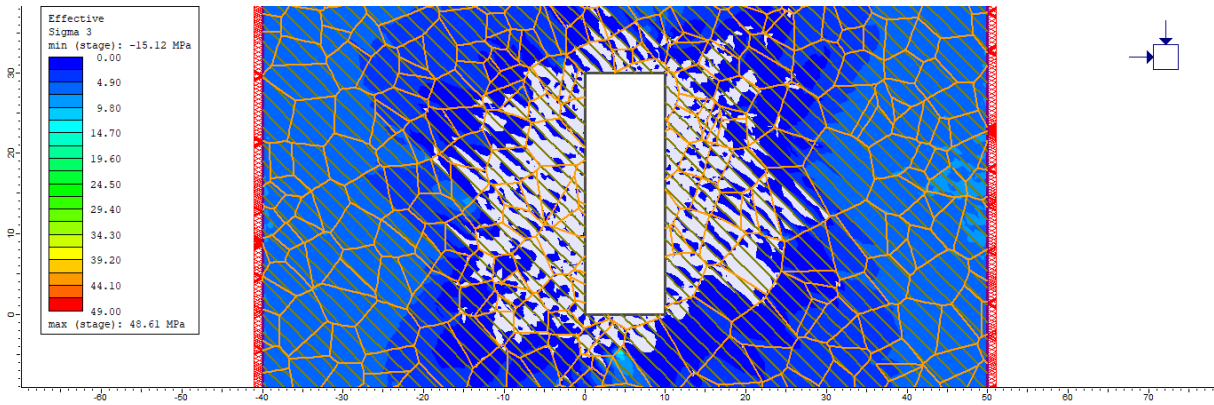
5.7.3 Κατηγορία 2^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 45°

5.7.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.7.3.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.98: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.99: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.7.3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.68: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

45 degrees	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθραυσης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραυση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
	HW - LSW	30	1000	20	9,97	300	3,32	#17
	FW - RSW	30	1000	20	8,31		2,77	#17
	CR	20	1000	10	0,83		0,28	#17

5.7.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

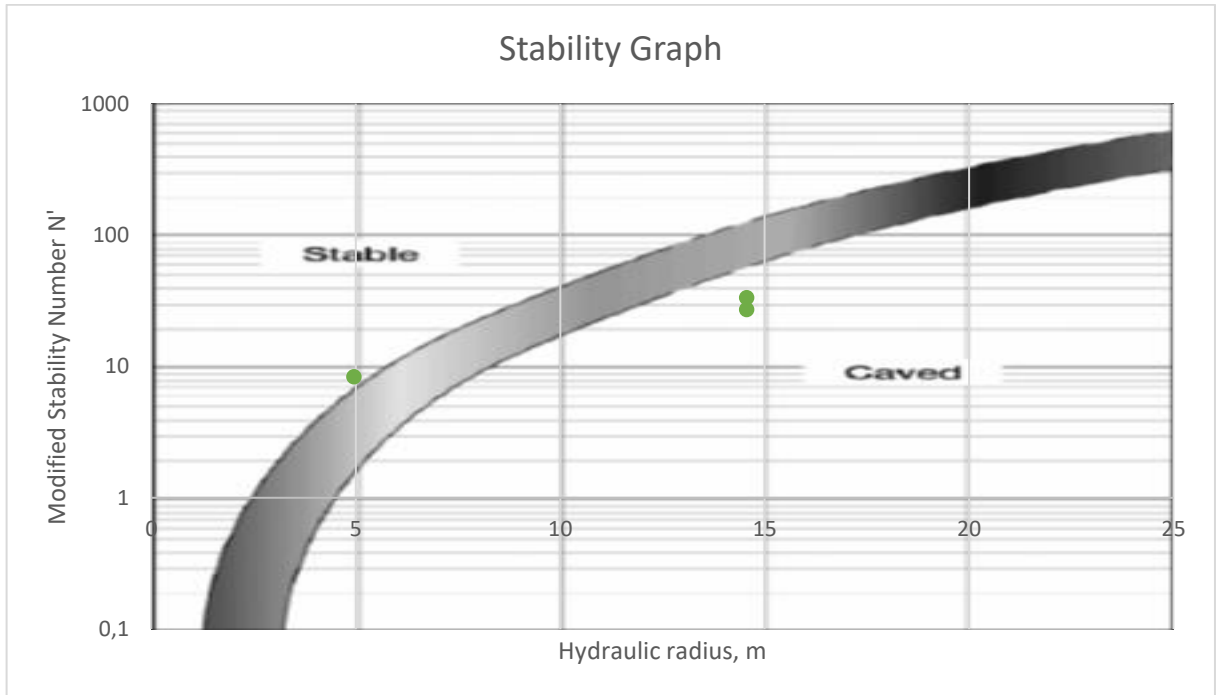
5.7.3.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

Πίνακας 5.69: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών – Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

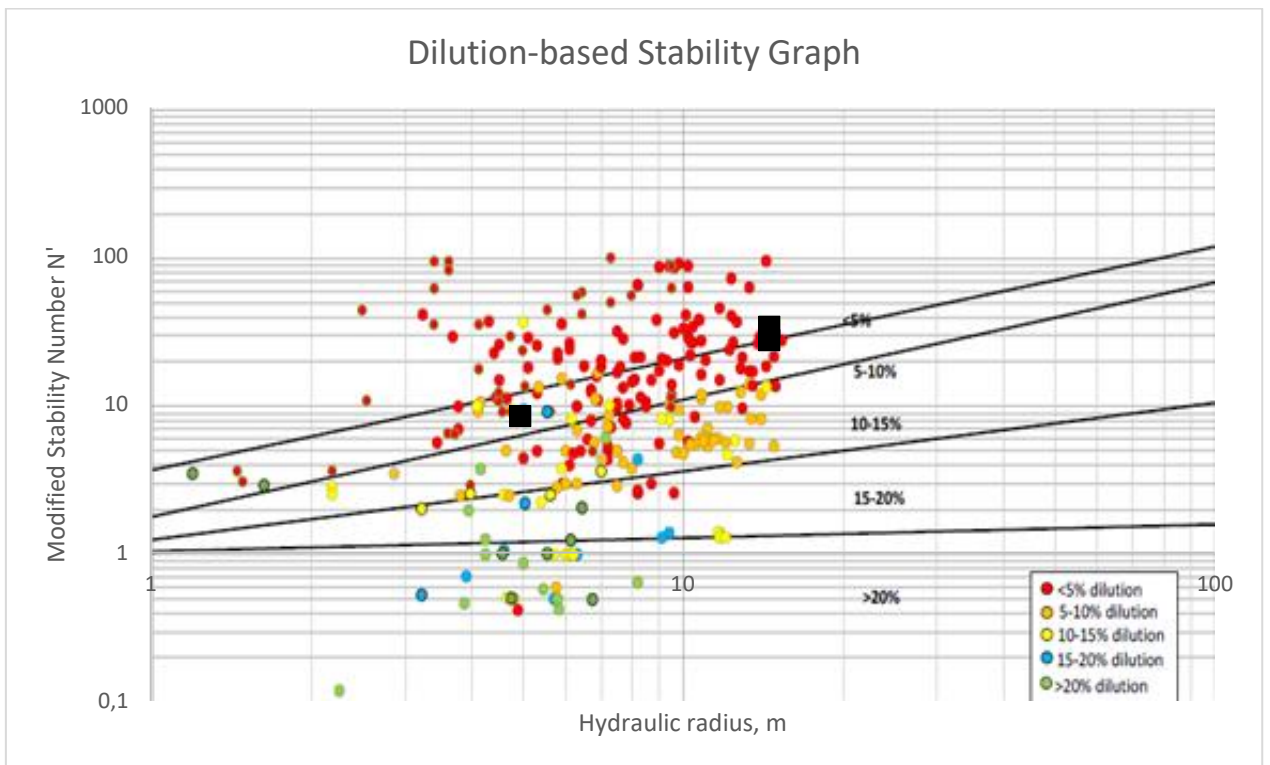
Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. Ακτίνα (m)
Crown	0	45	8,33	45	0,44	1	0,5	2	8,33	4,95
L-SW	90	45	8,33	45	0,03	1	0,5	6,5	27,07	14,56
R-SW	90	45	8,33	45	1,33	1	0,5	8	33,32	14,56

Πίνακας 5.70: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews					
Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	8,33	1	0,4	1	3,332
L-SW	8,33	1	0,4	8	26,656
R-SW	8,33	1	0,4	8	26,656

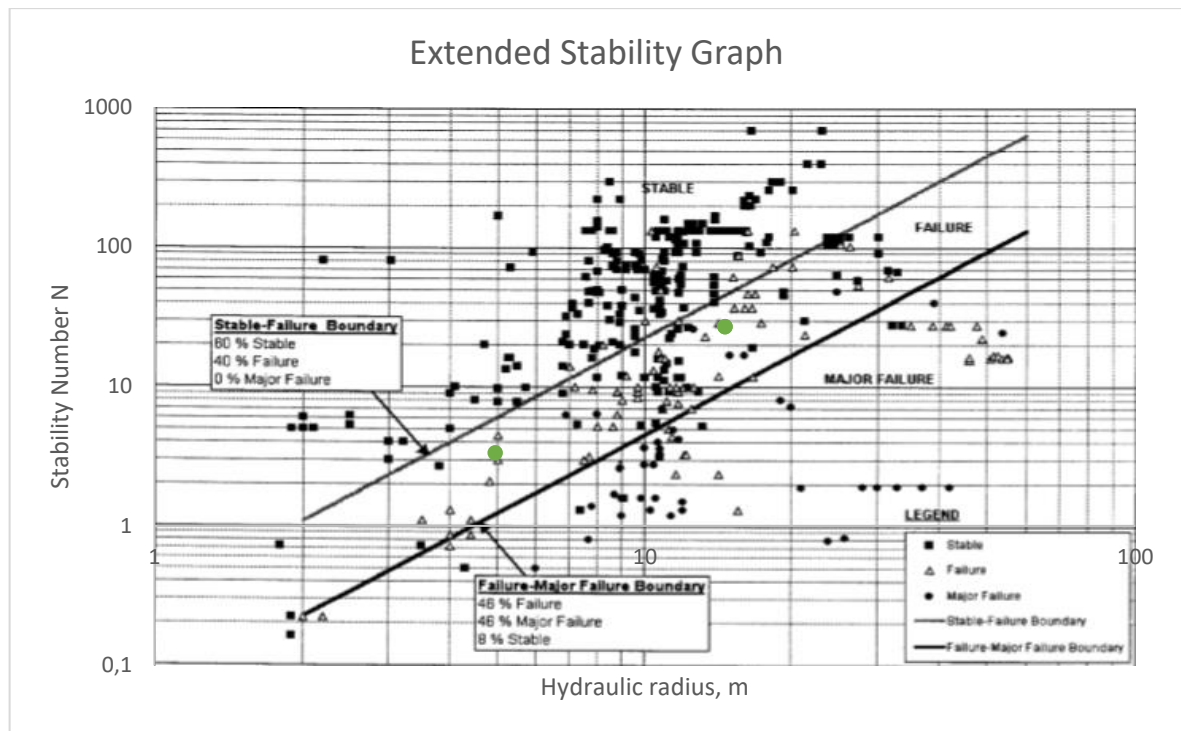
5.7.3.2.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.100: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.101: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Papaioanou και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.102: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.7.3.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

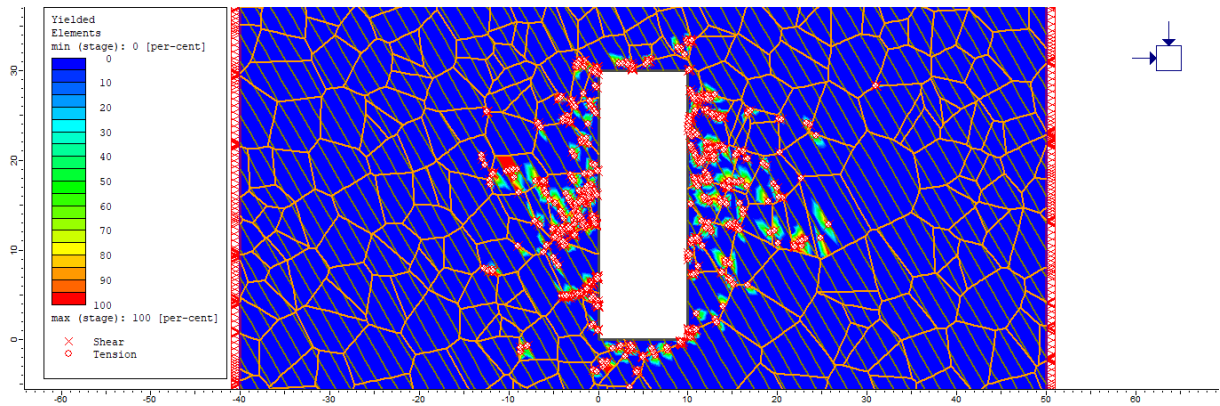
Πίνακας 5.71: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	3,33	8,33	4,95	5-10	50	40	5	Failure
HW	26,66	27,0725	14,56	< 5	58	40	2	Failure
R-SW	26,66	33,32	14,56	< 5	58	40	2	Failure

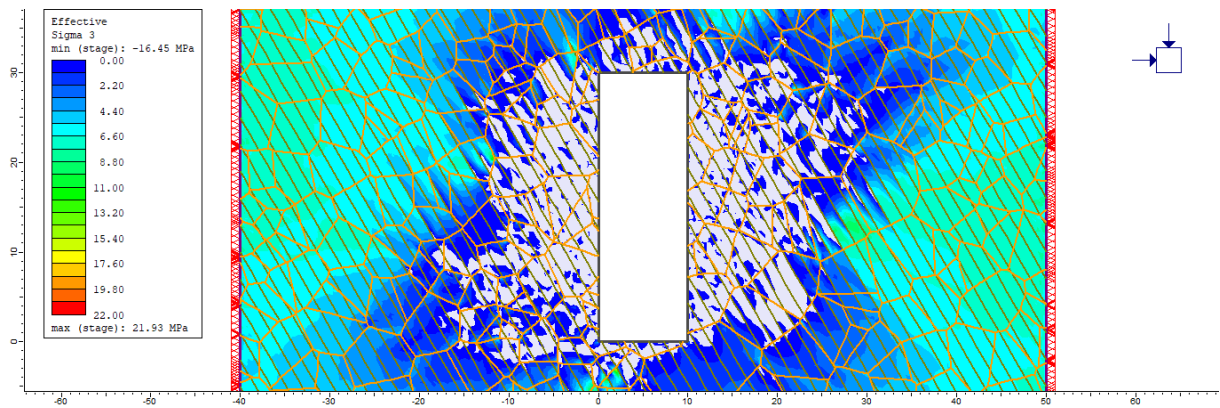
5.7.4 Κατηγορία 3^η : Γωνία κλίσης ασυνεχειών = 60°

5.7.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

5.7.4.1.1 Παρουσίαση κατανομών



Εικόνα 5.103: Κατανομή σημείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό και διάτμηση



Εικόνα 5.104: Κατανομή ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης

5.7.4.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.72: Πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την ανάλυση FEA

	Επιφάνεια	Διάσταση 1 (m)	Διάσταση 2 (SG) (m)	Διάσταση 2 (m)	Επιφάνεια Υπέρθρασης (m ²)	Εσκαφή (m ²)	Υπέρθραση (%)	Αρίθμηση επιφάνειας
60 degrees	HW - LSW	30	1000	20	24,22	300	8,07	#18
	FW - RSW	30	1000	20	14,45		4,82	#18
	CR	20	1000	10	0,53		0,18	#18

5.7.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας Stability Graphs

5.7.4.2.1 Υπολογισμός δεικτών ευστάθειας (N και N')

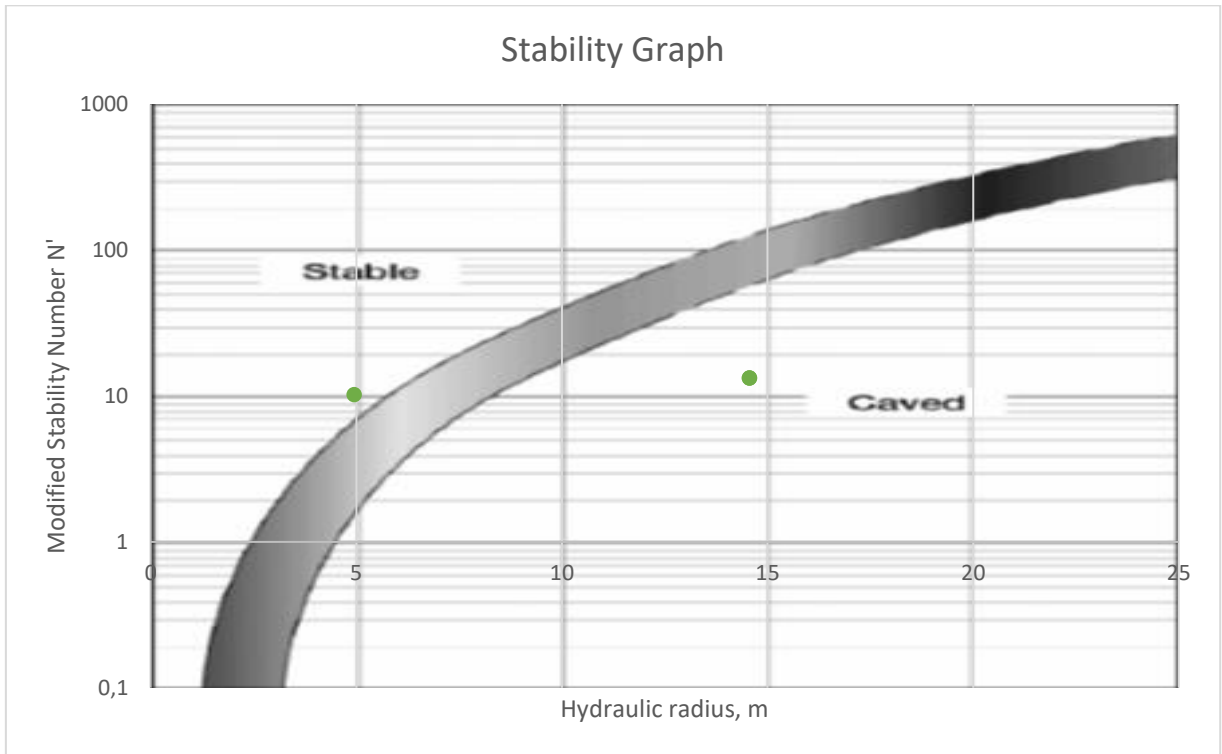
Πίνακας 5.73: Τιμές τροποποιημένων συντελεστών – Υπολογισμός τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας N'

Τοίχωμα	Κλίση Επιφάνειας (°)	Γωνία Κλίσης Ασυν. (°)	Q'	Διαφορά κλίσης (°)	σ_1	Συντ. A	Συντ. B	Συντ. C	Δείκτης Ευστάθειας N'	Υδρ. Ακτίνα (m)
Crown	0	60	8,33	60	8,08	0,77	0,8	2	10,26	4,95
L-SW	90	60	8,33	30	0,4	1	0,2	8	13,33	14,56
R-SW	90	60	8,33	30	0,02	1	0,2	8	13,33	14,56

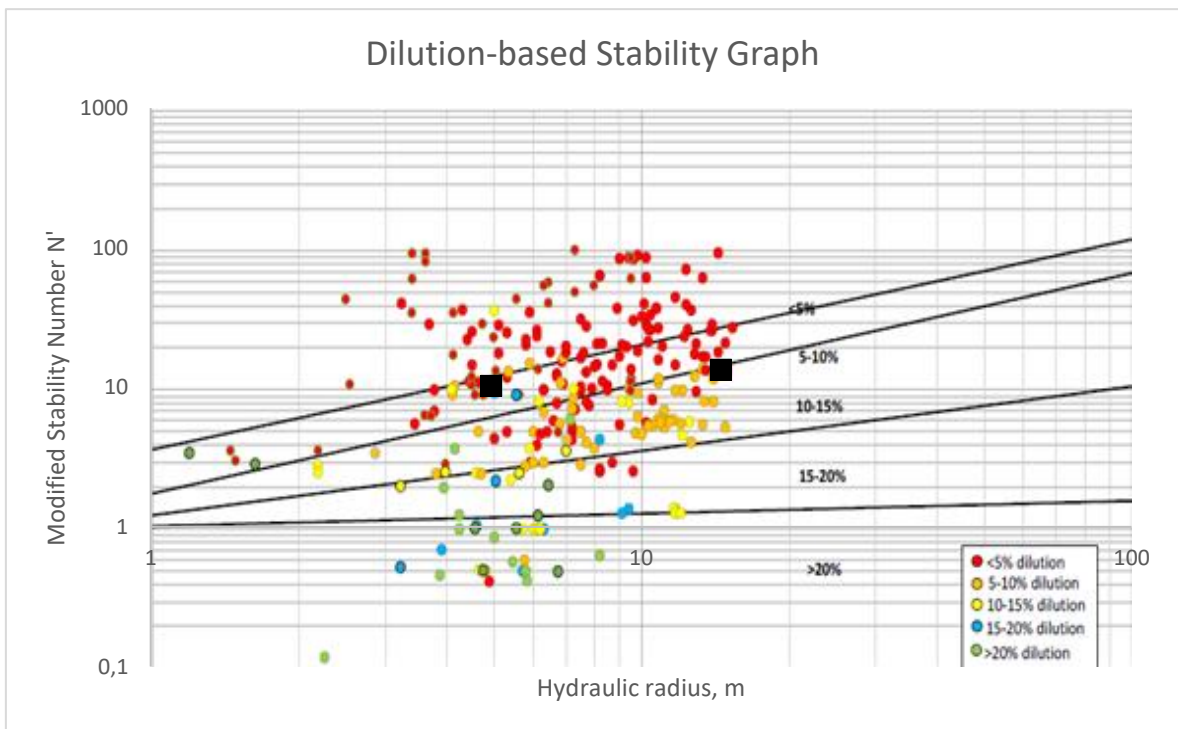
Πίνακας 5.74: Τιμές συντελεστών σύμφωνα με τα αρχικά διαγράμματα κατά Mathews

Τοίχωμα	Q'	Συντελεστής A	Συντελεστής B	Συντελεστής C	Δείκτης ευστάθειας N
Crown	8,33	0,73	0,8	1	4,87
L-SW	8,33	1	0,34	8	22,66
R-SW	8,33	1	0,34	8	22,66

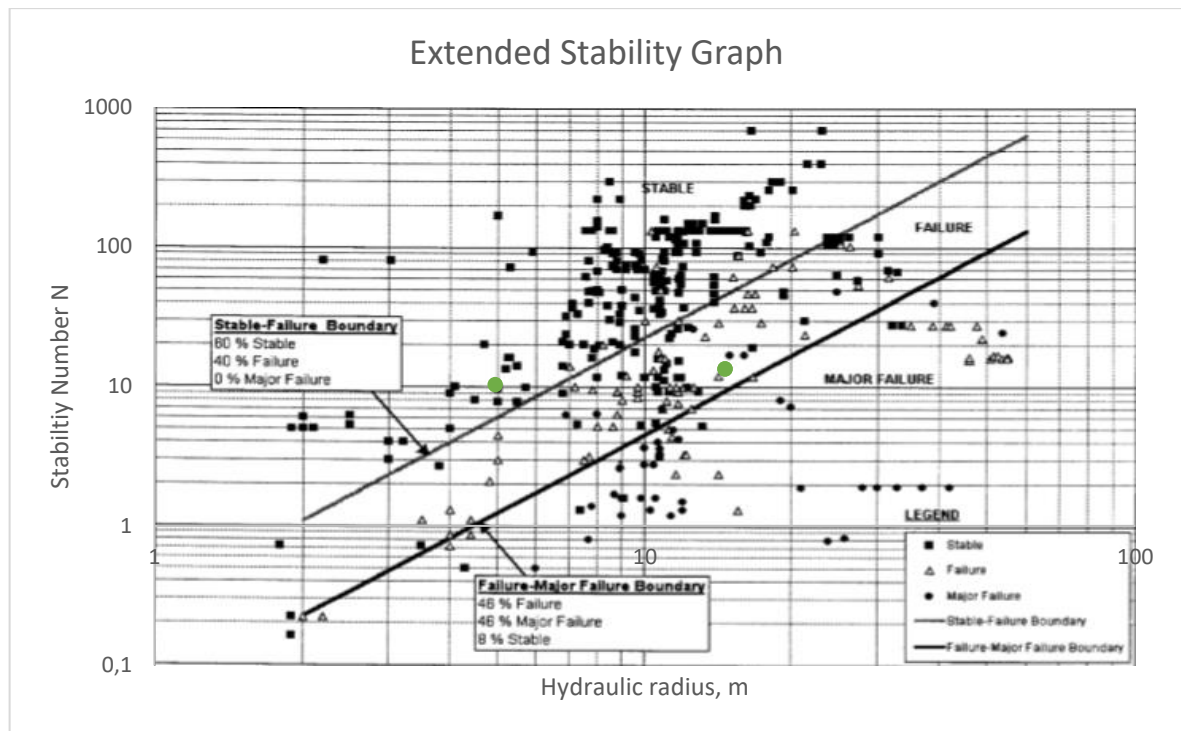
5.7.4.2 Παρουσίαση διαγραμμάτων ευστάθειας



Εικόνα 5.105: Χρήση του Modified Stability Graph κατά Potvin (1988)



Εικόνα 5.106: Χρήση του Dilution-based Stability Graph κατά Παπαϊοανου και Suorineni (2015)



Εικόνα 5.107: Χρήση του Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al (2001)

5.7.4.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 5.75: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τοίχωμα	Δείκτης ευστάθειας N	Τροπ. Δείκτης ευστάθειας N'	HR (m)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
Crown	4,87	10,26	4,95	5 - 10	83	17	0	Stable
HW	22,66	13,33	14,56	10 - 15	11	60	29	Failure
R-SW	22,66	13,33	14,56	10 - 15	11	60	29	Failure

5.8 Εκτίμηση συνολικής ευστάθειας μετώπων εξόρυξης

Είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί και συνολικά η ευστάθεια που παρουσιάζουν τα εξεταζόμενα μέτωπα εξόρυξης.

Σύμφωνα με τους Stewart και Forsyth (1995), ένα μέτωπο εξόρυξης κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες ευστάθειας ανάλογα με τα ποσοστά προσμίξεων τα οποία εμφανίζει μετά την πλήρη εκσκαφή του:

Πίνακας 5.76: Αντιστοίχιση ποσοστού αραιώσης - Κατάσταση ευστάθειας μετώπου εξόρυξης	
Dilution	Stability
10 %	Stable (Ευσταθές)
10 – 30 %	Unstable (Ασταθές)
> 30 %	Fail (Αστοχία)

Παρακάτω δίδεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 5.77) των δεκαοκτώ εξεταζόμενων περιπτώσεων όπου παρουσιάζεται η αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας ανά περίπτωση κάνοντας χρήση του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 5.76).

Πίνακας 5.77: Συγκεντρωτικός πίνακας πρόβλεψης ευστάθειας μετώπων εξόρυξης		
Μέτωπο εξόρυξης	Συνολικό ποσοστό αραιώσης (%)	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας
#1	0	Stable
#2	0	Stable
#3	0,01	Stable
#4	0,16	Stable
#5	0,04	Stable
#6	0,53	Stable
#7	1,6	Stable
#8	5,92	Stable
#9	14,83	Unstable
#10	1,86	Stable
#11	15,42	Unstable
#12	27,03	Unstable
#13	2,16	Stable
#14	27,87	Unstable
#15	40,96	Fail
#16	6,4	Stable
#17	6,37	Stable
#18	13,07	Unstable

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 5.77 μεγάλο μέρος των μετώπων εξόρυξης δεν εμφανίζουν συνολικά ποσοστά προσμίξεων τέτοια ώστε για αυτές τις περιπτώσεις να αναμένονται εκτεταμένα προβλήματα αστάθειας. Επιπροσθέτως, μόλις μία μελέτη περίπτωσης εμπίπτει

στην κατηγορία της αστοχίας (fail) με ποσοστό αραίωσης μεγαλύτερο του 30 % (40,96 %). Αν και δεν προσδιορίζονται επιπρόσθετα χαρακτηριστικά των επιμέρους κατηγοριών ευστάθειας, για το συγκεκριμένο ποσοστό πρόσμιξης του μεταλλεύματος αναμένεται σημαντική αστοχία των επιφανειών του μετώπου εξόρυξης, οι οποίες είναι δύσκολο να ελεγχθούν.

5.9 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Παρακάτω (Πίνακας 5.78) δίδονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αναλύσεων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, συνοδευόμενα από το υπόμνημα συμβολισμών των επιφανειών (βλ. Πίνακα 5.79).

Πίνακας 5.78: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση κατά Potvin (Modified SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραιώση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#1) CR	17	20	4,95	0,2475	Stable	95	5	0	< 5	0	Stable
(#1) L-SW	320	320	14,56	0,0455	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#1) R-SW	320	320	14,56	0,0455	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#2) CR	20	50	4,95	0,099	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#2) L-SW	160	162,5	14,56	0,0896	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#2) R-SW	160	200	14,56	0,0728	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#3) CR	37,2	77,6	4,95	0,0638	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#3) L-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,00	Stable
(#3) R-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,01	Stable
(#4) CR	17	20,00	4,95	0,2475	Stable	95	5	0	< 5	0,16	Stable
(#4) L-SW	262,4	281,60	14,56	0,0517	Stable	100	0	0	< 5	0,00	Stable
(#4) R-SW	256	265,60	14,56	0,0548	Stable	100	0	0	< 5	0,00	Stable
(#5) CR	11,6	30,00	4,95	0,165	Stable	88	12	0	< 5	0	Stable
(#5) L-SW	160	162,50	14,56	0,0896	Stable	100	0	0	< 5	0,00	Stable
(#5) R-SW	160	200,00	14,56	0,0728	Stable	100	0	0	< 5	0,04	Stable
(#6) CR	12	23,2	4,95	0,2134	Stable	88	12	0	< 5	0	Stable

Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση κατά Potvin (Modified SG)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#6) L-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,30	Stable
(#6) R-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,23	Stable
(#7) CR	8,24	5	4,95	0,99	Transitional	75	25	0	10 - 15	1,48	Stable
(#7) L-SW	45	80	14,56	0,182	Transitional	60	40	0	< 5	0,12	Stable
(#7) R-SW	45	80	14,56	0,182	Transitional	60	40	0	< 5	0,00	Stable
(#8) CR	5	12,5	4,95	0,396	Stable	50	40	5	< 5	1,75	Failure
(#8) L-SW	40	40,63	14,56	0,3584	Caved	58	40	2	< 5	2,41	Failure
(#8) R-SW	40	50	14,56	0,2912	Caved	58	40	2	< 5	1,76	Failure
(#9) CR	4	8,2	4,95	0,6037	Stable	80	20	0	5 - 10	0	Stable
(#9) L-SW	34	20	14,56	0,728	Caved	20	64	16	5 - 10	5,40	Failure
(#9) R-SW	34	20	14,56	0,728	Caved	20	64	16	5 - 10	9,43	Failure
(#10) CR	4,25	5	7,39	1,478	Caved	15	61	24	10 - 15	1,86	Failure
(#10) L-SW	80	80	23,81	0,2976	Caved	42	50	8	< 5	0,00	Failure
(#10) R-SW	80	80	23,81	0,2976	Caved	42	50	8	< 5	0,00	Failure
(#11) CR	5	12,5	7,39	0,5912	Transitional	17	63	20	5 - 10	3,31	Failure
(#11) L-SW	40	40,63	23,81	0,586	Caved	17	62	21	5 - 10	8,03	Failure
(#11) R-SW	40	50	23,81	0,4762	Caved	17	62	21	< 5	4,09	Failure
(#12) CR	5,8	11,2	7,39	0,6598	Transitional	19	63	18	5 - 10	0	Failure
(#12) L-SW	34	20	23,81	1,1905	Caved	13	60	27	10 - 15	13,46	Failure
(#12) R-SW	34	20	23,81	1,1905	Caved	13	60	27	10 - 15	13,57	Failure
(#13) CR	2,13	2,5	7,39	2,956	Caved	7,5	45	47,5	15 - 20	2,16	Failure
(#13) L-SW	40	40	23,81	0,5953	Caved	16	62	22	< 5	0,00	Failure
(#13) R-SW	40	40	23,81	0,5953	Caved	16	62	22	< 5	0,00	Failure

Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση κατά Potvin)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραιώση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#14) CR	2,5	6,25	7,39	1,1824	Caved	8	45	47	15 - 20	3,84	Failure
(#14) L-SW	20	20,31	23,81	1,1723	Caved	7	40	53	5 - 10	15,09	Major Failure
(#14) R-SW	20	25	23,81	0,9524	Caved	7	40	53	5 - 10	8,94	Major Failure
(#15) CR	5	10	7,39	0,739	Transitional	17	63	20	5 - 10	0	Failure
(#15) L-SW	17	10	23,81	2,381	Caved	6	30	64	10 - 15	21,93	Major Failure
(#15) R-SW	17	10	23,81	2,381	Caved	6	30	64	10 - 15	19,03	Major Failure
(#16) CR	2,83	3,33	4,95	1,4865	Transitional	23	62	18	10 - 15	2,35	Failure
(#16) L-SW	53,31	53,31	14,56	0,2731	Caved	70	30	0	< 5	1,33	Stable
(#16) R-SW	53,31	53,31	14,56	0,2731	Caved	70	30	0	< 5	2,72	Stable
(#17) CR	3,33	8,33	4,95	0,5942	Stable	50	40	5	5 - 10	0,28	Failure
(#17) L-SW	26,66	27,07	14,56	0,5378	Caved	58	40	2	< 5	3,32	Failure
(#17) R-SW	26,66	33,32	14,56	0,437	Caved	58	40	2	< 5	2,77	Failure
(#18) CR	4,87	10,26	4,95	0,4823	Stable	83	17	0	5 - 10	0,18	Stable
(#18) L-SW	22,66	13,33	14,56	1,0924	Caved	11	60	29	10 - 15	8,07	Failure
(#18) R-SW	22,66	13,33	14,56	1,0924	Caved	11	60	29	10 - 15	4,82	Failure

Υποσημείωση :

Στέψη (Crown) : CR

Αριστερή παρειά (Left Sidewall) : L-SW

Δεξιά παρειά (Right Sidewall) : R-SW

Κεφάλαιο 6^ο: Σχολιασμός αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις

6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε και εξετάστηκε ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων – αναλύσεων. Σε γενικές γραμμές οι αναλύσεις έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρόλο που σε ορισμένες προσομοιώσεις τα αποτελέσματα ήταν δυσανάλογα των αναμενόμενων. Ειδικές παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την κάθε κατηγορία επιφανείας παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

Στις ενότητες που ακολουθούν πραγματοποιούνται ορισμένες προσεγγίσεις μεταξύ βασικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν την ευστάθεια μίας εξεταζόμενης επιφάνειας και των ποσοστών πρόσμιξης, όπως αυτά προκύπτουν από την ανάλυση με FEA.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όσον αφορά την κατασκευή των εξισώσεων υπολογισμού του ποσοστού πρόσμιξης για κάθε τύπο επιφάνειας, γίνεται χρήση της ίδιας μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε από τους Le Roux και Stacey (2017). Πιο συγκεκριμένα, οι Le Roux και Stacey με σκοπό να εξάγουν από τα αποτελέσματα των αναλύσεών τους μία σχέση πρόβλεψης του ποσοστού αραίωσης του χρήσιμου συστατικού με βάση τις ιδιότητες της εξεταζόμενης επιφάνειας χρησιμοποίησαν ως εξαρτημένη μεταβλητή τον λόγο “Υδραυλική ακτίνα (HR) / Τροποποιημένος δείκτης ευστάθειας (N’)” . Για το σκοπό αυτό επιλέγεται στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος λόγος, ως ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο, καθώς εμπεριέχει τα δύο βασικά χαρακτηριστικά ελέγχου της ευστάθειας των μετώπων εξόρυξης.

Η διαφοροποίηση που εμφανίζει η προσέγγιση που ακολουθεί σε σχέση με την έρευνα των Le Roux και Stacey είναι πως στην μελέτη που διενήργησαν εκείνοι κάθε μέτωπο εξόρυξης δεν διαχωρίζεται στις επιμέρους επιφάνειές του αλλά ολόκληρος ο όγκος υπέρθραυσης αντιστοιχίζεται στην πλευρά με την μεγαλύτερη συνεισφορά στην αραίωση του μεταλλεύματος. Στην προκειμένη περίπτωση η συνεισφορά της κάθε επιφάνειας του εξορυκτικού χώρου αναλύεται ξεχωριστά. Έτσι για κάθε τύπο επιφάνειας προκύπτει μία ξεχωριστή σχέση πρόβλεψης των αναμενόμενων ποσοστών αραίωσης του μεταλλεύματος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί εκ νέου ότι για την εξαγωγή του ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος πραγματοποιείται η παραδοχή ότι οι κατανομές των μεγεθών που λαμβάνονται εμφανίζουν την ίδια εικόνα σε όλο το μήκος προχώρησης της εκσκαφής. Δηλαδή ανά μέτρο προχώρησης θεωρείται πως συναντώνται τα ίδια αποτελέσματα. Κατ’ αυτό το τρόπο αν και τα αποτελέσματα προκύπτουν από την εξέταση των επιφανειών της εκσκαφής και της

υπερεκσκαφής που εντοπίζεται εξωτερικά από αυτές, με βάση την προηγούμενη παραδοχή υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση των εμβადών με τους αντίστοιχους όγκους. Έτσι, αν και η ανάλυση θα απαιτούσε τον υπολογισμό του λόγου του όγκου της υπερεκσκαφής με εκείνον της εκσκαφής, το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει και στην περίπτωση χρησιμοποίησης των εμβαδών της πρόσοψης και της περιοχής υπέρθραυσης του μετώπου εξόρυξης. Σημειώνεται ότι για την συγκεκριμένη συσχέτιση χρησιμοποιούνται μόνο οι περιπτώσεις με ποσοστό υπέρθραυσης μεγαλύτερο το μηδενός, ενώ οι επιφάνειες με μηδενικά ποσοστά υπέρθραυσης παραλείπονται.

Τέλος, στο τελευταίο μέρος του συγκεκριμένου κεφαλαίου (ενότητα 6.6) με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατασκευάζεται ένα dilution-based Stability Graph, δηλαδή ένα διάγραμμα ευστάθειας, με την βοήθεια του οποίου προσδιορίζονται και τα αναμενόμενα ποσοστά πρόσμιξης μίας εξεταζόμενης περίπτωσης.

6.2 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Στέψη (Crown)

6.2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων

Στον Πίνακα 6.1 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μόνο για την στέψη των εξεταζόμενων μετώπων εξόρυξης.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων – Στέψη μετώπων εξόρυξης

Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση κατάσταση (Modified SG κατά Potvin)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#1) CR	17	20	4,95	0,2475	Stable	95	5	0	< 5	0	Stable
(#2) CR	20	50	4,95	0,099	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#3) CR	37,2	77,6	4,95	0,0638	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#4) CR	17	20,00	4,95	0,2475	Stable	95	5	0	< 5	0,16	Stable
(#5) CR	11,6	30,00	4,95	0,165	Stable	88	12	0	< 5	0	Stable
(#6) CR	12	23,2	4,95	0,2134	Stable	88	12	0	< 5	0	Stable
(#7) CR	8,24	5	4,95	0,99	Transitional	75	25	0	10 - 15	1,48	Stable
(#8) CR	5	12,5	4,95	0,396	Stable	50	40	5	< 5	1,75	Failure
(#9) CR	4	8,2	4,95	0,6037	Stable	80	20	0	5 - 10	0	Stable
(#10) CR	4,25	5	7,39	1,478	Caved	15	61	24	10 - 15	1,86	Failure
(#11) CR	5	12,5	7,39	0,5912	Transitional	17	63	20	5 - 10	3,31	Failure
(#12) CR	5,8	11,2	7,39	0,6598	Transitional	19	63	18	5 - 10	0	Failure
(#13) CR	2,13	2,5	7,39	2,956	Caved	7,5	45	47,5	15 - 20	2,16	Failure
(#14) CR	2,5	6,25	7,39	1,1824	Caved	8	45	47	15 - 20	3,84	Failure
(#15) CR	5	10	7,39	0,739	Transitional	17	63	20	5 - 10	0	Failure
(#16) CR	2,83	3,33	4,95	1,4865	Transitional	23	62	18	10 - 15	2,35	Failure
(#17) CR	3,33	8,33	4,95	0,5942	Stable	50	40	5	5 - 10	0,28	Failure
(#18) CR	4,87	10,26	4,95	0,4823	Stable	83	17	0	5 - 10	0,18	Stable

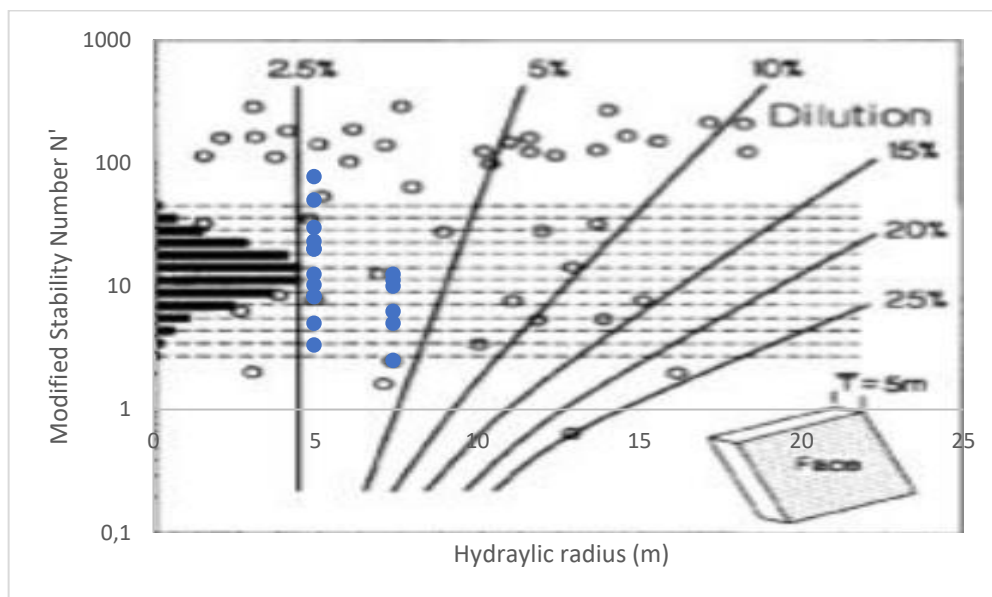
6.2.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Όπως πολύ εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις στέψεις, παρατηρούνται πολύ σημαντικές διαφοροποιήσεις των ποσοστών υπέρθραυσης και της κατάστασης σταθερότητας σε σχέση με τα αναμενόμενα που προκύπτουν από τα εμπειρικά διαγράμματα ευστάθειας. Πιο συγκεκριμένα, τα υπολογιζόμενα ποσοστά πρόσμιξης που προκαλούνται από την συγκεκριμένη επιφάνεια του εξορυκτικού χώρου σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνούν το 5 %, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις αναμενόταν ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό. Σύμφωνα λοιπόν με αυτό το συμπέρασμα θα μπορούσε να ειπωθεί άμεσα ότι η ανάλυση του προγράμματος για τις στέψεις δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή συναρμογή με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να προκύπτουν γρήγορα συμπεράσματα, καθώς υπάρχουν ορισμένες αιτίες που πιθανότατα να δικαιολογούν τις σημαντικές διαφοροποιήσεις. Πρώτο βασικό αίτιο (όπως ήδη έχει αναφερθεί) είναι οι παραδοχές που πραγματοποιούνται αλλά και τα σφάλματα στα οποία εμπίπτουν οι υπολογισμοί των δεδομένων εισόδου. Δεύτερο αίτιο είναι η μη αποδεδειγμένη απόλυτη αξιοπιστία όλων των χρησιμοποιούμενων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας και βασικώς του διαγράμματος ευστάθειας βασισμένο στα ποσοστά αραίωσης. Παρόλα αυτά ίσως το σημαντικότερο γεγονός που να αιτιολογεί την σημαντική απόκλιση που εμφανίζεται είναι το ότι σχεδόν καμία από τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί επάνω στο ζήτημα του Stability Graph δεν επιβεβαιώνουν ότι στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται περιέχονται και αποτελέσματα αναλύσεων σε στέψεις μετώπων εξόρυξης. Κατ' αυτό το τρόπο είναι πιθανό περιπτώσεις που αφορούν μεμονωμένες αναλύσεις ευστάθειας και ποσοστών υπέρθραυσης στέψεων, που όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της παρούσης ανάλυσης είναι αρκετά ευνοϊκά, να μην λαμβάνονται υπόψιν στην εξαγωγή διαγραμμάτων και σχέσεων συσχέτισης μεγεθών. Παρόλα η παρατήρηση που μόλις αναφέρθηκε είναι απλώς ένα πιθανολογικό σενάριο, το οποίο εφόσον δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες οι βάσεις δεδομένων των χρησιμοποιούμενων εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί. Τέλος, είναι πιθανό σημαντικό ρόλο στην απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα αναμενόμενα να διαδραματίζει η ίδια η φύση της συγκεκριμένης επιφάνειας, μέσα από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων όπως είναι η κατανομή των δυναμικών γραμμών επάνω σε αυτήν κλπ.

6.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις

Στην Εικόνα 6.1 τα ποσοστά πρόσμιξης ανά εξεταζόμενη δοκιμή για την περίπτωση των στέψεων των εξορυκτικών χώρων τοποθετούνται επάνω στο Stability Graph που κατασκεύασαν οι Pakalnis et al. (1995). Αν και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο διάγραμμα θα έπρεπε το πλάτος του μετώπου να προσεγγίζει τα 5 m, γεγονός

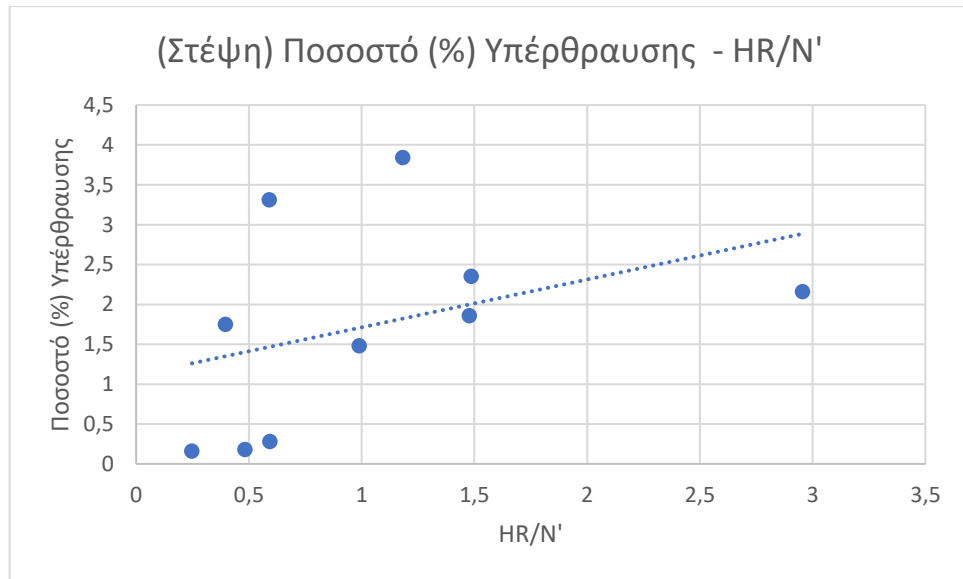
που δεν πραγματοποιείται με βάση τα χρησιμοποιούμενα πλάτη μετώπων εξόρυξης (10 και 15 m), το συγκεκριμένο εμπειρικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί με σκοπό να εκτιμηθεί ένα εύρος αναμενόμενων ποσοστών αραίωσης μεταλλεύματος.



Εικόνα 6.1: Στέψεις: Εφαρμογή διαγράμματος προσδιορισμού ποσοστού αραίωσης κατά Pakalnis et al.1995

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 6.1 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα αναμενόμενα ποσοστά αραίωσης του μεταλλεύματος που προκύπτουν από την στέψη των εξορυκτικών χώρων κυμαίνονται μεταξύ 3 – 4 %. Κατ' αυτό το τρόπο, συγκρίνοντας το συγκεκριμένο εύρος τιμών με τα ποσοστά αραίωσης που έχουν προκύψει από τις δοκιμές μέσω του RS2, εντοπίζεται μεγαλύτερη συναρμογή σε σχέση με τα αποτελέσματα του dilution – based Stability Graph κατά Παπαϊοανου και Suorineni (2015)

Όπως σημειώθηκε και κατά την εισαγωγή βασική προσέγγιση του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η κατασκευή εξισώσεων προσδιορισμού των ποσοστών πρόσμιξης ανά εξεταζόμενη κατηγορία επιφάνειας σύμφωνα με την μεθοδολογία των Le Roux και Stacey (2017). Παρακάτω δίδεται το διάγραμμα συσχέτισης του ποσοστού υπολογιζόμενης υπέρθραυσης με τον λόγο «HR/N'» για τις περιπτώσεις των στέψεων των μετώπων εξόρυξης (Εικόνα 6.2).



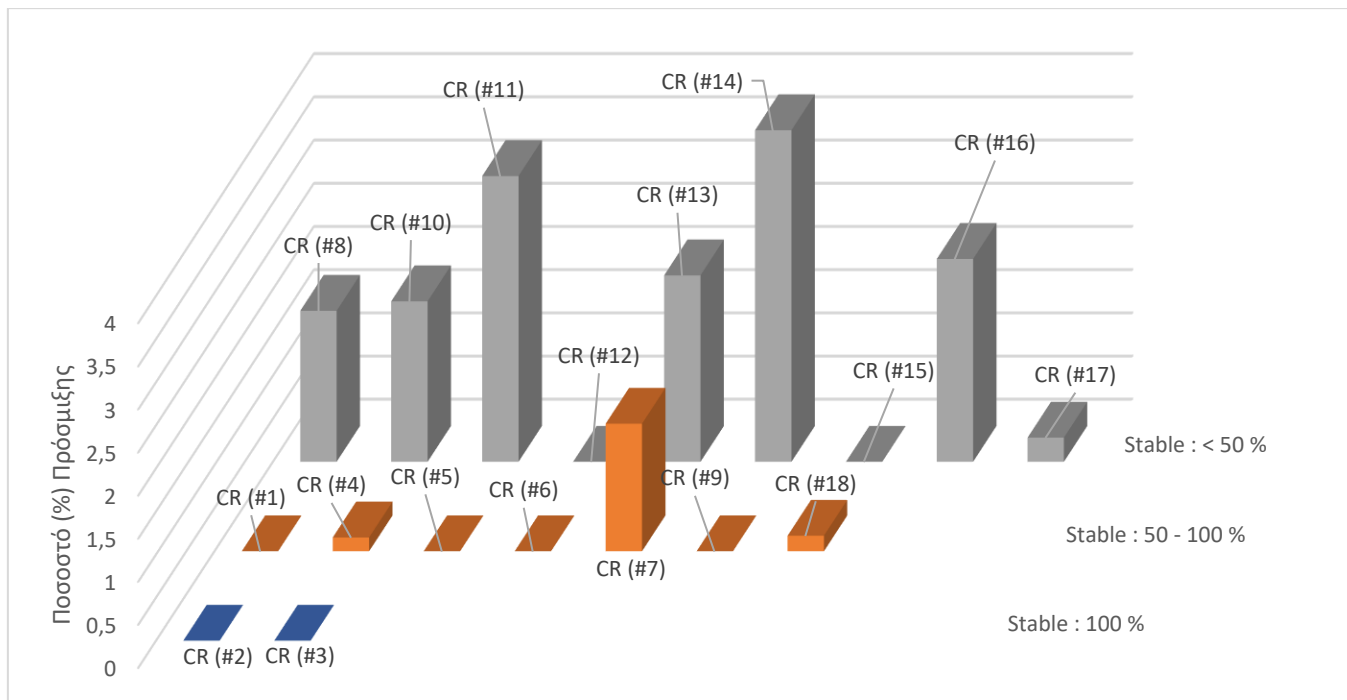
Εικόνα 6.2: Στέψη (Crown) : Διάγραμμα συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης - HR/N'

Όπως γίνεται αντιληπτό από το παραπάνω διάγραμμα της Εικόνας 6.2 η διασπορά των σημείων είναι αρκετά εκτεταμένη. Αυτό το γεγονός επιφέρει ένα σημαντικό ποσοστό σφάλματος που ενέχει η χρήση της εξίσωσης υπολογισμού του ποσοστού υπέρθραυσης - πρόσμιξης για την περίπτωση της στέψης του μετώπου εξόρυξης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής “R²” για την συγκεκριμένη εξίσωση, η οποία είναι 0.1443.

Η σχέση υπολογισμού του ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος που προκύπτει από την στέψη των μετώπων εξόρυξης σύμφωνα με την ανωτέρω γραφική συσχέτιση είναι η εξής:

$$\text{Ποσοστό προσμίξεων (\%)} = 0.6 \times \frac{HR}{N'} + 1.1127$$

Άλλη μία ενδιαφέρουσα συσχέτιση μεγεθών προς παρουσίαση είναι αυτή μεταξύ του (%) ποσοστού υπέρθραυσης και του (%) ποσοστού πιθανότητας εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 6.3) περιλαμβάνονται όλες οι μελέτες περιπτώσεων, ακόμη και αυτές με μηδενικά ποσοστά υπέρθραυσης.



Εικόνα 6.3: Στέψη (Crown) : Τρισδιάστατο γράφημα σειρών συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης – Πιθανότητα (%) εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1 και το παραπάνω γράφημα στηλών (Εικόνα 6.3) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

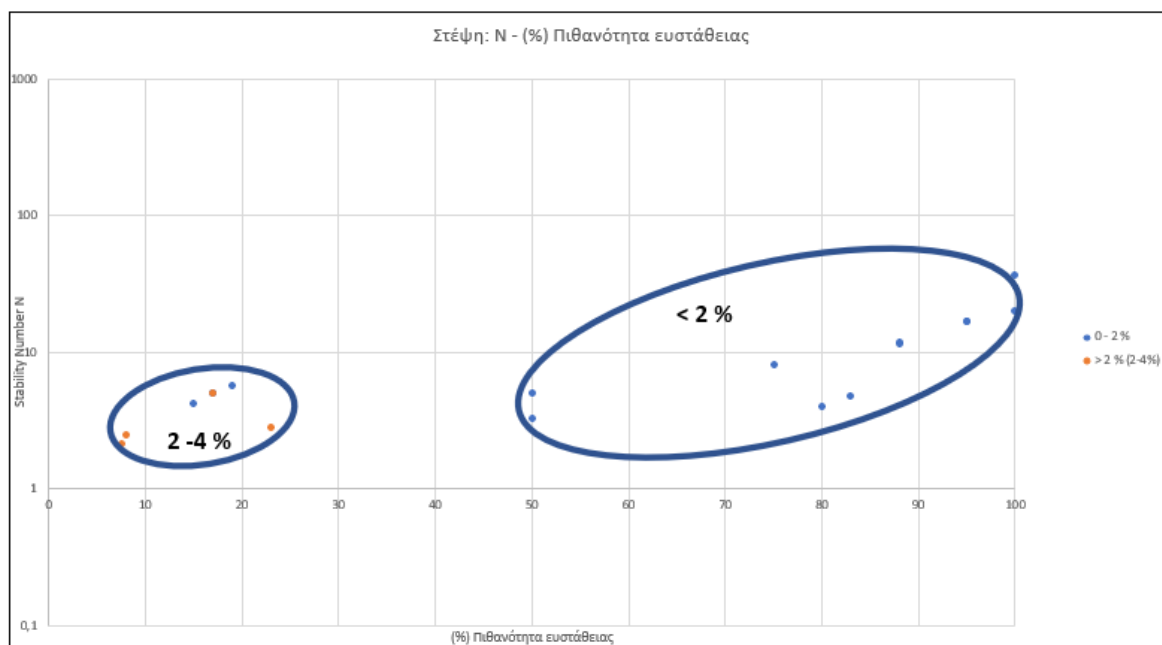
- Ακόμη και για τις περιπτώσεις όπου η πιθανότητα ευστάθειας της στέψης ήταν πολύ μικρή (βλ. πχ. 8%), τα ποσοστά πρόσμιξης δεν ξεπερνούσαν το 4 %, τιμή σημαντικά χαμηλή.
- Για υψηλά ποσοστά πιθανότητας εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης, μεγαλύτερα του 80 % τα ποσοστά υπέρθραυσης που εντοπίστηκαν δεν ξεπερνούσαν το 0.5 %. Τα μεγαλύτερα ποσοστά αραίωσης εντοπίστηκαν, όπως αναμενόταν, στις περιπτώσεις με μικρή πιθανότητα ευστάθειας της επιφάνειας. Σαν γενική παρατήρηση για ποσοστά μικρότερα του 50 % εντοπίζονται ποσοστά υπέρθραυσης μεγαλύτερα του 2 %.
- Όπως γίνεται αντιληπτό δεν λείπουν και οι περιπτώσεις που ενώ αποδίδεται μία χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης, τελικώς δεν εντοπίστηκε καμία περιοχή στο περιβάλλον πέτρωμα που να έχει αστοχήσει.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 6.4) παρουσιάζεται ένα διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται η επί τοις εκατό πιθανότητα εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης, σύμφωνα με την ανάλυση του διαγράμματος ισοπιθανολογικών γραμμικών καμπυλών εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης κατά Mawdesley, Trueman και Whiten (2001) για τις περιπτώσεις των στέψεων, ενώ στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται ο δείκτης ευστάθειας N. Τα σημεία εντός του διαγράμματος ομαδοποιούνται με βάση το ποσοστό αραίωσης που επιτυγχάνεται στην

κάθε περίπτωση ξεχωριστά, όπως αυτό προκύπτει από τις δοκιμές μέσω του προγράμματος RS2. Κατ' αυτό το τρόπο για τις στέψεις δημιουργούνται δύο σειρές δεδομένων, δηλαδή δύο διαφορετικά εύρη ποσοστών αραίωσης, τα οποία είναι:

- < 2 %
- 2 – 4 %

Τα σημεία που εμπίπτουν σε καθένα από αυτά τα εύρη ομαδοποιούνται (συσταδοποιούνται) και εν συνεχεία μέσω χειροκίνητου σχεδιασμού αυτά περικλείονται εντός ευρύτερων ζωνών (ελλειπτικής μορφής). Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις ξεχωριστές κατηγορίες διαστημάτων πρόσμιξης.



Εικόνα 6.4: Στέψη: Προσδιορισμός ποσοστών αραίωσης μεταλλεύματος μέσω ομαδοποίησης σημείων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEA - Διάγραμμα N - % Πιθανότητα εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

Όπως παρατηρείται από το γράφημα της Εικόνας 6.4 εντός της περιοχής ποσοστών πρόσμιξης 2-4 % περικλείονται και δύο σημεία όπου παρατηρήθηκε εμφάνιση ποσοστού < 2 %. Η ενέργεια αυτή κρίθηκε αναγκαία με σκοπό να συμπεριληφθούν όλα τα σημεία που εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία εντός της περικλειόμενης περιοχής.

6.3 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Αριστερή παρειά (Left Sidewall)

6.3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων

Ακολούθως (Πίνακας 6.2) δίδεται ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μόνο για την αριστερή παρειά των εξεταζόμενων μετώπων εξόρυξης.

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων – Αριστερή παρειά μετώπων εξόρυξης

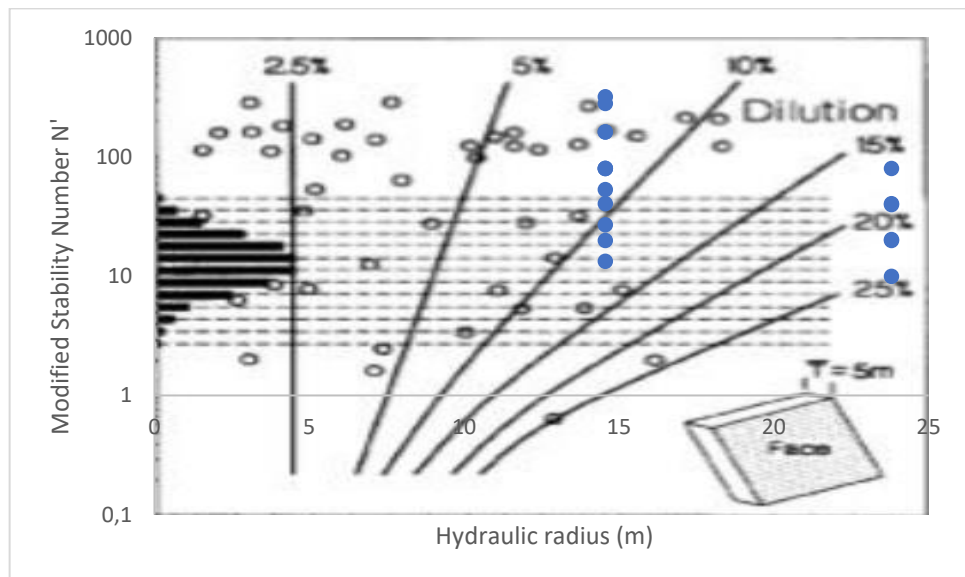
Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση (Modified SG κατά Potvin)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#1) L-SW	320	320	14,56	0,0455	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#2) L-SW	160	162,5	14,56	0,0896	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#3) L-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0	Stable
(#4) L-SW	262,4	281,60	14,56	0,0517	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#5) L-SW	160	162,50	14,56	0,0896	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#6) L-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,30	Stable
(#7) L-SW	45	80	14,56	0,182	Transitional	60	40	0	< 5	0,12	Stable
(#8) L-SW	40	40,63	14,56	0,3584	Caved	58	40	2	< 5	2,41	Failure
(#9) L-SW	34	20	14,56	0,728	Caved	20	64	16	5 - 10	5,40	Failure
(#10) L-SW	80	80	23,81	0,2976	Caved	42	50	8	< 5	0,00	Failure
(#11) L-SW	40	40,63	23,81	0,586	Caved	17	62	21	5 - 10	8,03	Failure
(#12) L-SW	34	20	23,81	1,1905	Caved	13	60	27	10 - 15	13,46	Failure
(#13) L-SW	40	40	23,81	0,5953	Caved	16	62	22	< 5	0	Failure
(#14) L-SW	20	20,31	23,81	1,1723	Caved	7	40	53	5 - 10	15,09	Major Failure
(#15) L-SW	17	10	23,81	2,381	Caved	6	30	64	10 - 15	21,93	Major Failure
(#16) L-SW	53,31	53,31	14,56	0,2731	Caved	70	30	0	< 5	1,33	Stable
(#17) L-SW	26,66	27,07	14,56	0,5378	Caved	58	40	2	< 5	3,32	Failure
(#18) L-SW	22,66	13,33	14,56	1,0924	Caved	11	60	29	10 - 15	8,07	Failure

6.3.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την αριστερή παρειά των μετώπων εξόρυξης κρίνονται ως αρκετά ικανοποιητικά. Σημειώνεται επίσης ότι σε αρκετές εκ των περιπτώσεων τα ποσοστά υπέρθραυσης που προσδιορίζονται ικανοποιούν τα αναμενόμενα όρια ποσοστού προσμίξεων που προσδιορίζονται από το dilution-based Stability Graph. Σημαντική προσαρμογή παρουσιάζουν τα αποτελέσματα με την αναμενόμενη κατάσταση που προσδιορίζεται από το Extended Stability Graph. Σύμφωνα λοιπόν με τα ανωτέρω μπορεί να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την συγκεκριμένη κατηγορία επιφανείας εμφανίζουν μία πολύ καλή συσχέτιση με τα αναμενόμενα που προκύπτουν από τα εμπειρικά διαγράμματα. Με βάση τα παραπάνω τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων μετώπων εξόρυξης. Τέλος, οι περιπτώσεις με γωνία κλίσης ασυνεχειών 30° είναι αυτές που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση από τα αναμενόμενα.

6.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις

Όπως και στην περίπτωση των στέψεων και σε αυτή την κατηγορία επιφανειών το πρώτο γράφημα ανάλυσης των συνολικών αποτελεσμάτων που παρατίθεται είναι αυτό της προσέγγισης των Pakalnis et al. (1995), προσαρμοσμένο στα δεδομένα του συγκεκριμένου τύπου εξεταζόμενης πλευράς (Εικόνα 6.5)

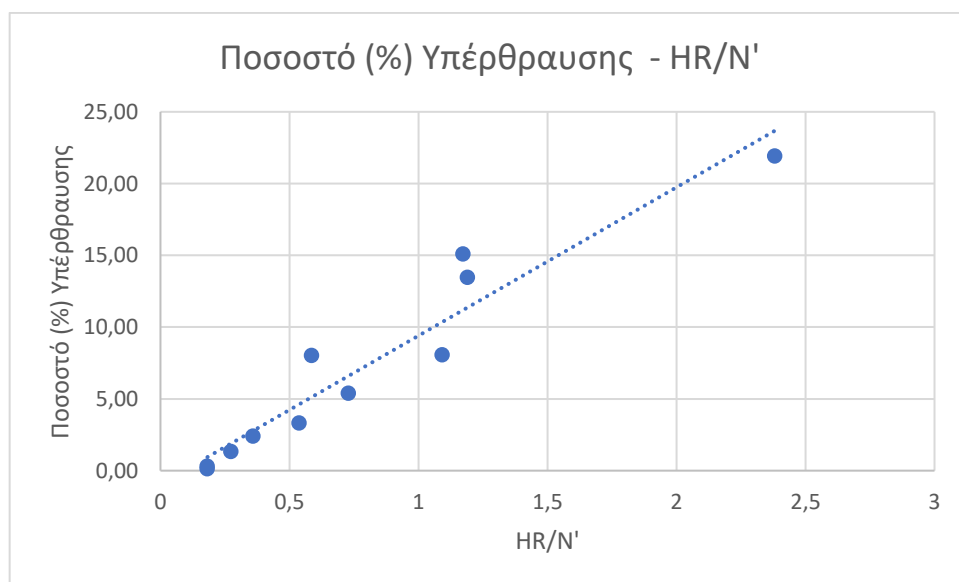


Εικόνα 6.5: Αριστερή παρειά – Οροφή (Left sidewall - HW): Εφαρμογή διαγράμματος προσδιορισμού ποσοστού αραιώσης κατά Pakalnis et al.1995

Όπως συνάδεται από την Εικόνα 6.5, όσον αφορά τις περιπτώσεις με υδραυλική ακτίνα ίση με 14,56 m αναμένονται όρια αραιώσης μεταξύ 7 – 12 %, ενώ για περιπτώσεις υδραυλικής ακτίνας

ίση με 23,81 m, το αναμενόμενο διάστημα είναι 16 - 25 %. Εξαιρουμένων των περιπτώσεων που εμφανίζουν σημαντικά χαμηλά ποσοστά αραίωσης, εντοπίζονται ορισμένες περιπτώσεις, οι οποίες προσεγγίζουν σημαντικά τα προσδιοριζόμενα εύρη αραίωσης και λίγες δοκιμές όπου τα ποσοστά τους εμπίπτουν εντός των προσδιοριζόμενων διαστημάτων. Σε γενικές γραμμές η πρόβλεψη που παρέχει το συγκεκριμένο διάγραμμα δεν μπορεί να κριθεί ως κακή, καθώς εντοπίζεται κατά ένα μέρος συναρμογή των προβλεπόμενων και των επιτεύξιμων αποτελεσμάτων.

Ακολούθως (Εικόνα 6.6), δίδεται το διάγραμμα συσχέτισης του ποσοστού υπολογιζόμενης υπέρθραυσης με τον λόγο «HR/N'» για τις περιπτώσεις των αριστερών παρειών των μετώπων εξόρυξης ή κατά παραδοχή των “επικρεμάμενων” επιφανειών (Hanging walls) κατ’ αντιστοιχία με την περίπτωση της στέψης.



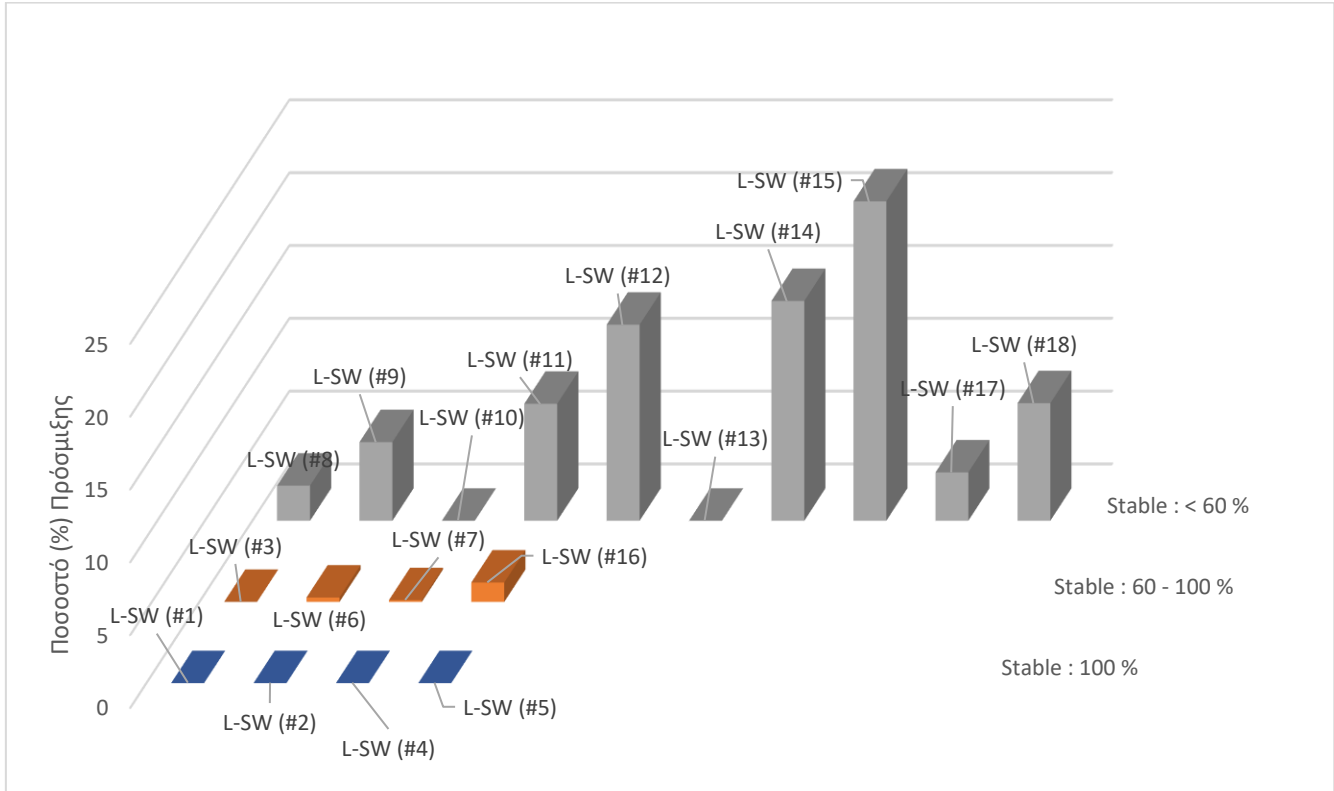
Εικόνα 6.6: Αριστερή παρειά (L-SW) : Διάγραμμα συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης - HR/N'

Σύμφωνα με το ανωτέρω διάγραμμα, παρατηρείται ένα ευρύ φάσμα τιμών υπέρθραυσης. Επιπροσθέτως, είναι αρκετά σημαντικό το γεγονός ότι τα περισσότερα σημεία δεν απέχουν μεγάλη απόσταση από την γραμμή τάσης, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την τιμή του συντελεστή «R²», η οποία είναι ίση με 0.9169. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά πιο κοντά στην μονάδα, σε σχέση με την γραμμή τάσης για την περίπτωση των στέψεων. Έτσι, η προσέγγιση της συγκεκριμένης εξίσωσης που πραγματοποιείται κρίνεται ως ιδιαίτερος ικανοποιητική.

Η σχέση υπολογισμού του ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος που προκύπτει από την αριστερή παρειά των μετώπων εξόρυξης σύμφωνα με την προηγούμενη γραφική συσχέτιση είναι η εξής:

$$\text{Ποσοστό προσμίξεων (\%)} = 10.339 \times \frac{HR}{N'} - 0.9381$$

Στην Εικόνα 6.7 δίδεται η διαγραμματική απεικόνιση της συσχέτισης του (%) ποσοστού υπέρθραυσης και της (%) πιθανότητας εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης για την περίπτωση της αριστερής παρειάς των μετώπων εξόρυξης.



Εικόνα 6.7: Αριστερή παρειά (L-SW) : Τρισδιάστατο γράφημα σειρών συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης – Πιθανότητα (%) εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

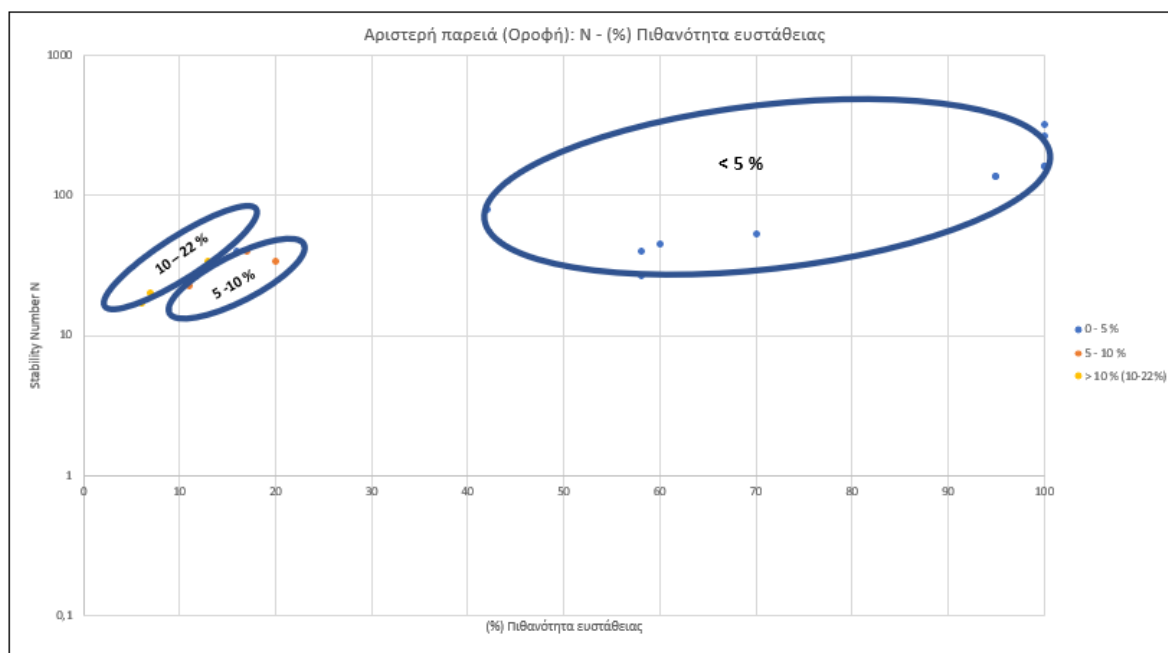
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.2 και το γράφημα στηλών της Εικόνας 6.7 παρατηρούνται τα εξής:

- Για πιθανότητες ευσταθούς κατάστασης μεγαλύτερες του 40 % τα ποσοστά υπέρθραυσης που προσδιορίστηκαν ήταν μικρότερα του 5 % του όγκου της εκσκαφής.
- Μεγαλύτερα ποσοστά υπέρθραυσης εντοπίζονται και πιθανότητες μικρότερες του 20 % και αφορούν περιπτώσεις με ποσοστά προσμίξεων οφειλόμενα στην αριστερή παρειά μεγαλύτερα του 5 %. Οι μέγιστες τιμές πρόσμιξης εντοπίζονται για πιθανότητες εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης μικρότερες του 10 %.
- Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δεν λείπουν περιπτώσεις όπου ενώ υπολογίζονται μέσες ή μικρές πιθανότητες εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης, παρατηρούνται ελάχιστα ή μηδενικά ποσοστά υπέρθραυσης.

- Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ποιοτικός χαρακτηρισμός της κατάστασης ευστάθειας κάποιας επιφάνειας δεν είναι άμεσα συνδεδεμένος με τα ποσοστά υπέρθραυσης που αναμένονται να προκληθούν. Αντιθέτως, πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή τη συσχέτιση διαδραματίζουν τα όρια που θεωρούνται στο εκάστοτε μεταλλευτικό έργο ως ανεκτά και επιτρεπτά και ως μη ανεκτά, σε καταστάσεις αστοχίας και σημαντικής αστοχίας.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 6.8) παρουσιάζεται ένα διάγραμμα κατ' αντιστοιχία με εκείνο της Εικόνας 6.4. Σημειώνεται ότι λόγω της εμφάνισης περισσότερων διαστημάτων ποσοστών πρόσμιξης, για την περίπτωση της αριστερής πλευράς του μετώπου εξόρυξης προκύπτουν περισσότερες από δύο ζώνες ομαδοποίησης σημείων. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση αυτή δημιουργούνται τρεις σειρές δεδομένων, με τα διαστήματα των ποσοστών αραίωσης που εντοπίζονται να είναι τα εξής:

- < 5 %
- 5 – 10 %
- 10 – 22 %



Εικόνα 6.8: Αριστερή παρειά: Προσδιορισμός ποσοστών αραίωσης μεταλλεύματος μέσω ομαδοποίησης σημείων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEA - Διάγραμμα N - % Πιθανότητα εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

6.4 Τελικά συμπεράσματα – Κατηγορία επιφανειών : Δεξιά παρειά (Right Sidewall)

6.4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στέψεων

Παρακάτω (Πίνακας 6.3) δίδεται ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μόνο για την δεξιά παρειά των εξεταζόμενων μετώπων εξόρυξης.

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων – Αριστερή παρειά μετώπων εξόρυξης

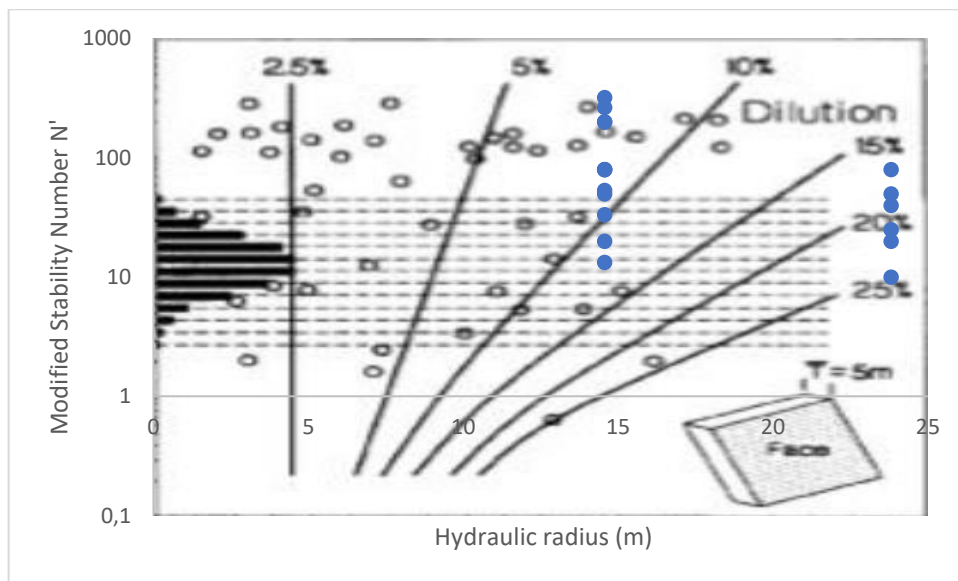
Τύπος επιφάνειας	N	N'	HR	HR/N'	Αναμενόμενη κατάσταση (Modified SG κατά Potvin)	Πιθανότητα Ευστάθειας (Stable) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Αστοχίας (Failure) (%) (Ext. SG)	Πιθανότητα Σημαντικής Αστοχίας (Major Failure) (%) (Ext. SG)	Αναμενόμενη αραίωση (%) (Dilution - based SG)	Υπολογιζόμενο ποσοστό (%) υπέρθραυσης	Αναμενόμενη κατάσταση ευστάθειας (Ext. SG)
(#1) R-SW	320	320	14,56	0,0455	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#2) R-SW	160	200	14,56	0,0728	Stable	100	0	0	< 5	0	Stable
(#3) R-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,01	Stable
(#4) R-SW	256	265,60	14,56	0,05482	Stable	100	0	0	< 5	0,00	Stable
(#5) R-SW	160	200,00	14,56	0,0728	Stable	100	0	0	< 5	0,04	Stable
(#6) R-SW	136	80	14,56	0,182	Transitional	95	5	0	< 5	0,23	Stable
(#7) R-SW	45	80	14,56	0,182	Transitional	60	40	0	< 5	0,00	Stable
(#8) R-SW	40	50	14,56	0,2912	Caved	58	40	2	< 5	1,76	Failure
(#9) R-SW	34	20	14,56	0,728	Caved	20	64	16	5 - 10	9,43	Failure
(#10) R-SW	80	80	23,81	0,297625	Caved	42	50	8	< 5	0,00	Failure
(#11) R-SW	40	50	23,81	0,4762	Caved	17	62	21	< 5	4,09	Failure
(#12) R-SW	34	20	23,81	1,1905	Caved	13	60	27	10 - 15	13,57	Failure
(#13) R-SW	40	40	23,81	0,59525	Caved	16	62	22	< 5	0,00	Failure
(#14) R-SW	20	25	23,81	0,9524	Caved	7	40	53	5 - 10	8,94	Major Failure
(#15) R-SW	17	10	23,81	2,381	Caved	6	30	64	10 - 15	19,03	Major Failure
(#16) R-SW	53,31	53,31	14,56	0,27312	Caved	70	30	0	< 5	2,72	Stable
(#17) R-SW	26,66	33,32	14,56	0,43698	Caved	58	40	2	< 5	2,77	Failure
(#18) R-SW	22,66	13,33	14,56	1,09244	Caved	11	60	29	10 - 15	4,82	Failure

6.4.2 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Για την συγκεκριμένη περίπτωση επιφάνειας ισχύουν οι ίδιες γενικές παρατηρήσεις με την αριστερή παρειά (βλ. 6.3.2).

6.4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Τελικές συσχετίσεις

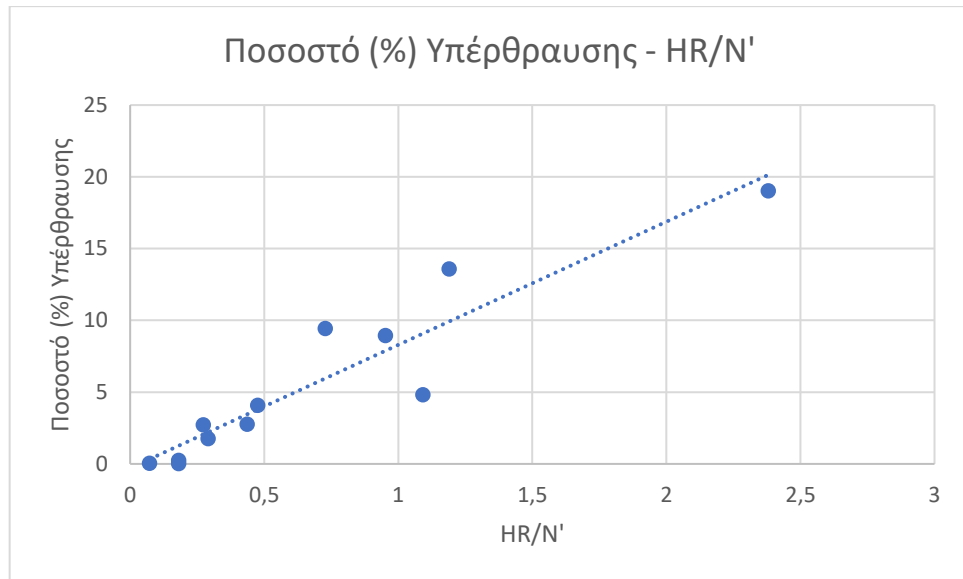
Κατ' αντιστοιχία με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, ακολούθως (Εικόνα 6.9) παρατίθεται το πρώτο γράφημα ανάλυσης των συνολικών αποτελεσμάτων σύμφωνα με την προσέγγιση του dilution-based Stability Graph των Pakalnis et al. (1995), προσαρμοσμένο στα δεδομένα του συγκεκριμένου τύπου εξεταζόμενης πλευράς.



Εικόνα 6.9: Δεξιά παρειά – Δάπεδο (Right sidewall - FW): Εφαρμογή διαγράμματος προσδιορισμού ποσοστού αραίωσης κατά Pakalnis et al.1995

Για την συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτουν τα ίδια προβλεπόμενα διαστήματα ποσοστών πρόσμιξης ανά τιμή υδραυλικής ακτίνας σε σχέση με αυτά της Εικόνας 6.5. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν εντοπίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στις τιμές των δεικτών ευστάθειας όσον αφορά τις δύο παρειές των μετώπων εξόρυξης, ενώ οι υδραυλικές ακτίνες των δύο αυτών πλευρών ταυτίζονται ανά δοκιμή. Δηλαδή, όσον αφορά τις περιπτώσεις με υδραυλική ακτίνα ίση με 14,56 m αναμένονται όρια αραίωσης μεταξύ 7 – 12 %, ενώ για περιπτώσεις υδραυλικής ακτίνας ίση με 23,81 m, το αναμενόμενο διάστημα είναι 16 - 25 %. Αν και μεταξύ των δύο κατακόρυφων πλευρών εντοπίζονται μικρές διαφοροποιήσεις στα ποσοστά αραίωσης, ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με προηγούμενως.

Παρακάτω (Εικόνα 6.10) δίδεται το διάγραμμα συσχέτισης του ποσοστού υπολογιζόμενης υπέρθραυσης με τον λόγο «HR/N'» για τις περιπτώσεις των δεξιών παρειών των μετώπων εξόρυξης ή κατά παραδοχή επιφανειών “δαπέδων” (Footwalls).



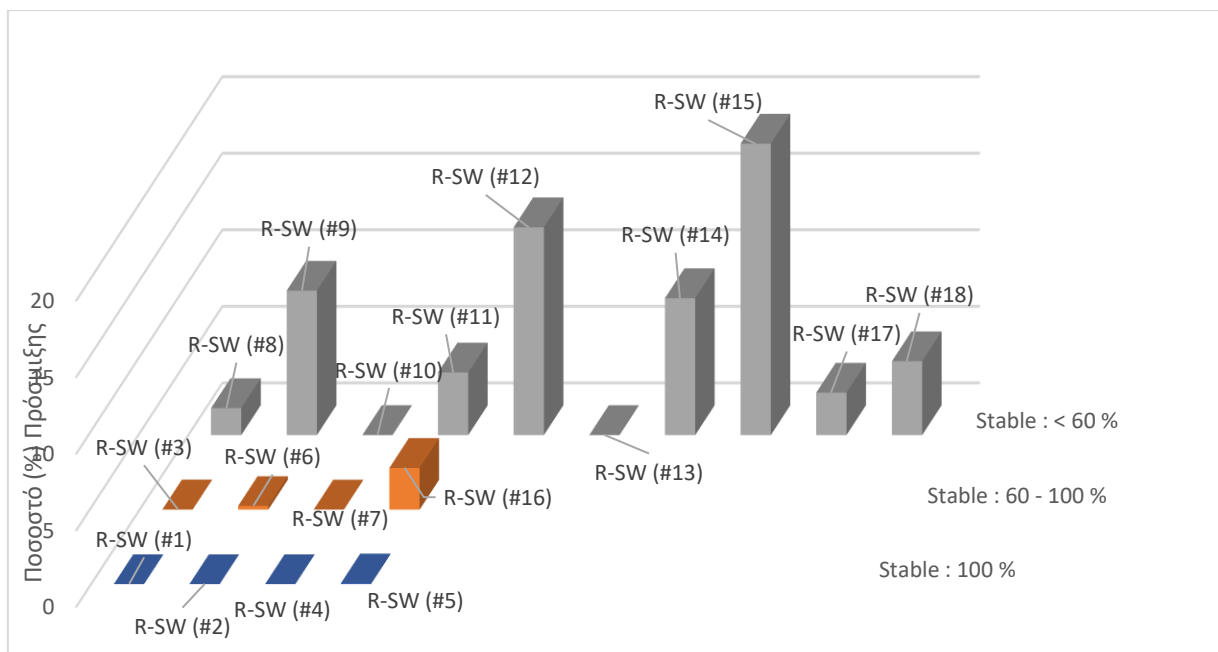
Εικόνα 6.10: Δεξιά παρειά RL-SW) : Διάγραμμα συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης - HR/N'

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ένα σχετικά ευρύ φάσμα τιμών υπέρθραυσης. Επιπλέον, και σε αυτή τη περίπτωση η πλειονότητα των σημείων δεν απέχει σημαντική απόσταση από την γραμμική εξίσωση συσχέτισης. Η τιμή του συντελεστή «R²» για το παραπάνω γράφημα είναι ίση με 0.8737.

Η σχέση υπολογισμού του ποσοστού πρόσμιξης του μεταλλεύματος που προκύπτει από την δεξιά παρειά των μετώπων εξόρυξης είναι η εξής:

$$\text{Ποσοστό προσμίξεων (\%)} = 8.5819 \times \frac{HR}{N'} - 0.2891$$

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6.11) δίδεται η διαγραμματική απεικόνιση της συσχέτισης του (%) ποσοστού υπέρθραυσης και της (%)πιθανότητας εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης για την περίπτωση της δεξιάς παρειάς των μετώπων εξόρυξης.



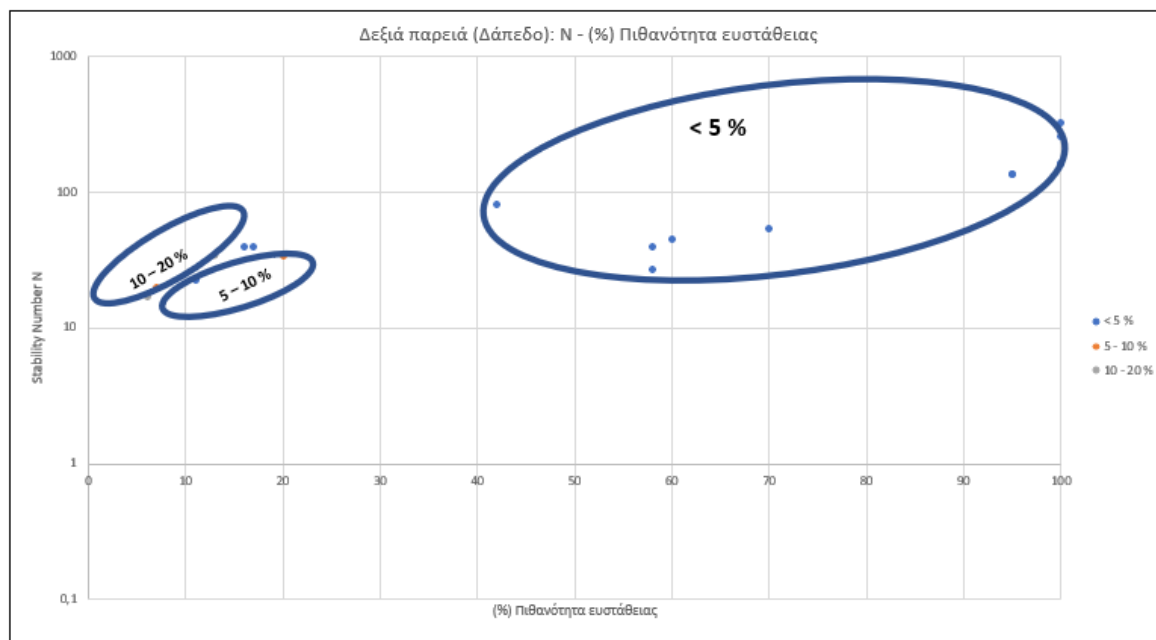
Εικόνα 6.11: Δεξιά παρειά (R-SW) : Τρισδιάστατο γράφημα σειρών συσχέτισης ποσοστού (%) υπέρθραυσης – Πιθανότητα (%) εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3 και το ανωτέρω γράφημα (Εικόνα 6.11) έχουν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Για πιθανότητες ευσταθούς κατάστασης μεγαλύτερες του 20 %, τα ποσοστά υπέρθραυσης που προσδιορίστηκαν ήταν μικρότερα του 5 % του όγκου της εκσκαφής.
- Για ποσοστιαίες τιμές πιθανότητας εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης μικρότερες του 20 % εντοπίζονται σημαντικές διακυμάνσεις στην τιμή του ποσοστού υπέρθραυσης.
- Και στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται φαινόμενα μη βέλτιστης συναρμογής των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στην Εικόνα 6.12 παρουσιάζεται μία προσέγγιση κατ' αντιστοιχία με αυτές των Εικόνων 6.4 και 6.8. Για την συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργούνται τρεις σειρές δεδομένων, με τα διαστήματα των ποσοστών αραίωσης που εντοπίζονται να είναι τα εξής:

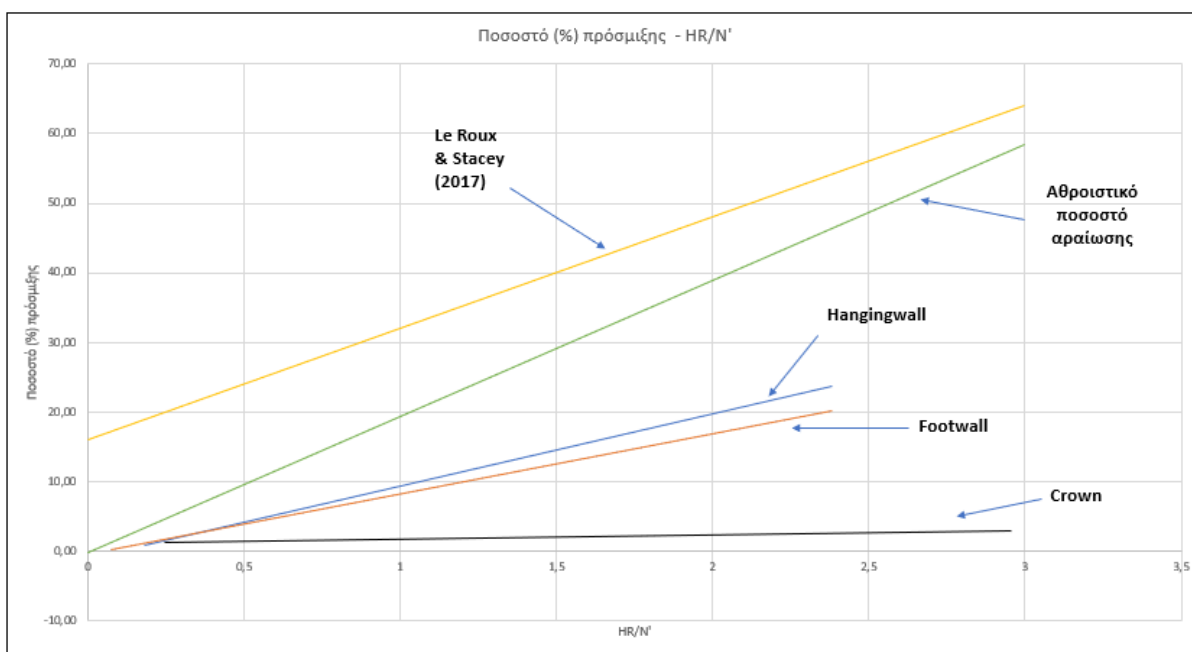
- < 5 %
- 5 – 10 %
- 10 – 20 %



Εικόνα 6.12: Δεξιά παρειά: Προσδιορισμός ποσοστών αραίωσης μεταλλεύματος μέσω ομαδοποίησης σημείων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEA - Διάγραμμα N - % Πιθανότητα εμφάνισης ευσταθούς κατάστασης

6.5 Σύγκριση εξισώσεων υπολογισμού ποσοστών πρόσμιξης

Στην Εικόνα 6.13 παρουσιάζονται εντός ενός κοινού διαγράμματος οι ευθείες που προκύπτουν σύμφωνα με τις τρεις εξισώσεις υπολογισμού των ποσοστών πρόσμιξης του μεταλλεύματος, ανά κατηγορία επιφανείας αλλά και η αθροιστική τους γραμμική καμπύλη. Στο ίδιο διάγραμμα τοποθετείται και η εξίσωση που κατασκεύασαν οι Le Roux και Stacey (2017).



Εικόνα 6.13 Διάγραμμα σύγκρισης εξισώσεων προσδιορισμού ποσοστού πρόσμιξης

Όπως γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα της Εικόνας 6.13, λόγω των παραπλήσιων αποτελεσμάτων που εμφανίζουν οι δύο κατακόρυφες πλευρές των εξεταζόμενων μετώπων εξόρυξης, οι δύο αυτές σχέσεις υπολογισμού του ποσοστού πρόσμιξης, και κατ' επέκταση και οι ευθείες που ορίζονται από αυτές τις εξισώσεις, διαφέρουν σε μικρό βαθμό. Αντίθετα, παρατηρείται ότι η γραμμή τάσης που προσδιορίζεται για την στέψη παρουσιάζει μία πολύ μικρή κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος, ενώ με βάση αυτήν προκύπτουν αρκετά χαμηλά επίπεδα αραίωσης μεταλλεύματος. Το γεγονός αυτό δύναται να αιτιολογηθεί λόγω της φύσης της συγκεκριμένης επιφάνειας και του τρόπου αστοχίας που αυτή παρουσιάζει.

Επίσης, στο προηγούμενο διάγραμμα (Εικόνα 6.13) τοποθετείται και η εξίσωση υπολογισμού των ποσοστών πρόσμιξης που προσδιορίστηκε από τους Le Roux και Stacey (2017). Όπως γίνεται αντιληπτό η συγκεκριμένη εξίσωση προσδιορίζει για αντίστοιχες τιμές λόγου «HR/N'» μεγαλύτερα ποσοστά πρόσμιξης και από τις τρεις προσδιοριζόμενες εξισώσεις της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Το συγκεκριμένο γεγονός κρίνεται ως απολύτως λογικό, καθώς οι Le Roux και Stacey δεν διαχωρίζουν τα μέτωπα εξόρυξης σε ξεχωριστούς τύπους επιφανειών, αλλά αντιθέτως, η εξίσωση που κατασκεύασαν αφορά το συνολικό ποσοστό αραίωσης που προκύπτει από όλα τα τοιχώματα του εξορυκτικού χώρου. Επιπλέον, η τιμή του λόγου «HR/N'» για την περίπτωση της εξίσωσης των Le Roux και Stacey αντιστοιχίζεται στην επιφάνεια του κενού μετώπου στην οποία εντοπίζονται τα μεγαλύτερα προβλήματα υπέρθραυσης. Δηλαδή, οι τιμές τις υδραυλικής ακτίνας και του τροποποιημένου δείκτη ευστάθειας αντιστοιχούν στην επιφάνεια που παρουσιάζει την μεγαλύτερη επιρροή στην συνολική αραίωση έναντι των υπολοίπων. Συσχετίζοντας την συγκεκριμένη ευθεία με την αθροιστική γραμμική καμπύλη που προκύπτει από την άθροιση των τριών εξισώσεων των τοιχωμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν εντοπίζεται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών ευθειών. Πιο συγκεκριμένα η αθροιστική εξίσωση υπολογίζει ποσοστά αραίωσης ελαφρώς μικρότερα από αυτά που προκύπτουν από την εξίσωση των Le Roux και Stacey για τις ίδιες τιμές λόγου «HR/N'»

6.6 Εμπειρική προσέγγιση Dilution-based Stability Graph

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση που αναλύεται ακολούθως είναι η κατασκευή ενός διαγράμματος ευστάθειας (Stability Graph) βασισμένο στα αποτελέσματα των προσμίξεων που προσδιορίζονται στις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση όλων των διαθέσιμων δεδομένων ανεξαρτήτως ύπαρξης μηδενικών ποσοστιαίων τιμών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στην αντίστοιχη των Papaioannou και Suorineni με αυτήν της παρούσης διπλωματικής εργασίας, όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω να είναι σαφώς πιο απλή στην

κατασκευή της. Το γράφημα που κατασκευάζεται έχει στον κατακόρυφο άξονα τον τροποποιημένο δείκτη ευστάθειας N' και στον οριζόντιο την υδραυλική ακτίνα HR. Και οι δύο άξονα βαθμονομούνται σε λογαριθμική κλίμακα.

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του γραφήματος αυτού είναι η κατηγοριοποίηση των αναλύσεων σε εύρη ποσοστών “αραίωσης”. Κατ’ αυτό το τρόπο ορίζονται τέσσερις σειρές δεδομένων, με τα εύρη που αντιστοιχούν σε κάθε μία από αυτές να είναι:

- $< 5 \%$
- $5 - 10 \%$
- $10 - 15 \%$
- $> 15 \%$

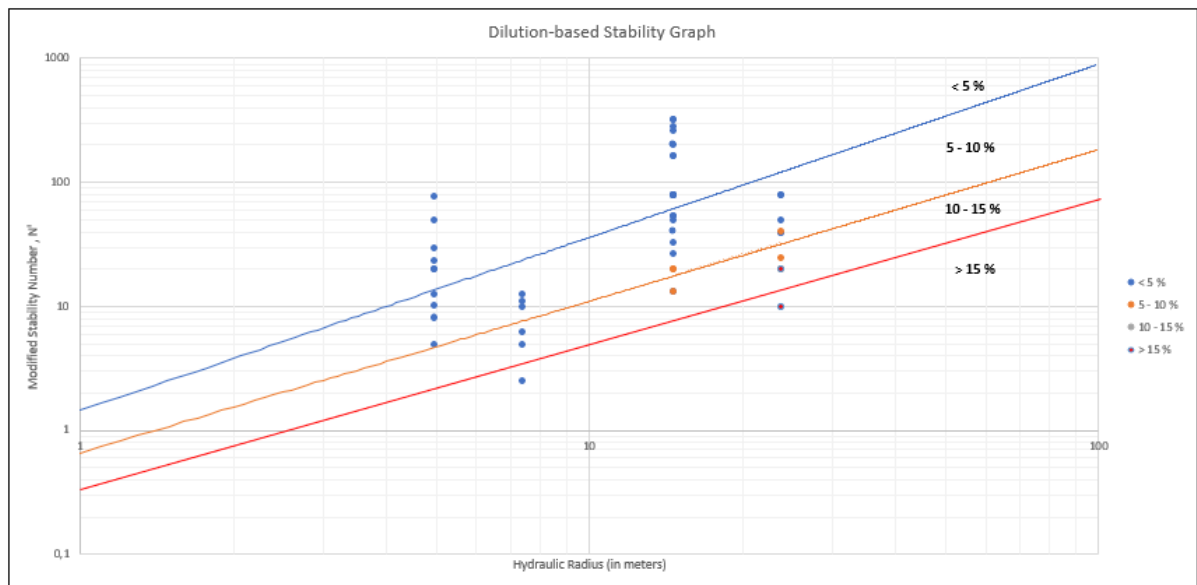
Δεύτερο βήμα αποτελεί η εισαγωγή των δεδομένων κατά σειρές δεδομένων, με κάθε διαφορετικό εύρος ποσοστών πρόσμιξης αποτελεί και μία ξεχωριστή σειρά δεδομένων.

Τρίτο και τελευταίο βήμα είναι ο καθορισμός των ορίων που καταλαμβάνει η κάθε ζώνη. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται η τοποθέτηση της γραμμής τάσης στις σειρές που αυτό είναι δυνατό, θέτοντας ως τύπο εξίσωσης την “Δύναμη” (στο πρόγραμμα Excel της Microsoft) για την κατασκευή τους. Τέλος, οι ευθείες επεκτείνονται έως ότου τμήσουν τα όρια του διαγράμματος. Ο προσδιορισμός των διαχωριστικών γραμμών που κατασκευάζονται με την συγκεκριμένη μεθοδολογία αφορούν τα διαστήματα ευρών ποσοστών $< 5 \%$, $5-10 \%$ και $10-15\%$ (κάτω όριο).

Στις κατηγορίες ποσοστών πρόσμιξης $10-15 \%$ και $>15 \%$ τα σημεία που περιλαμβάνονται είναι μόλις πέντε στο σύνολο και των δύο αυτών κατηγοριών. Επιπλέον και οι πέντε αυτές περιπτώσεις λαμβάνουν την ίδια τιμή υδραυλικής ακτίνας (23,81 m). Κατ’ αυτό το τρόπο, λόγω του ότι τα σημεία αυτά λαμβάνουν μία κοινή τιμή τετμημένης μεταβλητής, αλλά και λόγω του μικρού αριθμού δοκιμών ανά ζώνη, η διαχωριστική γραμμή για τις περιοχές με εύρη ποσοστών πρόσμιξης $10-15 \%$ (άνω όριο) και $>15 \%$ σχεδιάζεται μηχανικά μέσω προγράμματος σχεδίασης. Η διαχωριστική γραμμή αυτή σχεδιάζεται με σκοπό να μην απέχει σημαντική απόσταση από όλα τα σημεία της σειράς δεδομένων « $> 15 \%$ » και λαμβάνεται παράλληλη με την προηγούμενη από αυτήν διαχωριστική γραμμή.

Στην Εικόνα 6.14 παρουσιάζεται το εμπειρικό Dilution-based Stability Graph με βάση τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την Numerical Analysis του προγράμματος RS2. Σημειώνεται ότι τα δύο σημεία που αποτελούν την κατηγορία « $10-15 \%$ » δεν εμφανίζονται στο

διάγραμμα καθώς έχουν ακριβώς τις ίδιες συντεταγμένες μεταξύ τους και με ένα από τα σημεία της κατηγορίας «>15 %».



Εικόνα 6.14: Προσέγγιση Dilution-based Stability Graph

Τέλος, συνετό κρίνεται να αναφερθεί ότι αν και η ανωτέρω προσέγγιση (Εικόνα 6.14) δύναται να έχει σημαντική χρησιμότητα, παρόλα αυτά χρειάζεται να γίνουν και άλλες δοκιμές με πιο πραγματικά δεδομένα κοιτασμάτων ώστε να υπάρξουν και νέα δεδομένα που θα επιβεβαιώσουν την τάση που φαίνεται να υπάρχει όσον αφορά τις περιοχές ποσοστών αραίωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι πολύ πιθανό να πραγματοποιούταν καλύτερη διάκριση μεταξύ των περιοχών που ορίζουν τα ποσοστά αραίωσης.

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε το φαινόμενο της αραίωσης μεταλλεύματος σε κενά μέτωπα εξόρυξης. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις, ενώ συνολικά εξετάστηκαν έξι κύκλοι μοντέλων προσομοίωσης και δεκαοκτώ διαφορετικές δοκιμές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης ευστάθειας (Modified) Stability Graph κατά Potvin (1988), Extended Mathews' Stability Graph κατά Mawdesley et al. (2001) και τα dilution-based Stability Graphs κατά Papaioanou και Suorineni (2015) και κατά Pakalnis et al. (1995) και το λογισμικό RS2, το οποίο βασίζεται σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση των εμπειρικών μοντέλων γίνεται η πρότερη εκτίμηση – πρόβλεψη της κατάστασης ευστάθειας και των ποσοστών πρόσμιξης που αναμένεται να επιδείξουν οι εξεταζόμενες επιφάνειες των δοκιμαζόμενων μετώπων εξόρυξης, ενώ με την χρήση του προγράμματος RS2 μέσα από αριθμητικές αναλύσεις, εκτιμήθηκαν οι ζώνες πετρώματος που αναμένεται να αστοχήσουν και να προκαλέσουν αραίωση του εξορυσσόμενου υλικού. Οι περιοχές υπέρθραυσης που προσδιορίζονται, εμβαδομετρούνται με την χρήση του προγράμματος Sketch Up.

Τελικώς, κατασκευάστηκαν διαγράμματα και εξισώσεις συσχέτισης και πρόβλεψης των ποσοστών πρόσμιξης του μεταλλεύματος ανά τύπο επιφανείας με βασικές παραμέτρους χαρακτηρισμού της κατάστασης ευστάθειας μίας επιφάνειας, αλλά και μία πρόσεγγιση του Stability Graph βασισμένη στα αποτελέσματα των προσμίξεων, όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης FEA.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις εν λόγω αναλύσεις παρουσιάζονται στην ενότητα που ακολουθεί.

7.2 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων παρουσίασαν μία καλή συναρμογή με τα αναμενόμενα αποτελέσματα των εμπειρικών διαγραμμάτων ευστάθειας. Οι βασικές διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται μεταξύ των αναμενόμενων αποτελεσμάτων από τα εμπειρικά διαγράμματα και τα αποτελέσματα της ανάλυσης μέσω του προγράμματος RS2 οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στα ακόλουθα αίτια:

- Τα εμπειρικά διαγράμματα ευστάθειας έχουν προκύψει μέσα από ορισμένο αριθμό από μελέτες περιπτώσεων και αναλύσεις πεδίου, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι πιθανό στην κατασκευή τους να εμπεριέχονται σφάλματα και παραδοχές. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να συναντηθούν τόσο σε πρώιμα στάδια της μελέτης, όπως κατά την συλλογή και ερμηνεία των δεδομένων όσο και σε επόμενα στάδια, όπως κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, σχεδόν αναγκαία προς την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι η πραγματοποίηση παραδοχών κατά την ερμηνεία των δεδομένων που λαμβάνονται. Ένα τυπικό παράδειγμα παραδοχής θα μπορούσε να θεωρηθεί ο μη καταλογισμός μεριδίου συνεισφοράς στο φαινόμενο της αραίωσης σε τυχόν σφάλματα που πραγματοποιούνται κατά την εξορυκτική διαδικασία.
- Κατά την προεπισκόπηση των εισαγόμενων δεδομένων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται να γίνουν κάποιες αντιστοιχίσεις των ιδιοτήτων του σχηματισμού, μέσα από τους συντελεστές του δείκτη ποιότητας βραχόμαζας Q , με σκοπό να είναι δυνατή η συσχέτιση αυτών των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των εμπειρικών αναλύσεων. Κατ' αυτό το τρόπο, στο πέτρωμα και τις ασυνέχειες αποδίδονται ορισμένες βασικές ιδιότητες, με τον απόλυτο καθορισμό των ιδιοτήτων τους να κρίνεται σημαντικά δύσκολος. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα εισόδου είναι πιθανό να μην αντικατοπτρίζουν απόλυτα αντίστοιχες περιπτώσεις που θα αντιμετωπίζονταν στην πραγματικότητα. Το συγκεκριμένο ζήτημα βασίζεται στο ότι είναι αρκετά δύσκολο, επιφέροντας μεγάλο φορτίο ρίσκου, να επιλεγούν οι κατάλληλες ιδιότητες για έναν σχηματισμό αντιστοιχίζοντάς αυτές με τους γενικούς προσδιορισμούς των κατηγοριών που δίδονται στο σύστημα ταξινόμησης βραχόμαζας Q .
- Ο υπολογισμός των ποσοστών υπέρθραυσης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε υποκειμενικότητα. Ο προσδιορισμός των περιοχών που αστοχούν αποτελεί συνάρτηση αρκετών ιδιοτήτων και η συνεκτίμηση αυτών χρήζει ιδιαίτερη προσοχή.
- Μία από τις βασικές παραδοχές που γίνονται είναι αυτή του μήκους προχώρησης του μετώπου εξόρυξης. Όπως ήδη έχει αναφερθεί λόγω της διδιάστατης ανάλυσης ("plane strain" analysis) που πραγματοποιεί ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, το μήκος προχώρησης θεωρείται άπειρο. Κατ' αυτό το τρόπο σε αυτή τη διάσταση ήταν αναγκαίο να αποδοθεί μία τιμή πολύ υψηλή. Συνεπώς ως μήκος του μετώπου εξόρυξης τέθηκαν τα 1000 m, ως το όριο που αντικατοπτρίζει την πλέον δυσμενή κατάσταση για την συγκεκριμένη τιμή διάστασης. Η επιλογή αυτή γίνεται αφενός για τον λόγο της δυσμενής της φύσης και αφετέρου γιατί είναι πλήρως συμβατή με την «plane strain»

ανάλυση που γίνεται. Έτσι αντί για τα συνήθη πλάτη των 20 – 40 m πραγματοποιείται η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής. Αν και αυτή η προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνει σε ένα βαθμό τις υδραυλικές ακτίνες των εξεταζόμενων επιφανειών, είναι αρκετά σημαντική ώστε να επιτυγχάνεται σε ένα μεγαλύτερο βαθμό η συναρμογή μεταξύ των εμπειρικών μοντέλων και των αναλύσεων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Παρόλα αυτά η θεώρηση αυτή στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης θεωρείται ασφαλής και απολύτως αναγκαία προς την ανάπτυξη ακριβέστερων συμπερασμάτων.

- Οι λύσεις που δίδονται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι μονοσήμαντες, αλλά επηρεάζονται από τον προγραμματισμό που αυτός χρησιμοποιεί. Παραδείγματος χάριν είναι πιθανό μέσα από το πρόγραμμα να προκύψουν ορισμένες κατανομές ιδιοτήτων, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικά εμφανιζόμενες σε ένα αντίστοιχο πραγματικό έργο. Σε αυτή τη περίπτωση, σημαντικό ρόλο παίζει η κριτική σκέψη, ώστε να προκύψει το πιο λογικό αποτέλεσμα και να ληφθεί η κατάλληλη απόφαση.
- Ένα πρόβλημα, το οποίο δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί σε πολύ σημαντικό βαθμό, παρά μόνο να περιοριστεί μέσα από μία πολύ καλή προσομοίωση των απαιτούμενων ιδιοτήτων, είναι το γεγονός ότι για ένα πρόβλημα ασυνεχούς μέσου χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα (RS2) που βασίζεται σε κώδικα συνεχούς μέσου. Το πρόγραμμα επιλέγεται με βάση το εύχρηστο περιβάλλον εργασίας του και την εξαγωγή αποτελεσμάτων ικανοποιητικής ακρίβειας και μίας πληθώρας ιδιοτήτων προς επεξεργασία.

Ακολούθως παρατίθενται ορισμένες ακόμη παρατηρήσεις και συμπεράσματα :

- Όπως μπορεί να προκύψει σαν ένα γενικό συμπέρασμα, όσον αφορά τις κατηγορίες γωνίας κλίσης ασυνεχειών, η περίπτωση των 30° κλίσης παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις από τα αναμενόμενα, καθώς σε αρκετές από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις στις δύο παρειές του μετώπου δεν εντοπίζονται περιοχές υπέρθραυσης. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται σε ένα βαθμό από την ποιότητα των σχηματισμών ανά εξεταζόμενη περίπτωση αλλά και από το ότι η συγκεκριμένη γωνία κλίσης αποτελεί ευμενή συνθήκη για την ευστάθεια των παρειών του εξορυκτικού χώρου.
- Λόγω του ότι η αλλαγή του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών δεν είναι απόλυτα ακριβής και εφικτή με βάση την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναγκαίο για να προκύψουν περιπτώσεις μεγαλύτερων

ποσοστών υπέρθραυσης ήταν να αναζητηθούν άλλοι μείωσης της ευστάθειας των επιφανειών του μετώπου. Κατ' αυτό το τρόπο επιλέχθηκε να μεταβληθεί η ποιότητα του υλικού, οι γεωμετρικές διαστάσεις του μετώπου, και κατ' επέκταση και οι υδραυλικές ακτίνες, αλλά και ο συντελεστής Ja, μέσα από την θεώρηση υλικού πλήρωσης εντός των ασυνεχειών.

- Εκ του αποτελέσματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι το Extended Mathews' Stability Graph παρουσιάζει καλύτερη συναρμογή με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα (RS2) σε σχέση με το Modified Stability Graph. Αξιοσημείωτο είναι ότι και το Dilution-based Stability Graph των Papaioannou και Suorineni σε πολλές περιπτώσεις προσέφερε πολύ καλές προβλέψεις για τα αναμενόμενα ποσοστά αραίωσης, καθώς αυτά ήταν αξιόπιστα και επαληθεύτηκαν σε αρκετές μελέτες περιπτώσεων.

Τέλος, συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι όσον αφορά τα αποτελέσματα των στέψεων, αυτά παρουσίασαν σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικές διαφοροποιήσεις και μειωμένη συναρμογή με τα αναμενόμενα. Αιτιολόγηση του συγκεκριμένου φαινομένου παρατίθεται εκτενώς στην ενότητα 6.2.2. . Αντιθέτως, ικανοποιητική συναρμογή εντοπίστηκε για το δάπεδο και την οροφή των μετώπων εξόρυξης. Επιπροσθέτως, ο λόγος «HR/N'» μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σημαντική αξιοπιστία ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα και συμπεράσματα για την ευστάθεια και την αραίωση επιφανειών μετώπων εξόρυξης και ιδιαίτερα για τις δύο πλευρικές παρειές των κενών χώρων εξόρυξης.

Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- Alford, C., & Hall, B. (2009). Stope Optimisation Tools for Selection of Optimum Cut-Off Grade in Underground Mine Design. *Project Evaluation Conference*, (σσ. 137-144). Melbourne.
- Arioglu, E. (1994). Cevher Seyrelmede Seyrelme Fatorunun Hesabi. Στο *Tasarim ve Uygulamada Madencilik Problemlerinin Cozumleri* (σσ. 85-87). TMMOB Maden Muhendisleri Yayini.
- Atlas Copco Rock Drills AB. (2007). *Mining Methods in Underground Mining(2)*. Ανάκτηση από https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/mining_methods_underground_mining.pdf
- Bootsma , M. (2013). *Cut-off Grade Based Sublevel Stope Mine Optimization*. Section for Resource Engineering, Department of Geoscience & Engineering, Delft University of Technology.
- Butcher, R. (2002). Dilution control in southern African mines. Στο *Proceedings of African Mining Brisbane* . Brisbane, Queensland: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Cepuritis, P. &. (26 - 27 September 2006). Back Analysis Techniques for Assessing Open Stope Performance. Australian Mining Technology Conference.
- Cepuritis, P., & Villaescusa, E. (2006, September 26-27). Back Analysis Techniques for Assessing Open Stope Performance. *Australian Mining Technology Conference*.
- Cepuritis, P., Villaescusa, E., Beck, D., & Varden, R. (June 27–30, 2010). Back analysis of Over-break in a Longhole Open Stope Operation using Non-linear Elasto-Plastic Numerical Modelling. *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*. Salt Lake City: 2010 ARMA: American Rock Mechanics Association. Ανάκτηση από <https://www.researchgate.net/publication/267026278>
- Clark, L. (1998). *Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting*. The University of British Columbia.
- Clark, L., & Pakalnis, R. (1997). *An empirical design approach for estimating unplanned dilution from stope hanginwalls and footwalls*. Montreal: Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- Cokayne, E. (1982). *Sublevel caving: Introduction;*, in *Underground mining methods handbook*. New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum.

- Crawford, G. (2004, November). Pincock Perspectives. Ανάκτηση March 22, 2020, από Dilution and Ore Recovery: <https://pdfslide.us/documents/mining-dilution.html>
- Diakité , O. (1998). *Ore Dilution In Sublevel Stopping*. Montreal: Department of Mining and Metallurgical Engineering.
- Diederichs, M., & Kaiser, P. (1996). Rock instability and risk analyses in open stope mine design. *Canadian Geotechnical Journal*(33), 431-439.
- Dominy , S., Camm, G., & Phelps, R. (1997, January). Narrow vein mining - A challenge to the operator. *Mine Planning and Equipment Selection*, σ. 128.
- Elbrond, J. (1994). *Economic effects of ore losses and rock dilution* (87 εκδ.). CIM Bulletin. *Estimating Joint Stiffness*. (χ.χ.). Ανάκτηση από https://www.roscience.com/help/rs2/theory/Estimating_Joint_Stiffness.htm
- Germain , P., & Hadjigeorgiou , J. (1997). Influence of stope geometry and blasting patterns on recorded overbreak. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(115).
- Harraz, H. (2014, October 22). Sublevel Stopping. *Topic 4 : Underground Mining Methods*. Ανάκτηση March 24, 2020, από <https://www.slideshare.net/hzharraz/sublevel-stoppingunderground-mining-methods>
- Harraz, H. (2019, Spring). Topic : Ore dilution and ore recovery. Tanta, Egypt. Ανάκτηση από <https://www.slideshare.net/hzharraz/ore-dilution-and-ore-recovery>
- Heidarzade, S., Saeidi, A., & Rouleau, A. (2019, May). Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stopping method using numerical modeling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3), σσ. 399-408. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.011>
- Henning , J., Gauthier, P., & Ruest , M. (1997). *Etude sur la Stabiit  des Epontes Supeneures au Complexe Bousquet*. Mine intemol report.
- Henning, J., & Mitri, H. (2007). "Numerical modelling of ore dilution in blasthole stopping.". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Inglar, D. (1984). Rock Dilution and Ore Losses. Στο *Mining methods*.
- Jang, H. D. (2014). *Unplanned Dilution and Ore-Loss Optimisation in Underground Mines via Cooperative Neuro-Fuzzy Network*. Bentley, Western Australia: Western Australia School of Mines.
- Jarosz, A., & Shepherd, L. (2000). *Application of Cavity Monitoring System for the control of dilution and ore loss in open stopes*. Western Australia: Curtin University of Technology, Western Australian School of Mines, Mine Surveying Program.

- Lama, R., & Vutukuri, V. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks: Testing Techniques and Results*. Trans Tech Publications.
- Laubscher, D. (2000). *A practical manual on block caving*. International Caving Study (1997-2000).
- Le Roux, P., & Stacey, T. (2017, February). Value creation in a mine operating with open stoping mining methods. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*(117).
- Mandal, & Sight. (2009). *Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels*. Tunnelling and Underground Space Technology.
- Mawdesley, C., Trueman, R., & Whiten, W. (2001). *Extending the Mathews stability graph for open-stope design*. EBSCO Publishing.
- Miller, F., Potvin, Y., & Jacob, D. (1992). *Laser measurement of open stope dilution*. CIM Bulletin.
- Mitani, T., & Kawai, T. (1974). Experimental study on relationship between engineering properties of rock and mechanical drilling characteristics. *Rock Mech. In Japan*, 2, 124-126.
- Mouhabbis, H. Z. (February 2013). *Effect of stope construction parameters on ore dilution in narrow vein mining*. Montreal, Quebec, Canada : Department of Mining and Metals and Materials Engineering McGill University.
- N.G.I. (2015). *Rock mass classification and support design*. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute. Ανάκτηση από <https://ngi.no/eng/Publications-and-library/Books/Q-system>
- Pakalnis, R. (1986). *Empirical Stope Design at Runan Mine*, Ph.D. thesis. University of British Columbia.
- Pakalnis, R., & Vongpaisal, S. (1993). *Innovative Mine Design for the 21st Century*. Στο *Mine Design an Empirical approach*. Balkema, Rotterdam: Bawden and Archibald.
- Pakalnis, R., Nickson, S., Lunder, P., Clark, L., Milne, D., & Mah, P. (1996). Empirical methods for the design of mine structures. *11th Colloquium on Ground Control, March*. Mining Assoc. of Quebec.
- Pakalnis, R., Poulin, R., & Hadjigeorgiou, J. (1995). Quantifying the cost of dilution in underground mines. *Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*.
- Palmström, A. (1982). The volumetric joint count – A useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Congr. Int. Assn. Engng. Geol.* Delhi.
- Papaioanou, A., & Suorineni, F. (2015, January). Dilution-based Stability Graph for Open Stope Design. *Research Gate*.

- Planeta, S., & Bourgoïn, C. (1990). The impact of rock dilution on underground mining. *92nd Canadian Institute of Mining Annual General Meeting*. Ottawa.
- Potvin, Y. (2014). *The modified stability graph method; more than 30 years later*. Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia.
- Potvin, Y., & Hadjigeorgiou, J. (2001). The Stability Graph Method for Open-Stope Design. Στο R. Bullock, & W. Hustrulid, *Underground Mining Methods* (σσ. 513-520). Society of Mining, Metallurgy and Exploration .
- Potvin, Y., Hudyma, M., & Miller, H. (1988). *The Stability Graph Method For Open Stope Design*. University of British Columbia.
- Puhakka, R. (1991). *Geological waste rock dilution* (94 εκδ.). The Finnish Association of Mining and Metallurgical Engineers.
- Ren Honggang et al. (2018). Digital Precision Design For a Platinum Gold Mine With Deep Ming in South Africa. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ*. Ανάκτηση από <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/189/3/032006/pdf>
- RS2 FAQs: Theory*. (χ.χ.). Ανάκτηση από https://www.roscience.com/help/rs2/FAQs/Phase2_FAQs__Theory.htm
- Sens, J. (2011). *Stope mine design optimisation using various algorithms for the Randgold Kibali project*. MasterofScienceThesis, Faculty of Civil Engineering and Geo Technology(CITG) , Delft University of Technology.
- Singh, B., & Goel, R. (2011). *Strength of Discontinuities*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385878-8.00015-X>
- SOYER , N. (2006). *AN APPROACH ON DILUTION AND ORE RECOVERY/ LOSS CALCULATIONS IN MINERAL RESERVE ESTIMATIONS AT THE CAYELI MINE, TURKEY*. SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY .
- Stephenson , R., & Sandy, M. (2013). Optimising stope design and ground support – a case study. Στο Y. Potvin, & B. Brady (Επιμ.), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. Perth: Australian Centre for Geomechanics. doi:https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_25_Stephenson
- Stewart, P., & Trueman, R. (2001). The Extended Mathews Stability Graph: Quantifying case history requirements and site-specific effects. *Proc 1st International Symposium on Mining Techniques of Narrow-Vein Deposits*. Quebec, Canada: CIM Val d'Or.
- Stewart, P., & Trueman, R. (2008, October 14-15). Strategies for Minimising and Predicting Dilution in Narrow Vein Mines – The Narrow Vein Dilution Method. Ballarat, Vic: Narrow Vein Mining Conference.

- Suglo, S. R., & Opoku, S. (2012). An assessment of dilution in sublevel caving at Kazansi Mine. *International Journal Mining and Mineral Engineering*, 6-8,10-11.
- Suorineni, F. (2010). The stability graph after three decades in use: Experiences and the way forward. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*.
- Suorineni, T. (June 2012, June). A Critical Review of the Stability Graph Method for Open Stope Design, Conference Paper. Sudbury, Ontario, Canada: MIRARCO/Geomechanics Research Centre (GRC), Laurentian University.
- Tannant, D., & Diederichs, M. (1997). *Cablebolt optimization in #3 Mine*. Ontario, Canada: Report to Shawn Seldon, Kidd Mines Division, Timmins.
- Tincelin, E., & Sinou, P. (1964). Control of weak roof strata in the iron ore mines of Lorraine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 341-383.
- Tommila, E. (2014). *Mining method evaluation and dilution control in Kittilä mine*. Aalto University School of Engineering Degree Programme in Civil and Structural Engineering.
- Trueman, B. (2000). Experience at Mount Charlotte Mine with the Application of the Mathew's Method for Open Stope Design. Στο *Mine Design Case Studies* (Τόμ. 10). ACG Rock Mechanics Practice for Underground Mines.
- Vallejos, J., Delonca, A., & Pere, E. (2017, April 19). Three-dimensional effect of stresses in open stope mine design. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 355-374. doi:<https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1309833>
- Villaescusa, E. (1995). *Sources of external dilution in underground sublevel and bench stoping*. Brisbane, Australia: AusIMM ExpoConference.
- Villaescusa, E. (1998). Geotechnical design for dilution control in underground mining. Στο R. K. Singhal, *Mine Planning and Equipment Selection* (σ. 141). Rotterdam: Balkema.
- Villaescusa, E. (2014). *Geotechnical Design for Sublevel Open Stoping*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Wang, W., Huang, S., Wu, X., & Ma, Q. (2011, May). Calculation and Management for Mining Loss and Dilution under 3D Visualization Technical Condition. *Journal of Software Engineering and Applications*. Ανάκτηση από <http://www.SciRP.org/journal/jsea>
- Wright, A. (1983). Dilution and mining recovery. Στο *Erzimetal* (36 εκδ.).

Ελληνική βιβλιογραφία

- Μενεγάκη, Μ. (2010). *Σημειώσεις του Μαθήματος : Σχεδιασμός Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Μπενάρδος, Α. (2014). *Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης – Ελληνικές Εκμεταλλεύσεις*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Πανεπιστημιακές Εκδόσεις.
- Νομικός, Π. (2015). *Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα.
- Τερζόπουλος, Ν. Γ. (2003). *Μέθοδοι Υπογείων Εκμεταλλεύσεων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Πανεπιστημιακές Εκδόσεις.
- Τουλίκας, Θ. (2019). *Διπλωματική εργασία : "Αξιολόγηση Ευστάθειας και υπολογισμός αραίωσης μεταλλεύματος σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις"*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.